**ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ**
**УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

**Катедра за енергетске претвараче и погоне**

---

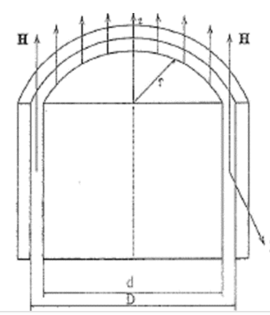
**Испит/други колоквијум из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)**

*Максимално трајање 180 / 150 минута* 1. 2. 2024.
*Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић*

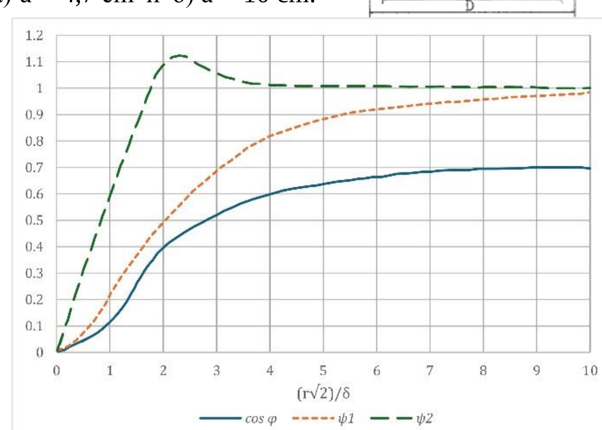
1. Израчунати најтоплију тачку намотаја сувог електроенергетског трансформатора који се хлади ваздухом температуре 20°C, симетрично на унутрашњој и спољној површи, при чему коефицијент преласка топлоте струјањем са површи на ваздух износи $\alpha_k$ = 6 W/m$^2$K. Висина намотаја је $H$ = 0,75 m, а унутрашњи пречник $D_u$ = 363 mm. Намотај је фолијског типа и има $N$ = 119 навојака, сваки висине једнаке висини намотаја; дебљина изолације између навојака износи $\delta_i$ = 0,046 mm, специфична топлотна проводност изолације $\lambda_i$ = 0,15 W/mK, ширина проводника (алуминијум) $\delta_{Al}$ = 0,2 mm. Губици у једном навојку износе $P_g$ = 10 W. При решавању задатка сматрати да је отпор преносу топлоте провођењем кроз слојеве изолације исти, односно израчунавати га као отпор провођењу топлоте кроз раван зид површине $(\pi\cdot(D_u + N\cdot\delta_{Al} + (N + 1)\cdot\delta_i))\cdot H$) и дебљине $\delta_i$. Сматрати и да су отпори преласку топлоте струјањем на унутрашњој и спољашњој површи намотаја исти. Слој изолације постоји и на унутрашњој страни крајњег унутрашњег навојка и на спољној страни крајњег спољашњег навојка. Збир првих $n$ чланова аритметичког реда (први елемент реда $a_1$, разлика два суседна члана реда $d$) износи $n\,a_1 + (n\,(n - 1))/2\,d$. (2п / 0п)

2. Модул базиран на примени Пелтијеове електромоторне силе димензија 60 x 48 mm, има $N$ = 126 $pn$ спојева. Однос пресека кроз који протиче струја и дебљине елемента је $S/L$ = 1,5 mm. Топлотни отпора провођењу топлоте кроз електроизолациони слој (керамику) и контактни топлотни отпор могу се описати еквивалентним коефицијентом преноса топлоте $k_p$ = 0,33 W/(cm$^2$K). Модул ради у режиму топлотне пумпе. Написати систем једначина чијим се решавањем може одредити напон који треба довести на модул како би се остварило да се хладно тело температуре 5°C хлади снагом 30 W, при чему је познато да је температура топлог тела на које је ослоњен модул 35°C. При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени $pn$ спојеви је ($T$ (K) представља апсолутну температуру): $a$[V/K] = $2\alpha = 2\cdot(22224 + 930{,}6\cdot T - 0{,}9905\cdot T^2)\cdot 10^{-9}$, $\rho[\Omega\cdot\text{cm}] = (5112 + 163{,}4\cdot T + 0{,}6279\cdot T^2)\cdot 10^{-8}$, $\lambda$[W/(cm·K)] = $(62605 - 277{,}7\cdot T + 0{,}4131\cdot T^2)\cdot 10^{-6}$. Карактеристике $\rho$ и $\lambda$ се приближно могу одредити користећи температури на средини полупроводника. (2,5п / 3п)

3. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника $D$ = 0,1 m, инсталисане електричне снаге $P_{inst}$ = 1000 W, топлотног капацитета $C_p^T$ = 1200 J/K и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према околини, $R_p^T$ = 0,5 K/W, постављена је посуда запремине 1 литар. Прелаз топлоте провођењем са плоче на посуду, истог пречника и равног дна, је добар ($R_\lambda^T \approx 0$), а такође се може занемарити и топлотни отпор преласку топлоте струјањем са посуде на воду ($R_{2\alpha}^T \approx 0$). Топлотни капацитет посуде износи $C_l^T$ = 100 J/K, а топлотни отпор преносу топлоте струјањем са посуде на околни ваздух $R_{1\alpha}^T$ = 1 K/W. Специфични запремински топлотни капацитет воде износи $c_v$ = 4100 kJ/m$^3$K. Након што је вода прокључала, она је наставила да кључа и испарава из шерпе. Након што је испарило 30 % воде, до врха шерпе је доливена вода температуре 15°C. После ког времена ће вода поново да прокључа? Температури амбијента износи 20°C. (2,5п / 3п)



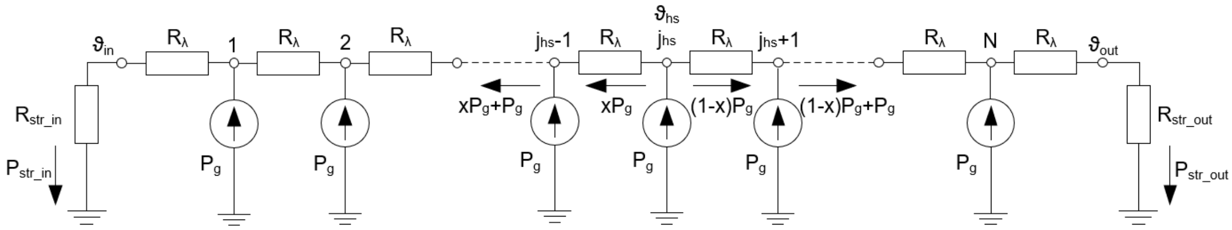

4. Одредити однос активних и реактивних снага које се предају цилиндричном бакарном индукту електротермичког електроиндукционог уређаја (слика), чији је пречник: а) $d$ = 4,7 cm и б) $d$ = 10 cm. Однос снаге одредити за случајеве индукционог загревања при учестаности електричних величина $f_1$ = 50 Hz и $f_2$ = 3 kHz. Специфична електрична проводност бакра износи $\sigma = 57\cdot 10^6$ S/m. Зависност фактора који фигуришу у изразима за површинске густине активне и реактивне снаге (изрази дати на крају текста задатка), као и фактора снаге оптерећења, од вредности односа полупречника цилиндра и дубине продирања, приказана је на слици. Вредности упоредити за исте јачине магнетног поља на површи иднукта и исте температуре индукта, при којима специфична електрична отпорност има наведену вредност. (2п / 2,5п) $P_{s0} = \frac{H_0^2}{2\sigma\delta}\psi_1\left(\frac{\Delta}{\delta}\right)$ и $Q_{s0} = \frac{H_0^2}{2\sigma\delta}\psi_2\left(\frac{\Delta}{\delta}\right)$




5. Навести механизме регулације снаге загревања у трофазним електролучним пећима за топљење метала. (2п / 2,5п)

**1. Задатак**

Општа шема, која важи за несиметричне услове хлађења приказана је на слици 1.1:




*Слика 1.1*

У условима симетричног хлађења важи: $\vartheta_{in} = \vartheta_{out}$ и $j_{hs} = 60$.

Кроз сваку од граничних површи енергија се преноси према ваздуху снагом:

$$P_\alpha = P_{str,in} = P_{str.out} = 59{,}5 \cdot 10\ W = 595\ W \tag{1.1}$$

Површ меродавна за израчунавање топлотних отпора преносу топлоте провођењем и струјањем износи:

$$S = \pi \cdot D_{sr} \cdot H = \pi \cdot (D_u + N \cdot \delta_{Al} + (N+1) \cdot \delta_i) \cdot H = 0{,}9244\ m^2 \tag{1.2}$$

Топлотни отпор преносу топлоте провођењем кроз један слој изолације износи:

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda_i}\frac{\delta_i}{S} = \frac{1}{0{,}15} \cdot \frac{0{,}046}{0{,}9241} = 0{,}33175 \cdot 10^{-3}\,\frac{K}{W} \tag{1.3}$$

Топлотни отпор преносу топлоте струјањем износи:

$$R_\alpha = R_{str,in} = R_{str,out} = \frac{1}{\alpha S} = \frac{1}{6 \cdot 0{,}9244} = 180{,}3 \cdot 10^{-3}\,\frac{K}{W} \tag{1.4}$$

Температура граничних површи износи:

$$\vartheta_{in} = \vartheta_{out} = 20℃ + P_\alpha \cdot R_\alpha = 20℃ + 595 \cdot 180{,}3 \cdot 10^{-3} = 127{,}3℃ \tag{1.5}$$

На основу топлотне шеме, и узимајући у обзир симетрију (најтоплији је 60-ти навојак и половина снаге губитака у њему се преноси ка унутрашњој, а половина ка спољашњој површи намотаја; коефицијент $x$ који се појављује у наредним изразима има вредност 0,5) могу се написати следећи изрази:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = \sum_{i=1}^{j_{hs}} R_\lambda P_i \tag{1.6}$$

На основу еквивалентне шеме се могу дефинисати снаге преноса топлоте на свакој од деоница ($P_i$), после чега претходни израз постаје:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = R_\lambda\left(xP_g + \left(xP_g + P_g\right) + \left(xP_g + 2P_g\right) + \ldots + \left(xP_g + (j_{hs}-1)P_g\right)\right) \tag{1.7}$$

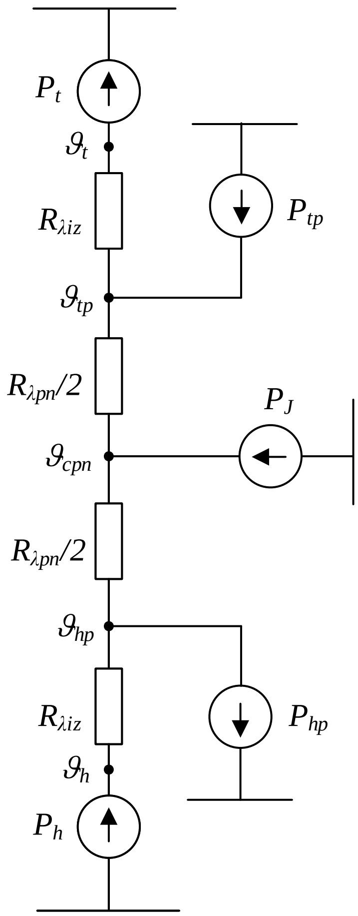
Односно

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_\lambda\left(xj_{hs}P_g + P_g\sum_{i=1}^{j_{hs}-1} i\right) \tag{1.8}$$

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_\lambda P_g\left(xj_{hs} + \frac{j_{hs}(j_{hs}-1)}{2}\right) = 127{,}3 + 0{,}33175 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \left(0{,}5 \cdot 60 + \frac{59 \cdot 60}{2}\right) = 133{,}3℃ \tag{1.9}$$

**2. Задатак**

Упрошћена топлотна шема за модул у режиму топлотне пумпе приказана је на слици 2.1.




$N := 126$ $\quad SL := 0.15$ $\quad Sp := 28.8$ $\quad kp := 0.33$

$$a(T) := 2\cdot(22224 + 930.6\cdot T - 0.9905\cdot T\cdot T)\cdot 10^{-9}$$

$$\rho(T) := (5112 + 163.4\cdot T + 0.6279\cdot T\cdot T)\cdot 10^{-8}$$

$$\lambda(T) := (62605 - 277.7\cdot T + 0.4131\cdot T\cdot T)\cdot 10^{-6}$$

$tt := 35$ $\quad th := 5$ $\quad Ph := 30$

Pocetna vrednost za iteriranje

$Pt := 100$

$ttp := 40$ $\quad thp := 2$ $\quad tcpn := 30$

$U := 10$ $\quad I := 2$

$$E(ttp, thp) := [N\cdot a(ttp + 273.16)\cdot(ttp + 273.16) - N\cdot a(thp + 273.16)\cdot(thp + 273.16)]$$

$$Rel(ttp, thp) := 2\cdot N\cdot \rho\left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16\right)\cdot\frac{1}{SL}$$

Given

$$2\cdot N\cdot \rho\left(\frac{ttp+thp}{2}+273.16\right)\cdot\frac{I^{2}}{SL} = \frac{1}{2}\cdot\lambda\left(\frac{ttp+thp}{2}+273.16\right)\cdot 2\cdot N\cdot SL\cdot(tcpn-ttp)+\frac{1}{2}\cdot\lambda\left(\frac{ttp+thp}{2}+273.16\right)\cdot 2\cdot N\cdot SL\cdot(tcpn-thp)$$

$$\frac{1}{2}\cdot\lambda\left(\frac{ttp+thp}{2}+273.16\right)\cdot 2\cdot N\cdot SL\cdot(tcpn-ttp) = Pt - N\cdot a(ttp+273.16)\cdot(ttp+273.16)\cdot I$$

$$Pt = kp\cdot Sp\cdot(ttp-tt)$$

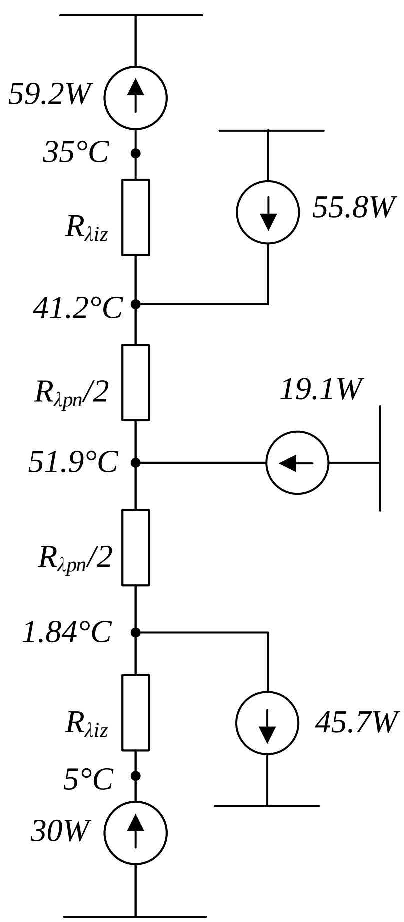
$$\frac{1}{2}\cdot\lambda\left(\frac{ttp+thp}{2}+273.16\right)\cdot 2\cdot N\cdot SL\cdot(tcpn-thp)+Ph = N\cdot a(thp+273.16)\cdot(thp+273.16)\cdot I$$

$$Ph = kp\cdot Sp\cdot(th-thp)$$

$$I = \frac{U-E(ttp,thp)}{Rel(ttp,thp)}$$

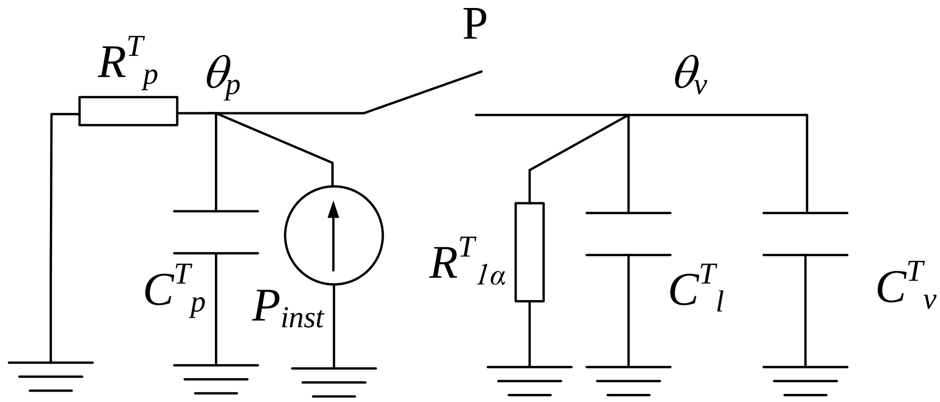
$$Resenje := find(Pt, ttp, thp, tcpn, U, I)$$

$$Resenje = \begin{pmatrix} 59.172 \\ 41.226 \\ 1.843 \\ 51.903 \\ 8.981 \\ 3.248 \end{pmatrix}$$



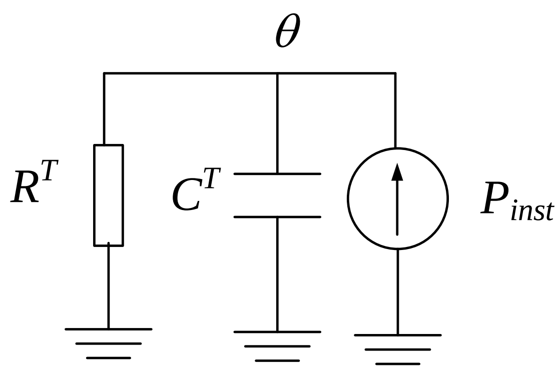
**3. Задатак**

Топлотна шема којом се моделује загревање приказана је на слици:




Слика 3.1

Након што се посуда са водом постави на грејну плочу, прекидач P се затвара, после чега се шема са слике 3.1 своди на




Слика 3.2

где је $R^T$ = 0,33 K/W и $C^T$ = 5400 J/K.

Решавањем диференцијалне једначине којом се описује шема на слици 3.2 добија се познати израз за временску зависност температуре плоче, посуде и воде у односу на околину:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_\infty\left(1 - e^{-t/\tau}\right), \tag{3.1}$$

где је $\theta_\infty = P_{inst}\,R^T$ = 333,33 K и $\tau = C^T R^T$ = 1800 s.

Вода, након што прокључа, полако почиње да испарава, при чему је њена температура константа. Са испаравањем воде, смањује се вредност укупног топлотног капацитета $C^T$. Када испари 30% воде, вредност топлотног капацитета је $C^T{}_{isp} = C^T{}_p + C^T{}_l + 0{,}7C^T{}_v$ = 4170 J/K. Након што се у посуду долије 0,3 l хладне воде ($C^T{}_{15°C} = 0{,}3C^T{}_v$ = 1230 J/K), нова температура воде (као и рингле и посуде) је

$$\vartheta_0 = \frac{100℃ \cdot C_{isp}^T + 15℃ \cdot C_{15℃}^T}{C^T} = 80{,}64℃, \tag{3.2}$$

односно почетни пораст температуре за загревање које следи је $\theta_0$ = 80,64 – 20 = 60,64 K.

На основу једначине (3.1) могуће је одредити време загревања воде од $\theta_0$ до кључања ($\theta$ = 80 K)

$$t = \tau \cdot \ln\frac{\theta_0 - \theta_\infty}{\theta - \theta_\infty} = 1800\ s \cdot \ln\frac{60{,}64\ K - 333{,}33\ K}{80\ K - 333{,}33\ K} = 132{,}56\ s \tag{3.2}$$

**4. Задатак**

Дубина продирања електромагнетног поља, при учестаности $f_1$ = 50 Hz, износи

$$\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot (57 \cdot 10^6) \cdot (4\pi \cdot 10^7) \cdot 50}} = 9{,}43\ mm, \tag{4.1}$$

а при учестаности $f_2$ = 3 kHz

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot (57 \cdot 10^6) \cdot (4\pi \cdot 10^7) \cdot 3000}} = 1{,}22\ mm. \tag{4.2}$$

а) Вредности фактора који фигуришу у изразима за активну и реактивну снагу одређују се на основу дијаграма датог у тексту задатака. При учестаности 50 Hz вредност независно промењиве за коју се одређују вредности фактора износи

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}=\frac{\frac{47}{2}\sqrt{2}}{9{,}43}=3{,}52\,, \tag{4.3}$$

а при учестаности 3 kHz

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}=\frac{\frac{47}{2}\sqrt{2}}{1{,}22}=27{,}24. \tag{4.4}$$

За случај 50 Hz са дијаграма су очитане вредности $\psi_{11}$ = 0,757 и $\psi_{21}$ = 1,026, а при учестаности 3 kHz вредности $\psi_{12}$ = 1 и $\psi_{22}$ = 1. Однос активних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz ($P_{s02}$) и 50 Hz ($P_{s01}$), одређен је изразом

$$\frac{P_{s02}}{P_{s01}}=\frac{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_2}\psi_{12}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_1}\psi_{11}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}=\frac{\psi_{12}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\psi_{11}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}\frac{\delta_1}{\delta_2}=10{,}21. \tag{4.5}$$

Однос реактивних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz ($Q_{s02}$) и 50 Hz ($Q_{s01}$), одређен је изразом

$$\frac{Q_{s02}}{Q_{s01}}=\frac{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_2}\psi_{22}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_1}\psi_{21}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}=\frac{\psi_{22}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\psi_{21}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}\frac{\delta_1}{\delta_2}=7{,}534. \tag{4.6}$$

б) Вредност независно промењиве за коју се одређују вредности фактора, при учестаности 50 Hz износи

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}=\frac{\frac{100}{2}\sqrt{2}}{9{,}43}=7{,}5\,, \tag{4.7}$$

а при учестаности 3 kHz

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}=\frac{\frac{100}{2}\sqrt{2}}{1{,}22}=57{,}96. \tag{4.8}$$

За случај 50 Hz са дијаграма су очитане вредности $\psi_{11}$ = 0,9526 и $\psi_{21}$ = 1,007, а при учестаности 3 kHz вредности $\psi_{12}$ = 1 и $\psi_{22}$ = 1. Однос активних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz ($P_{s02}$) и 50 Hz ($P_{s01}$), одређен је изразом

$$\frac{P_{s02}}{P_{s01}}=\frac{\psi_{12}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\psi_{11}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}\frac{\delta_1}{\delta_2}=8{,}114. \tag{4.9}$$

Однос реактивних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz ($P_{s02}$) и 50 Hz ($P_{s01}$), одређен је изразом

$$\frac{Q_{s02}}{Q_{s01}}=\frac{\psi_{22}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\psi_{21}\left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)}\frac{\delta_1}{\delta_2}=7{,}676. \tag{4.6}$$

**<u>5. Задатак</u>**

Материјали са предавања „TPE09_Casovi_19do22“ слајд 35.