

**VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH  
STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD**

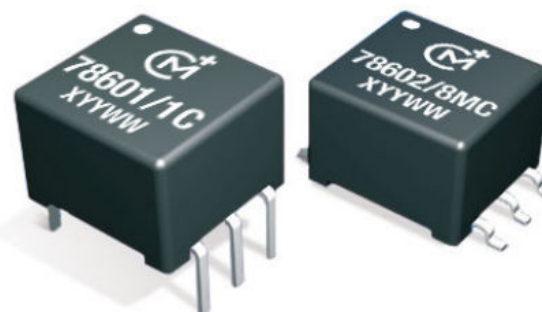
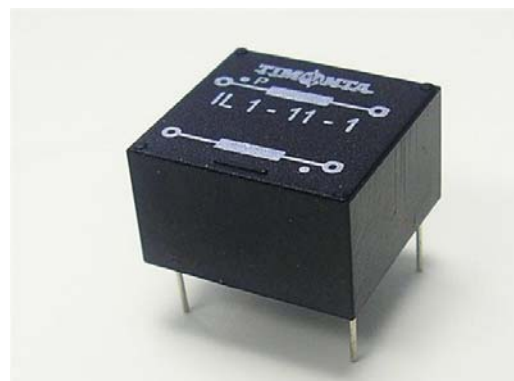
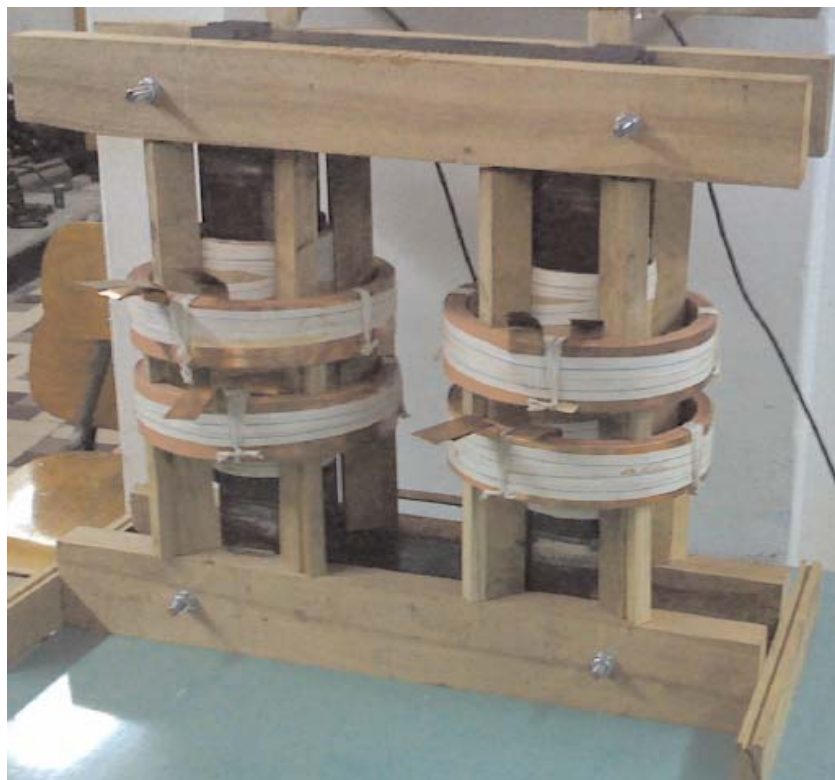
**STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE**

**MASTER STUDIJE 2018/2019**

**PREDMET: PROJEKTOVANJE ELEKTRO ENERGETSKIH PRETVARAČA**



## Impulsni transformatori i njihova primena u energetskim pretvaračkim kolima

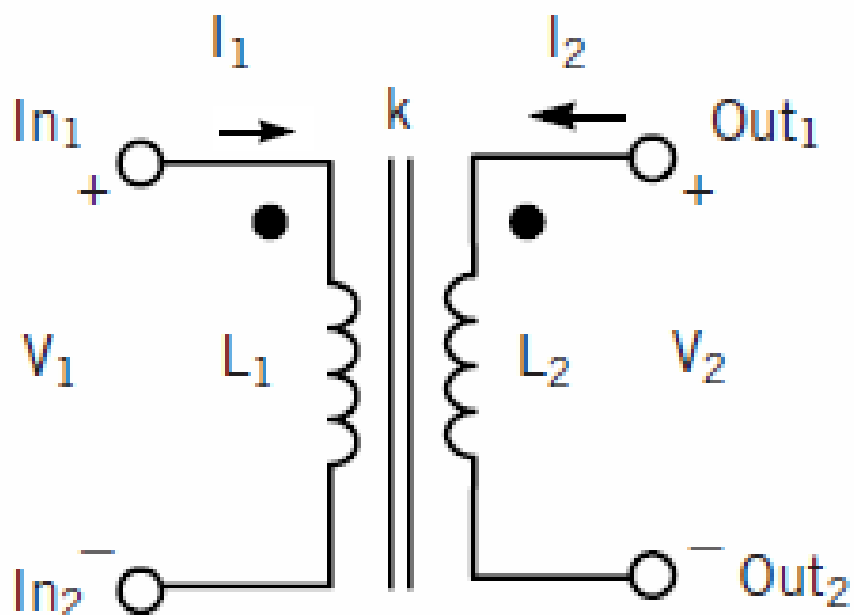


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović. dipl.el.ing.

# UVOD

- U projektovanju elektroenergetskih pretvarača i njihovih pripadajućih upravljačkih sklopova transformatori se veoma često koriste za prenos snage (do 100kW), kao naponski ili strujni delitelji u mernim kolima, a ponekada za prilagođenje impedanse ili kao impulsni u pobudni kolima energetskih prekidača (do max 10W).
- U energetskej elektronici i visokofrekventnim energetskim pretvaračima transformatori obično sadrže dva ili više induktivno spregnuta namotaja (kalema), koji su okruženi magnetnim jezgrom (najčešće feritnim).
- Sprega među namotajima nije nikada savršena
- SPICE modeli za spregnute kalemove koriste koeficijent sprege- $k$  kao parametar
- SPICE model takođe uzima u obzir sopstvene induktivnosti, namotaja, kao i međusobne induktivnosti koje su posledica magnetne sprege.
- Kod neidealnih (realnih) transformatora, problem odrediti koeficijent sprege- $k$ .
- U predavanju će biti dat praktični model transformatora, kao i njegovo poređenje sa SPICE modelom
- U predavanju će biti predstavljeni primeri impulsnih transformatora za prenos snage (do 100kW) i impulsnih transformatora malih snaga (do 10W) za prenos pobudnih impulsa energetskih prkidača

# SPICE model idealnog (savršenog) transformatora



## Naponske jednačine:

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2$$

$$V_2 = j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2$$

$$M = k(L_1 L_2)^{1/2}$$

**Napomena:** Međusobna induktivnost se uzima sa znakom „+“ obzirom da je usvojeni referentni smerovi struja  $I_1$  i  $I_2$  takvi, da obe ulaze u označene tačke( drugim rečima, fluksevi koji potiču od ovih struja se sabiraju)

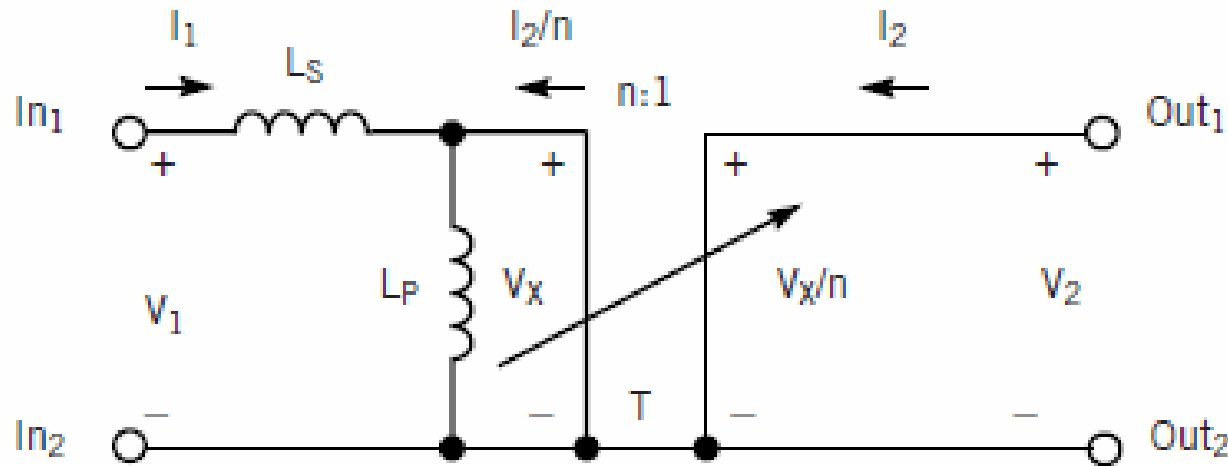
$L_1$ -induktivnost primara

$L_2$ -induktivnost sekundara

$M$ -međusobna induktivnost

$k$ -koeficijent sprege

# Nesavršeni transformator



$L_s$ -rasipna induktivnost  
 $L_p$ -induktivnost  
magnećenja  
 $n$ -prenosni odnos

## Naponske jednačine:

$$V_1 = j\omega(L_s + L_p) I_1 + j\omega L_p \frac{I_2}{n}$$

$$V_2 = j\omega \frac{L_p}{n} I_1 + j\omega \frac{L_p}{n^2} I_2$$

# Poređenje jednačina idealnog i neidealnog transformatora

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2$$

$$V_2 = j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2$$

$$M = k(L_1 L_2)^{1/2}$$

$$L_1 = L_S + L_P$$

$$L_2 = \frac{L_P}{n^2}$$

$$V_1 = j\omega (L_S + L_P) I_1 + j\omega L_P \frac{I_2}{n}$$

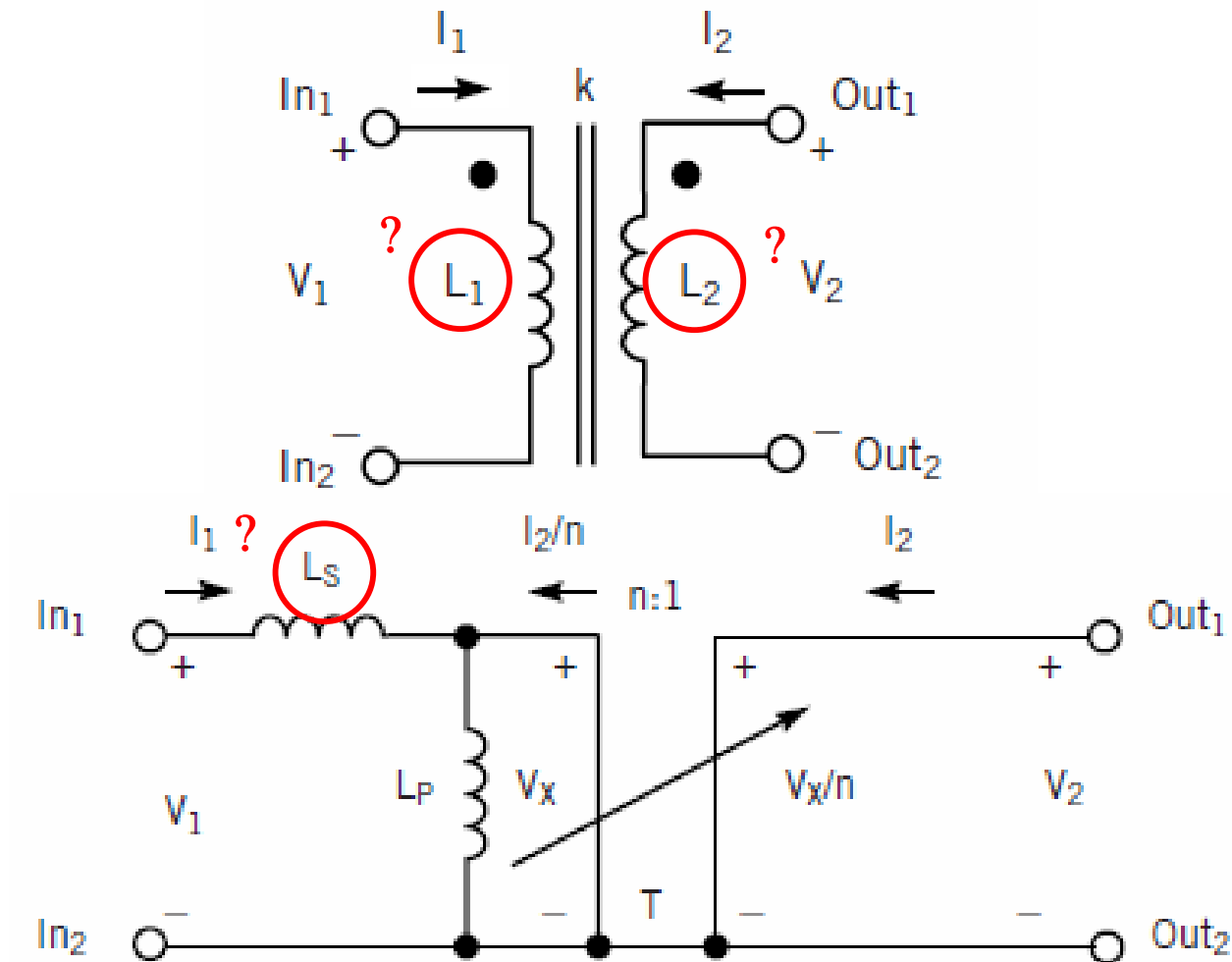
$$V_2 = j\omega \frac{L_P}{n} I_1 + j\omega \frac{L_P}{n^2} I_2$$

**AKO ZNAMO  $L_S$  i  $L_P$  onda možemo jednostavno odrediti koeficijent sprege!!!**

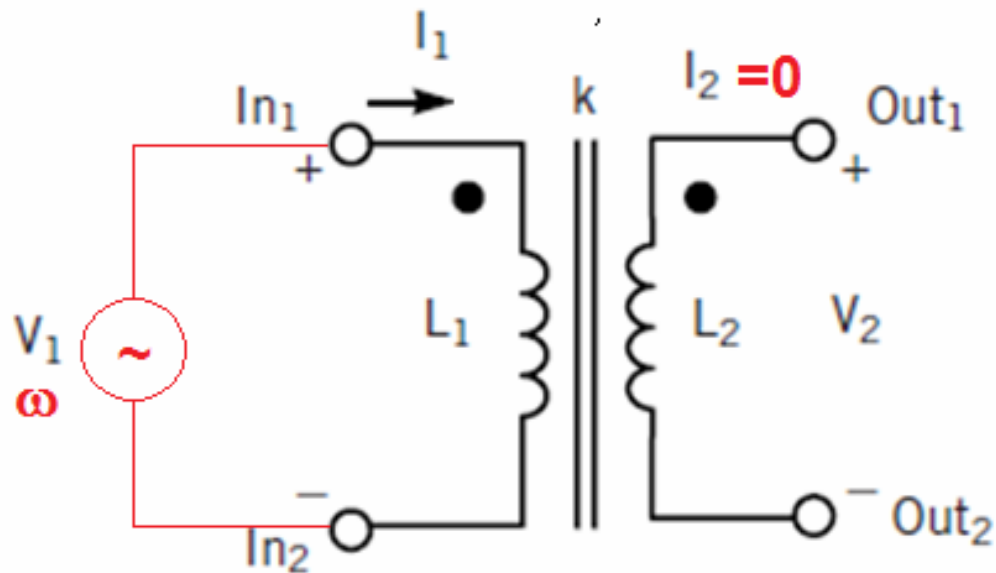
$$L_S = L_P \left( \frac{1}{k^2} - 1 \right)$$

$$n = k \left( \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right)$$

# Šta zapravo predstavljaju $L_1$ , $L_2$ i $L_s$ ?

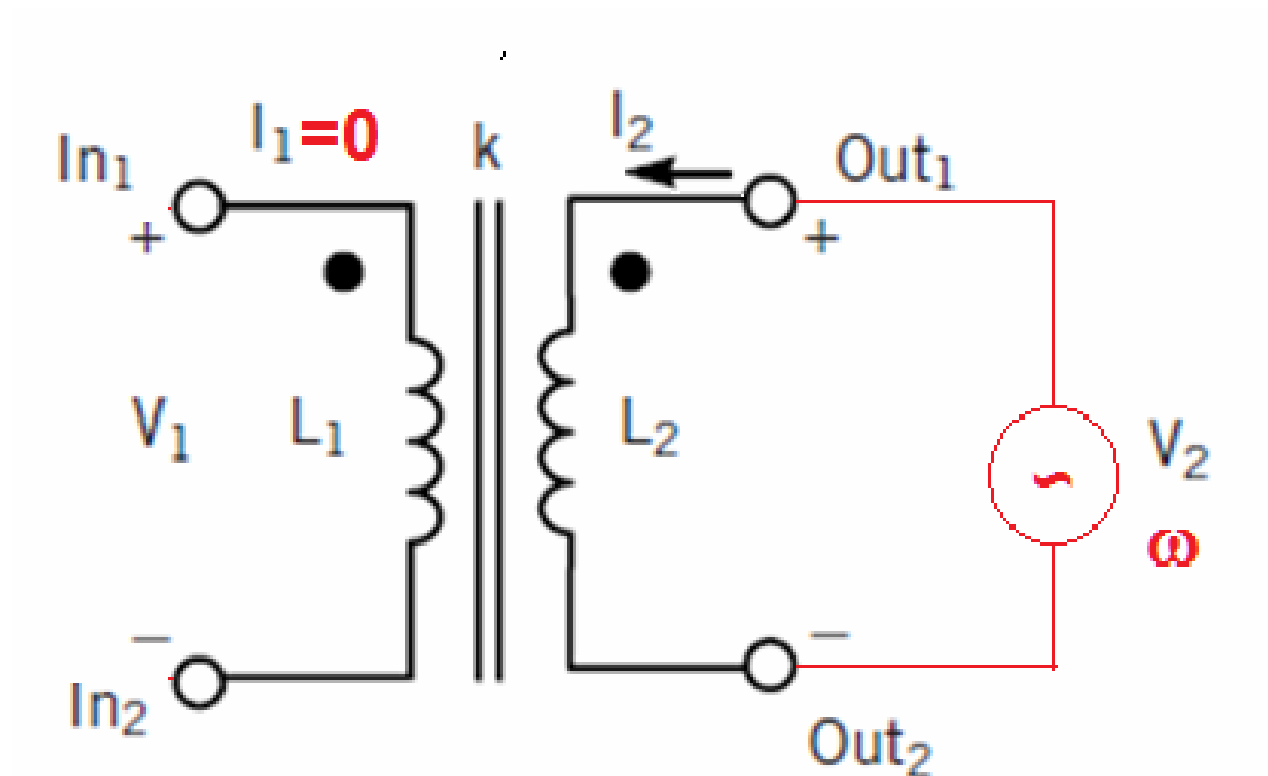


## Određivanje $L_1$ :



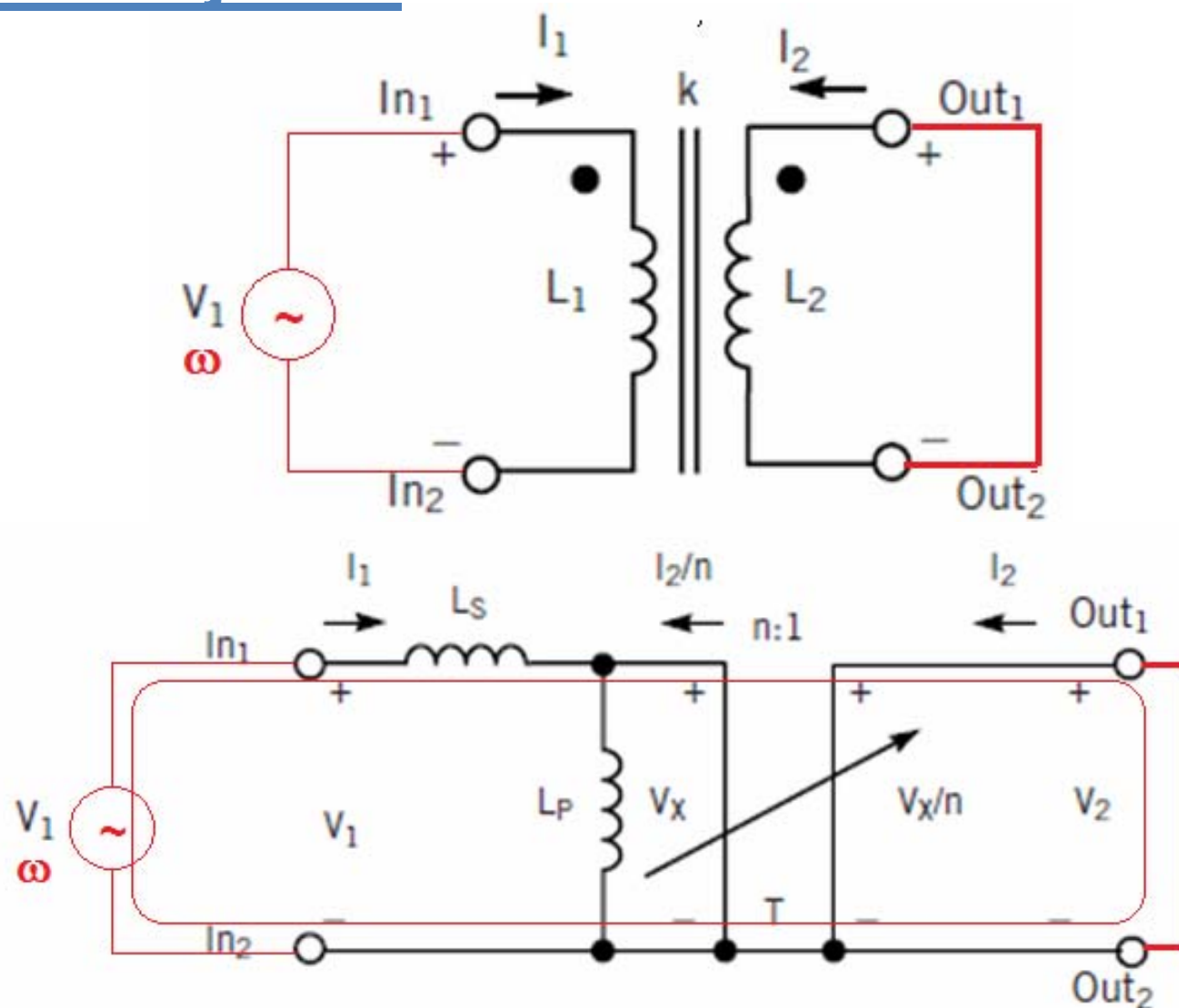
$L_1$  je induktivnost izmerena pri radnoj učestanosti  $\omega$ , napona  $V_1$  između krajeva  $In_1$  i  $In_2$ , pri čemu su krajevi  $Out_1$  i  $Out_2$  otvoreni (prazan hod na strani „2“)

## Određivanje $L_2$ :



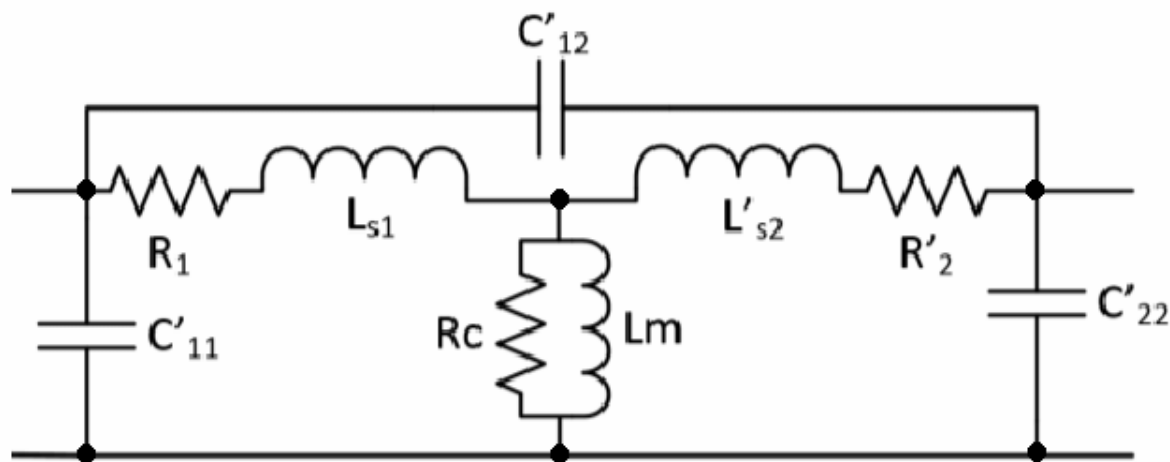
$L_2$  je induktivnost izmerena pri radnoj učestanosti  $\omega$ , napona  $V_2$  između krajeva  $Out_1$  i  $Out_2$ , pri čemu su krajevi  $In_1$  i  $In_2$  otvoreni (prazan hod na strani „1“)

## Određivanje $L_s$ :

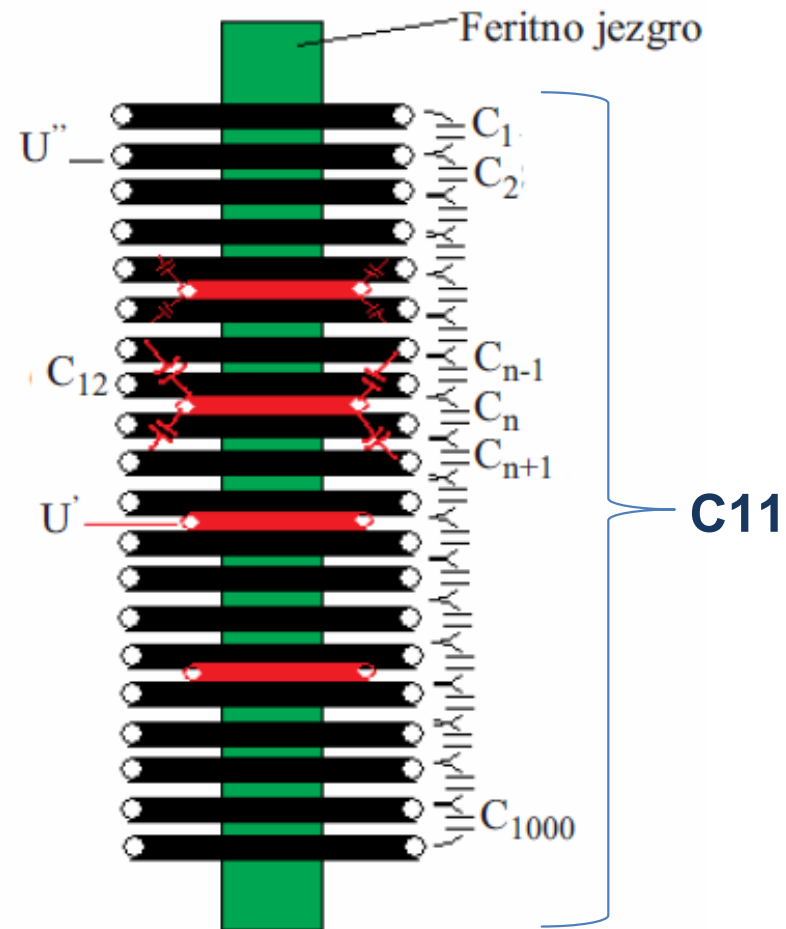
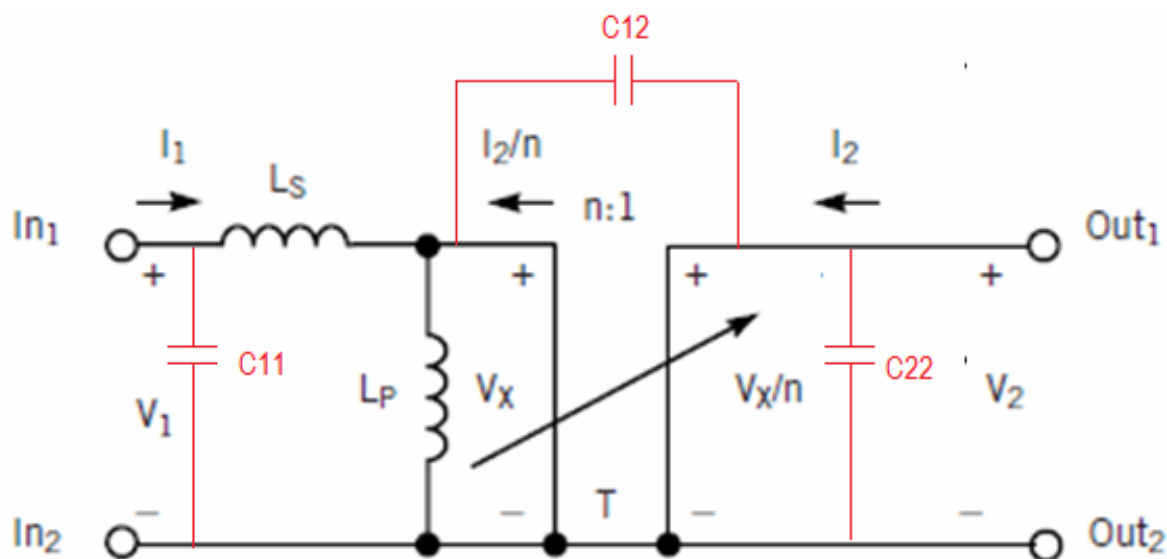


$L_s$  je induktivnost merena pri radnoj učestanosti  $\omega$ , napona  $V_1$  između priključaka  $In_1$  i  $In_2$  kada su krajevi  $Out_1$  i  $Out_2$  kratko spojeni

# REALNI TRANSFORMATOR :



Parazitne kapacitivnosti:  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{22}$

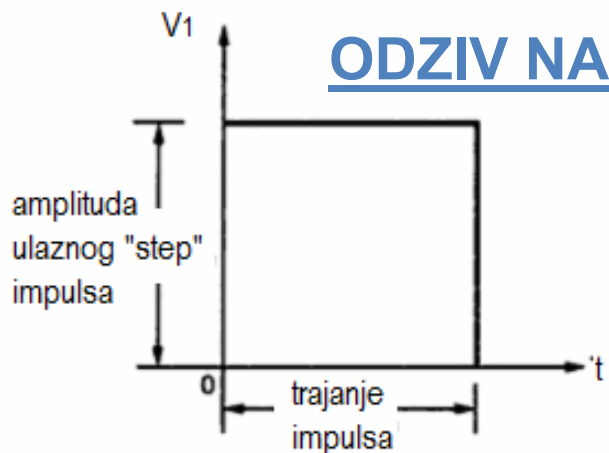


$C_{11}$  i  $C_{12}$  su sopstvene kapacitivnosti namotaja (posledica kapacitivnosti između zavojsa)

$C_{12}$ -Međusobna kapacitivnost (primar-sekundar)

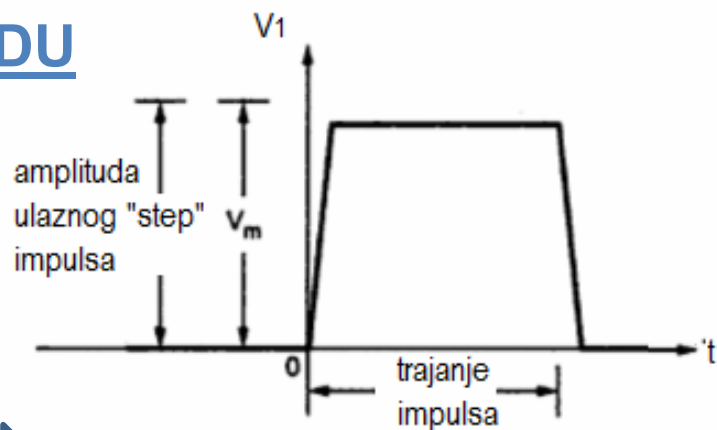
**U praksi su dominantne  $C_{11}$  i  $C_{22}$  i one su raspodeljene !!!**

# ODZIV NA STEP POBUDU



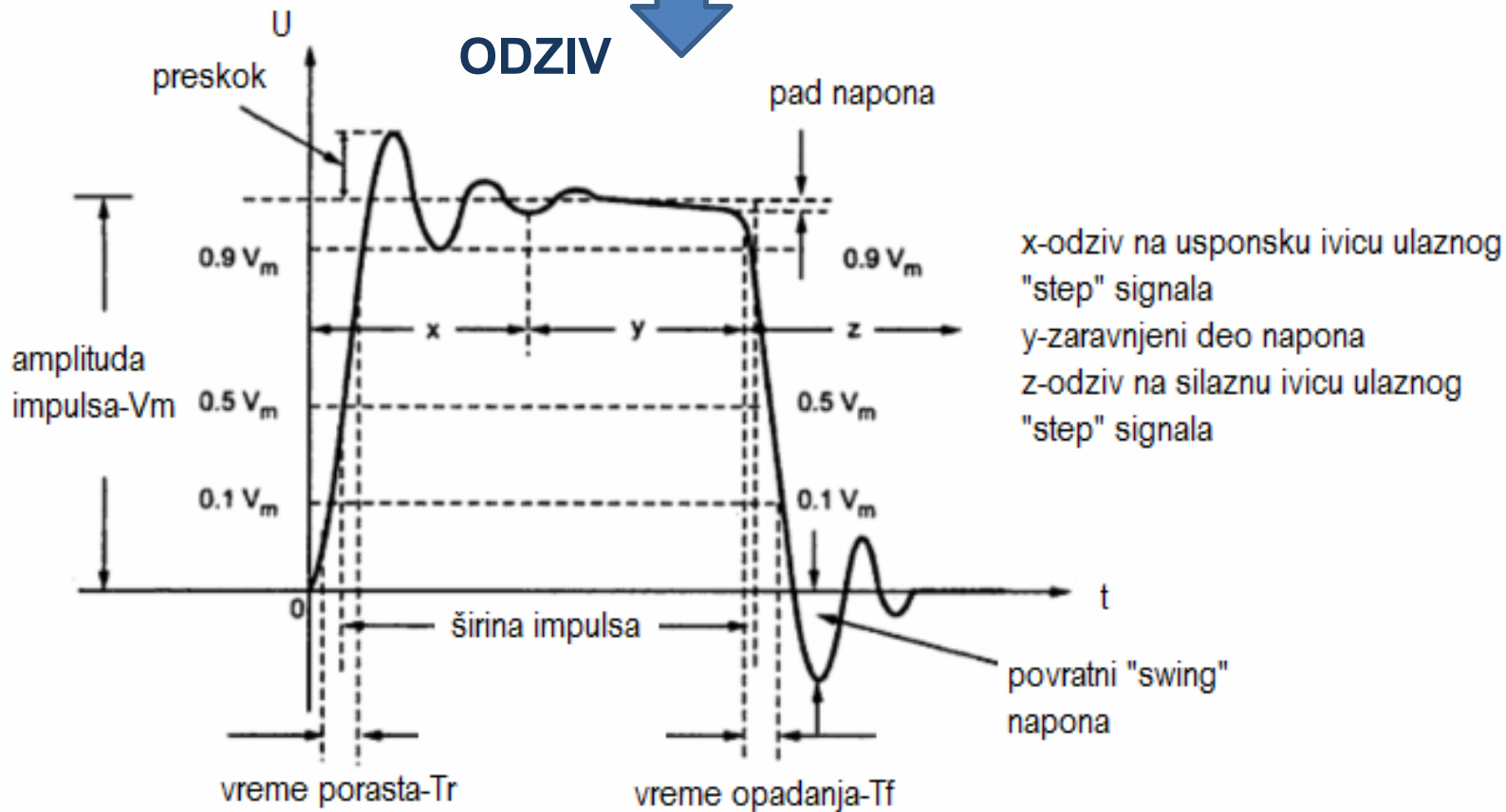
Hevisajdov impuls

iii



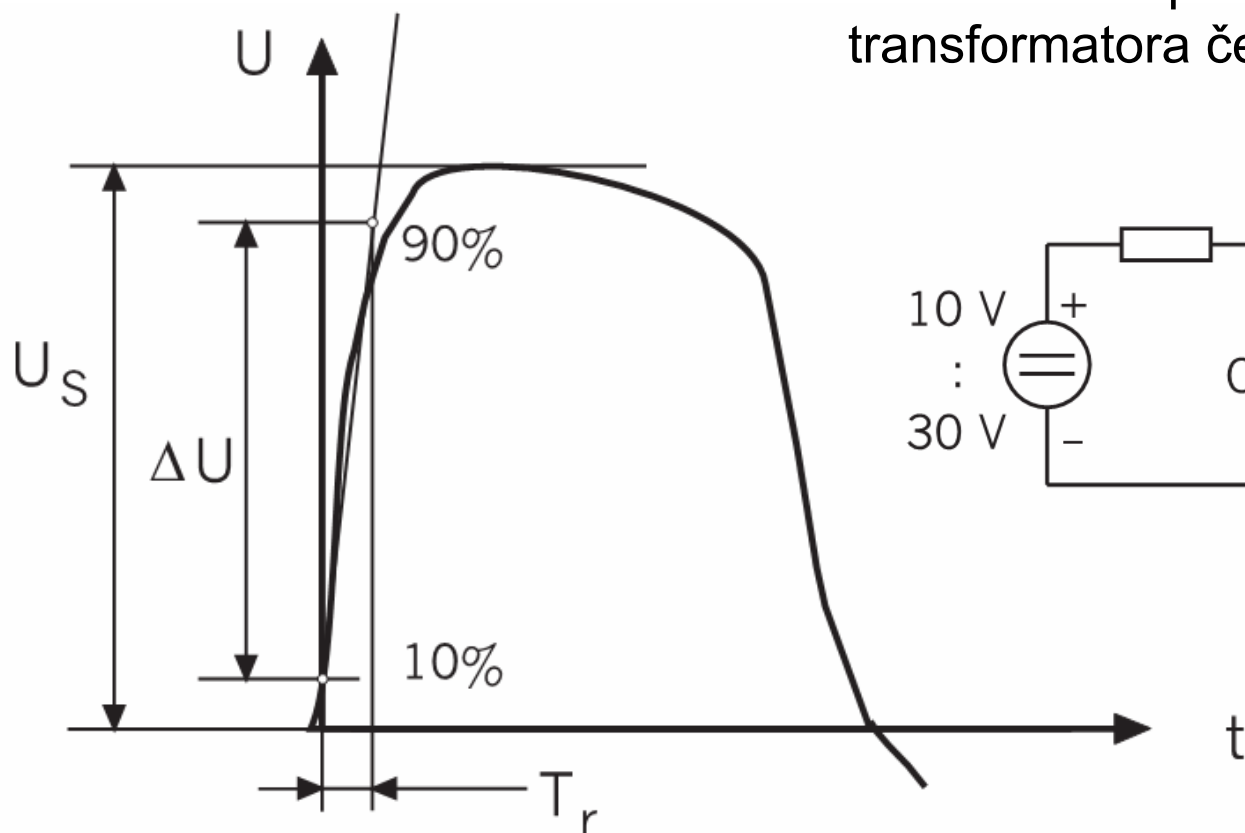
kvazi Hevisajdov impuls

**ODZIV**



## DEFINICIJA VREMENA PORASTA - $T_r$

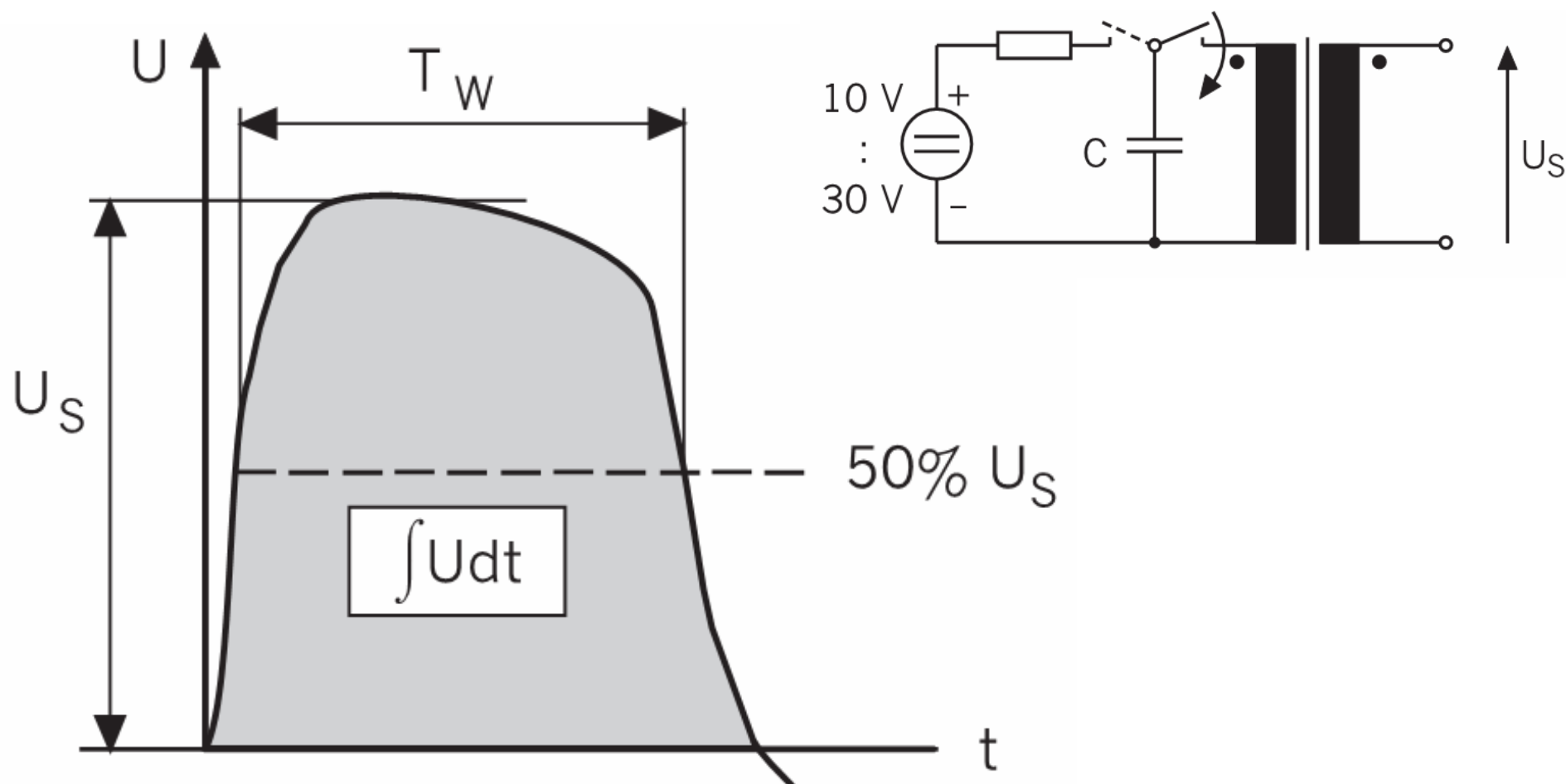
U katalogima proizvođača impulsnih transformatora često se sreće ovaj podatak



Ovaj vremenski interval odgovara porastu napona  $\Delta U$  u opsegu od  $10\%U_S$  -  $90\%U_S$

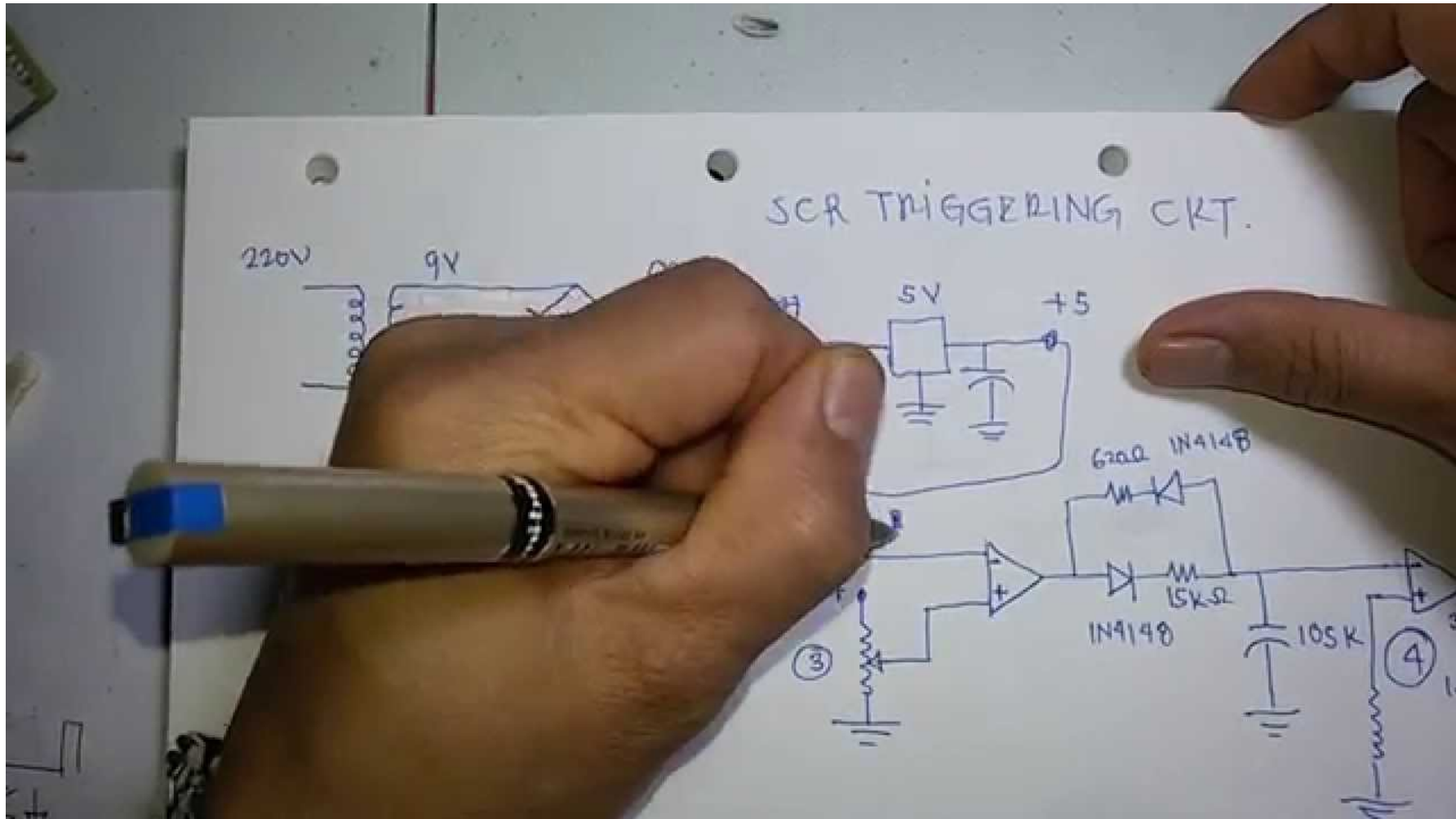
$U_S$  - amplituda naponskog signala

## DEFINICIJA PARAMETRA FLUKSA/ Volt-sekundi [V·s]

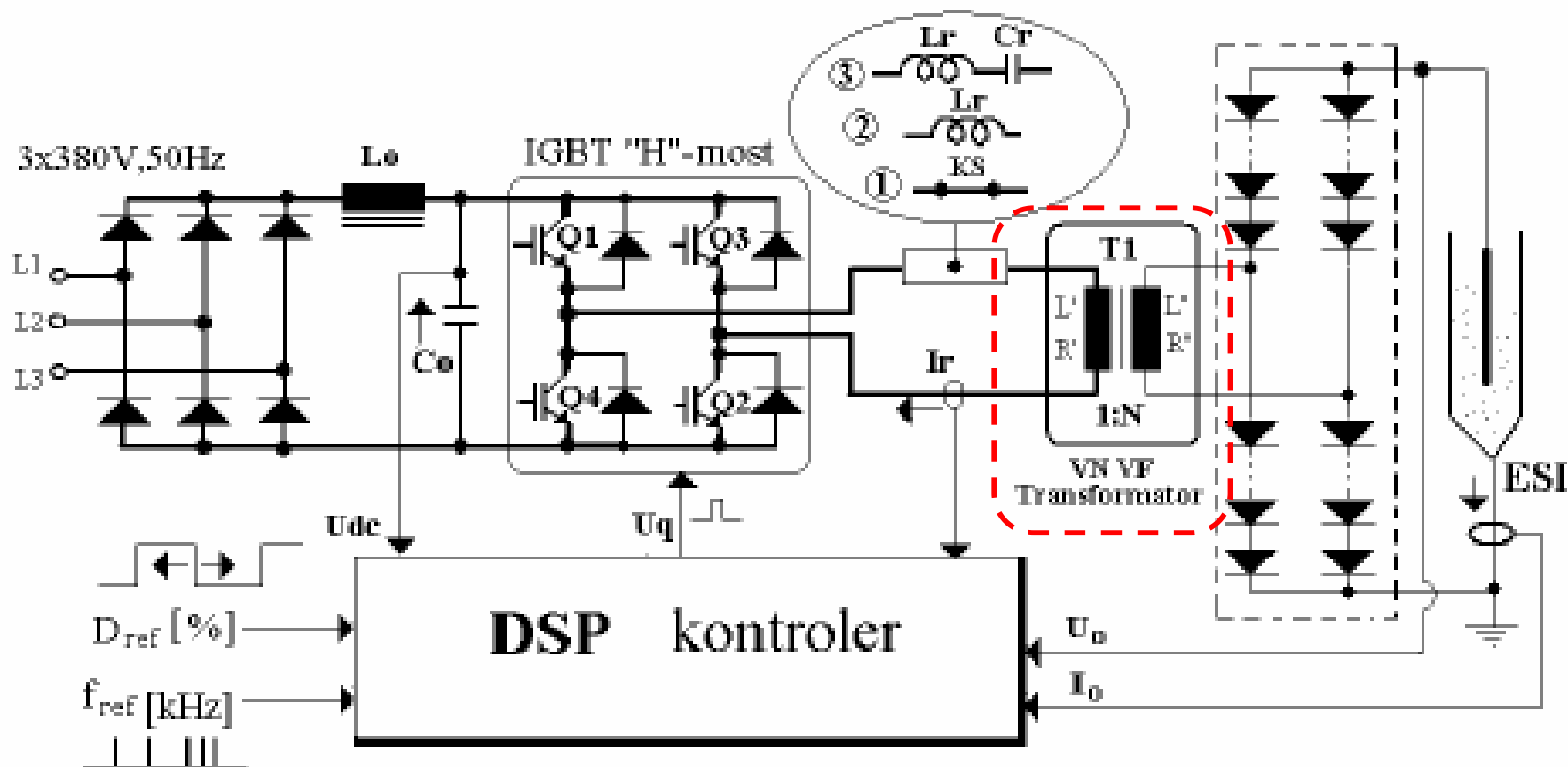


Integral “V·s” je proizvod visine i širine impulsa, meren pri 50% od  $U_S$ . Integral “V·s” je meren na sekundarnoj strani transformatora u intervalu kada su njegovi krajevi na sekundaru otvoreni (prazan hod).

# PRAKTIČNI PRIMERI



# PRIMER 1: VN VF transformator snage 70kVA

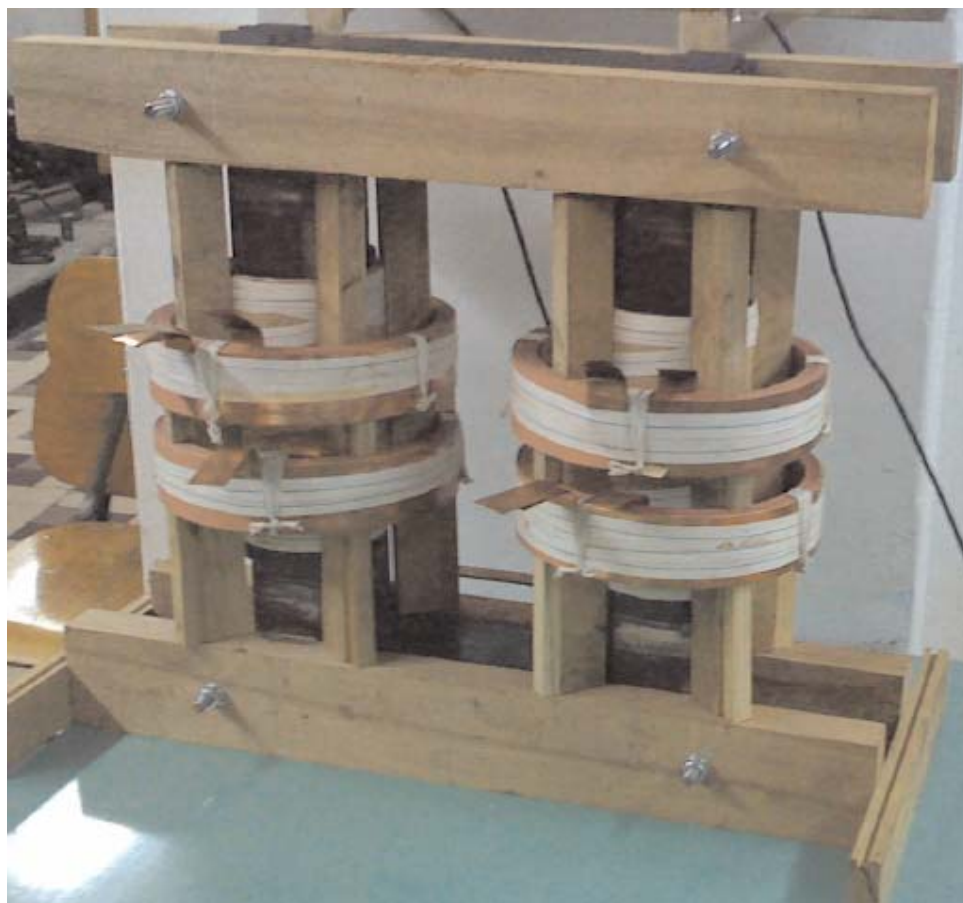


**Visokofrekventni izvor napajanja za pobudu Elektro Statičnih Izdvažača(ESI)**

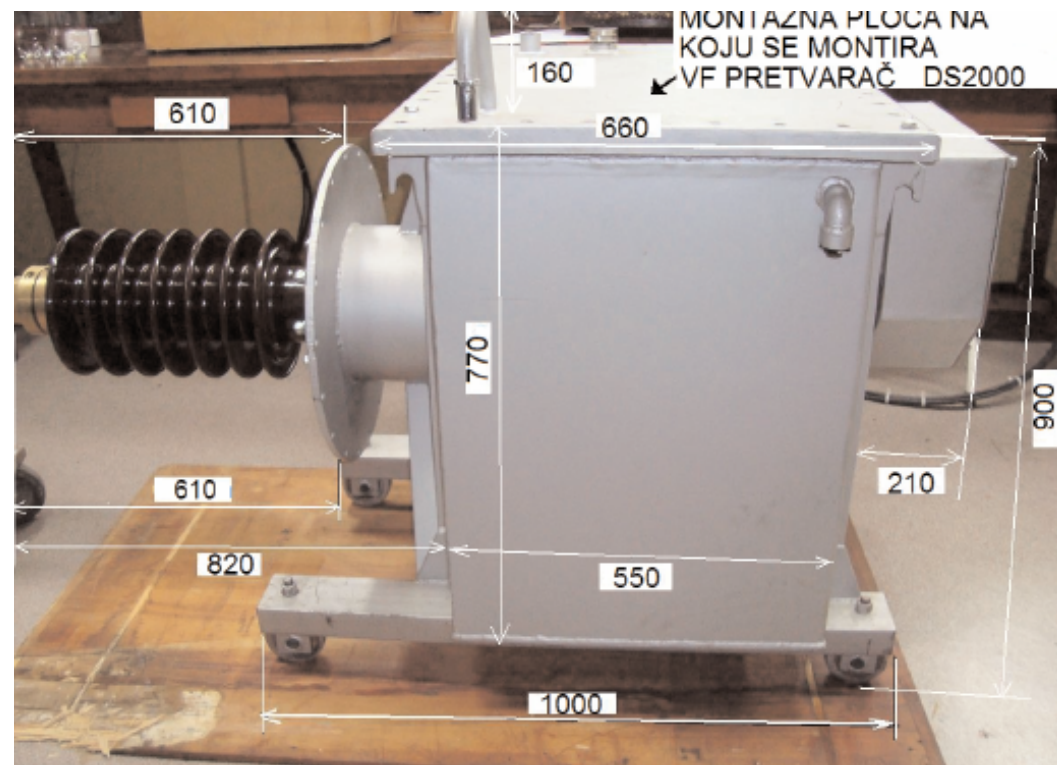
-Ključna komponenta VN VF transformator 0.4kV/70kV, snage 70kVA, 10KHz

**\*VN VF** (Visoko Naponski Visoko Frekventni)

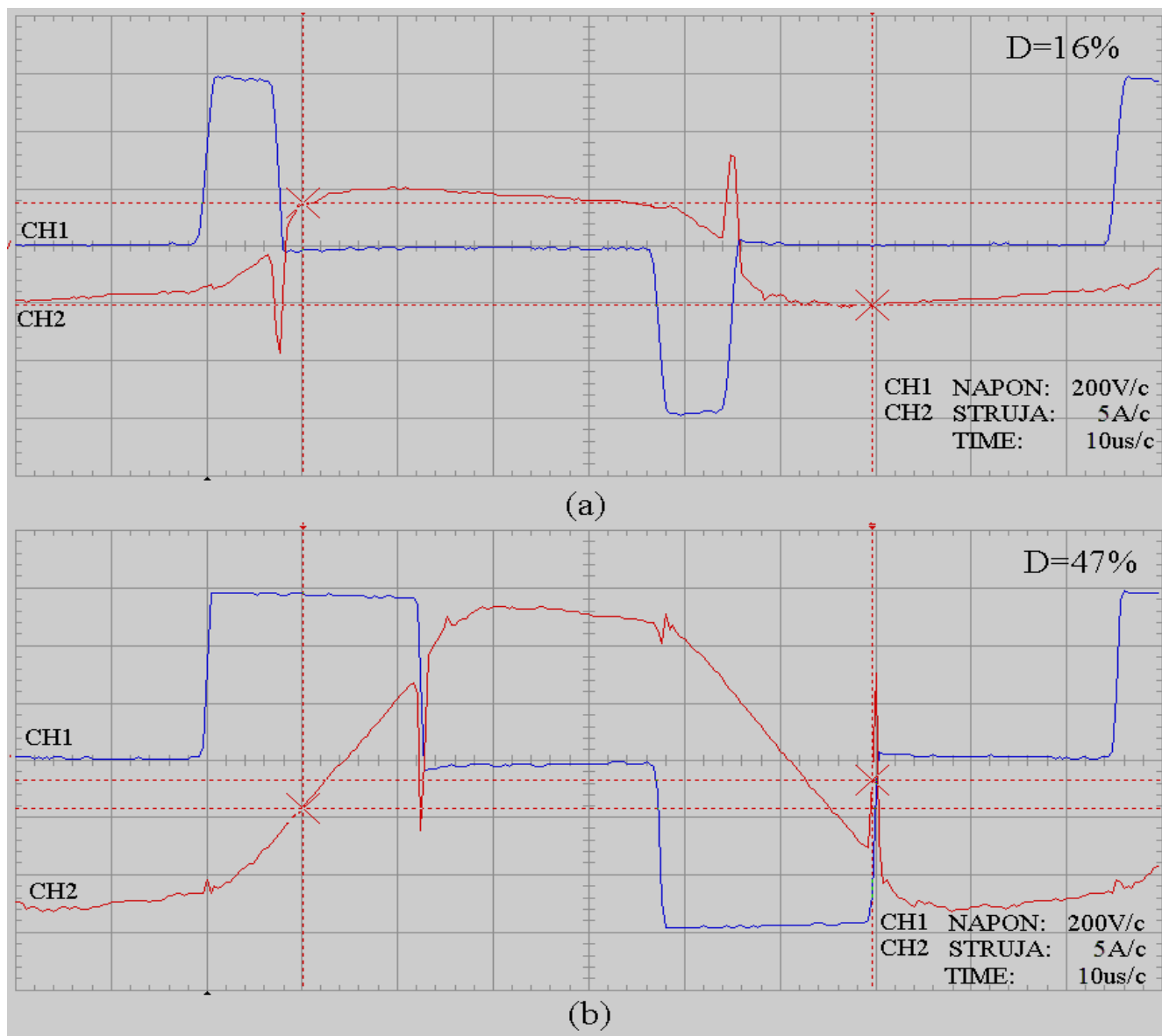
## Izgled i dimenzije VN VF transformatora snage 70kVA



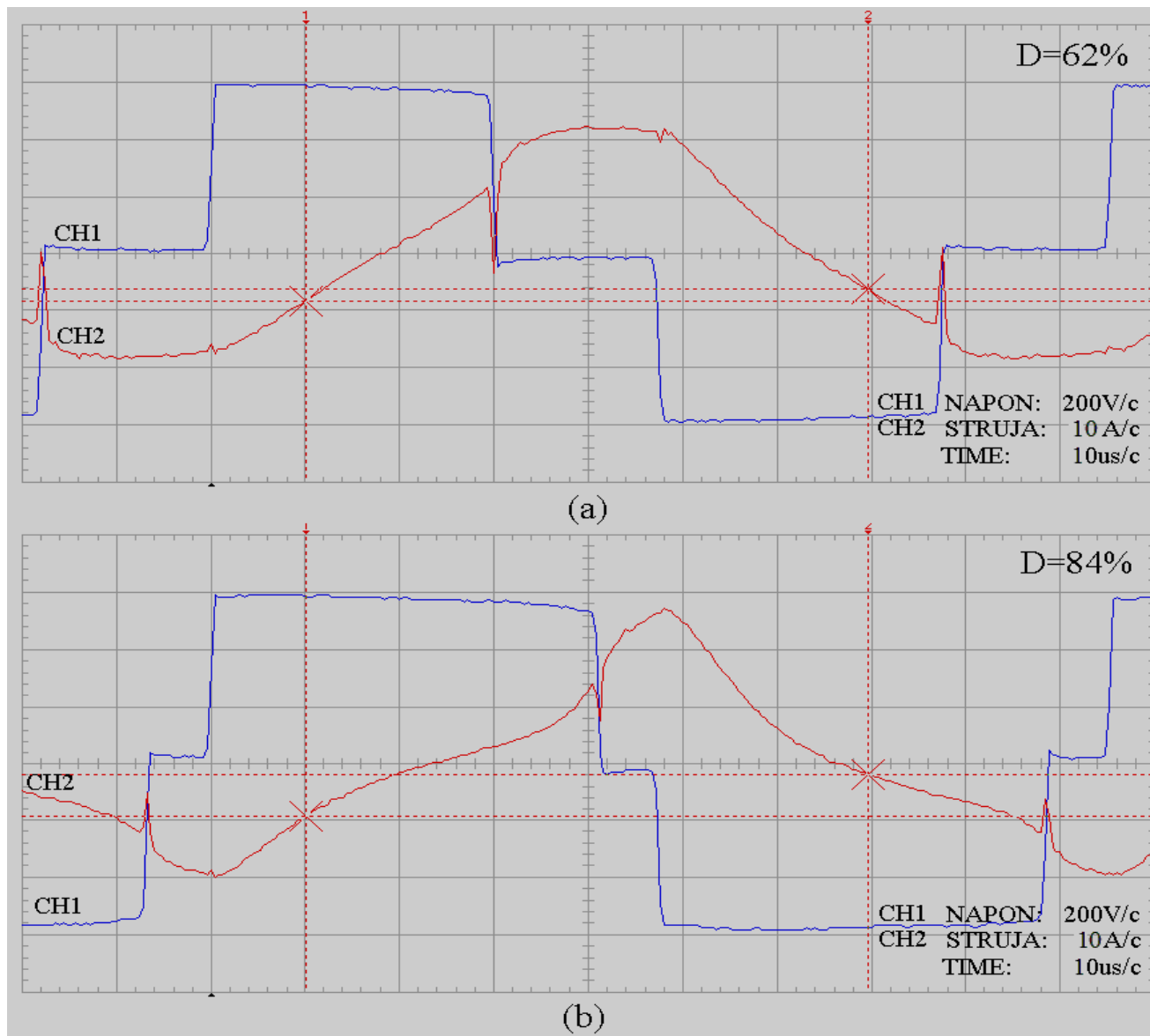
Izgled VN VF transformatora 0.4/100kV; 70kW, 10KHz, pre stavljanja u izolacioni medijum (transf. ulje)



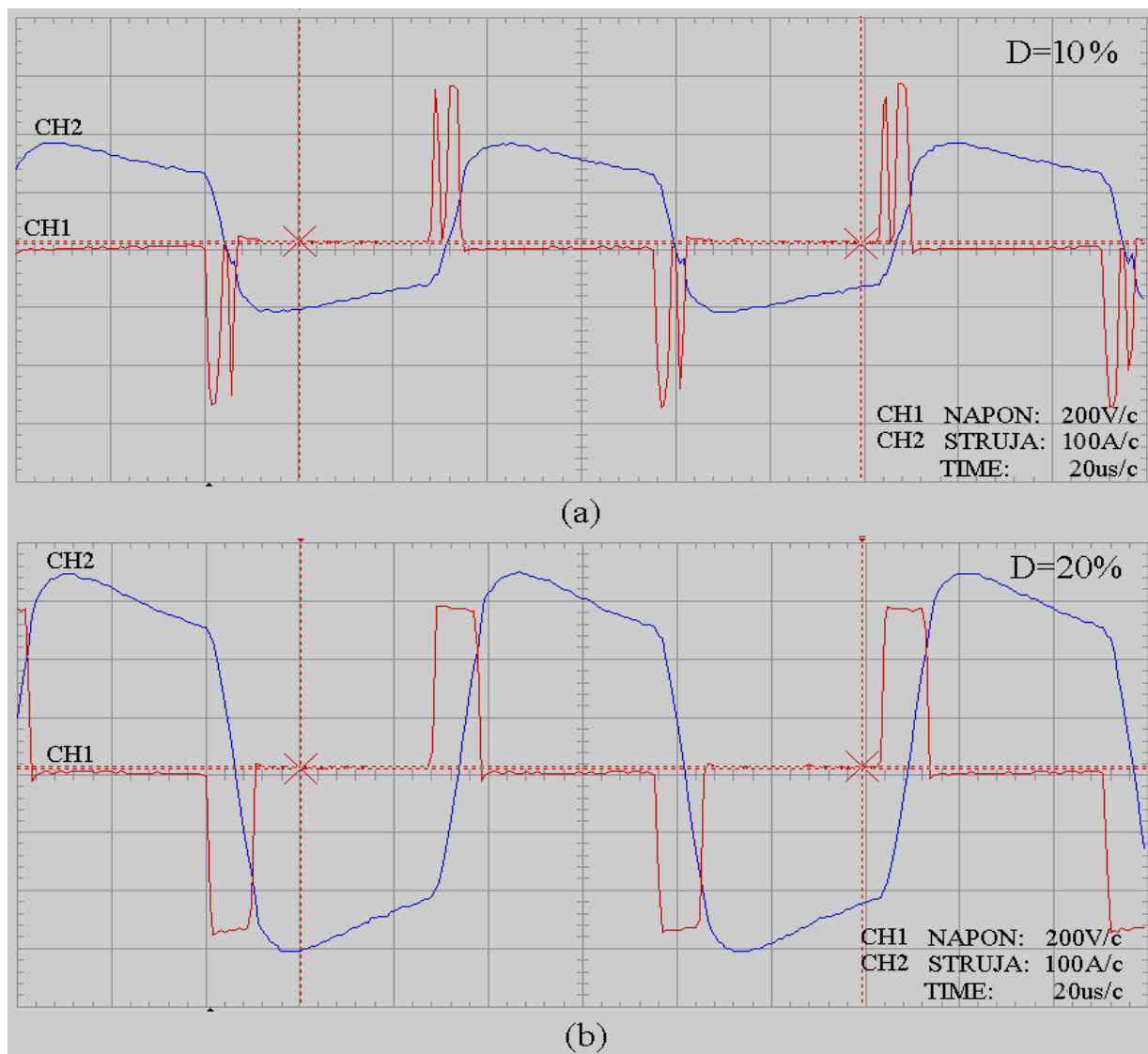
VN VF transformator+ispravljač ugrađeni u sudu  
-Snaga VN VF transformatora 70kVA



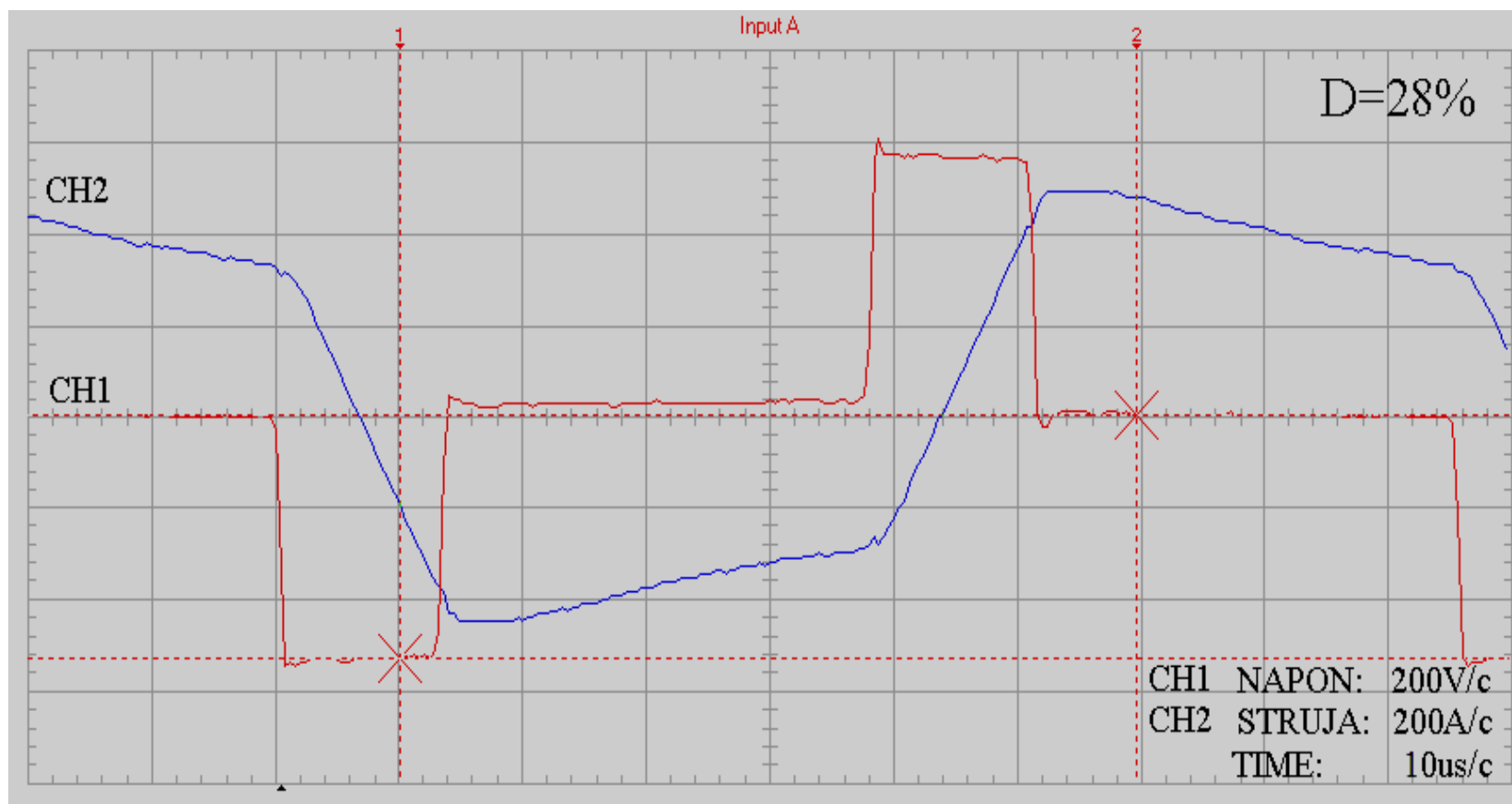
Ogled praznog hoda pri pobudnoj učestanosti 10kHz,  
(a)  $D=16\%$  , (b)  $D=47\%$



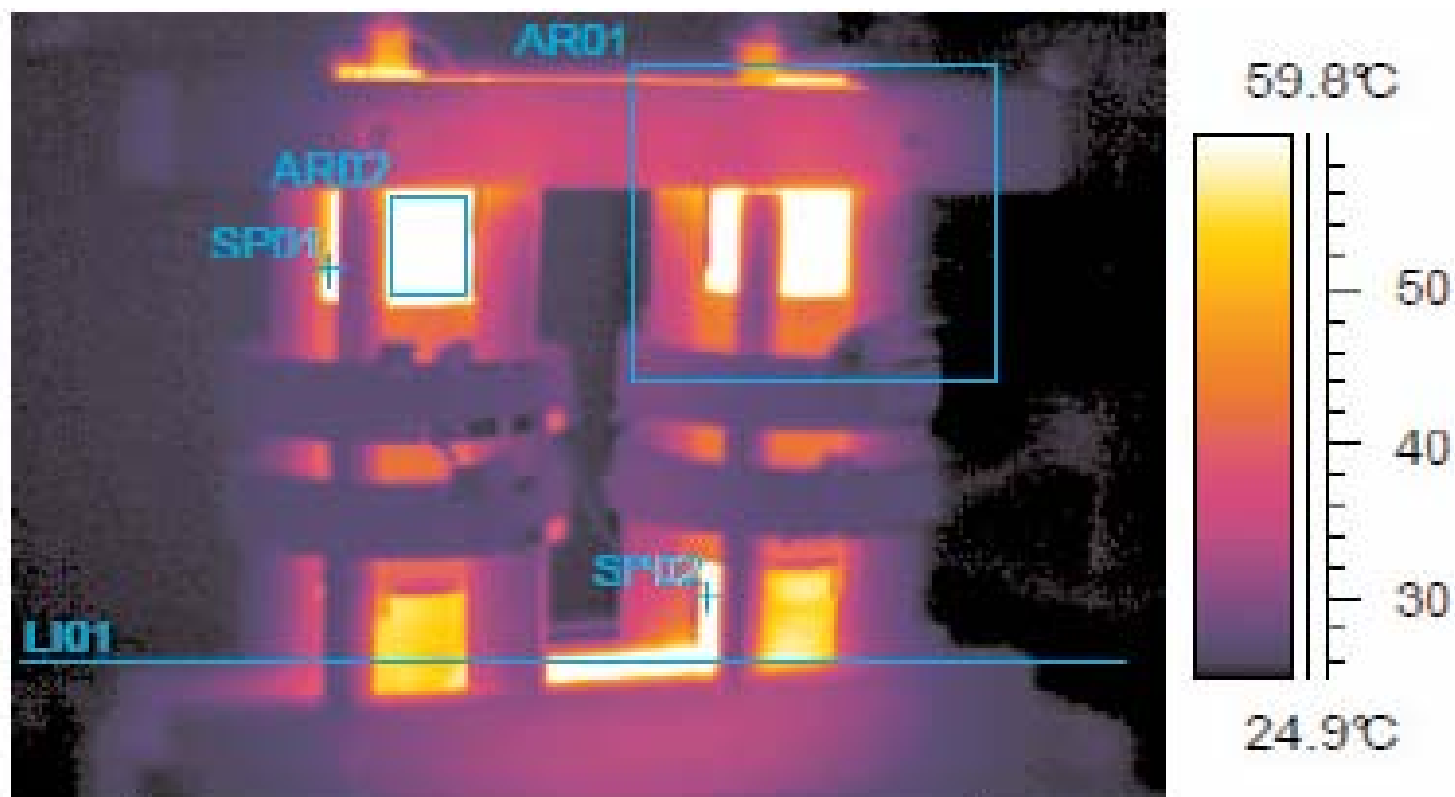
Ogled praznog hoda;  $f=10\text{kHz}$ , (a)  $D=62\%$  , (b)  $D=84\%$



Ogled kratkog spoja;  $f=10\text{kHz}$ , (a)  $D=11\%$  , (b)  $D=20\%$



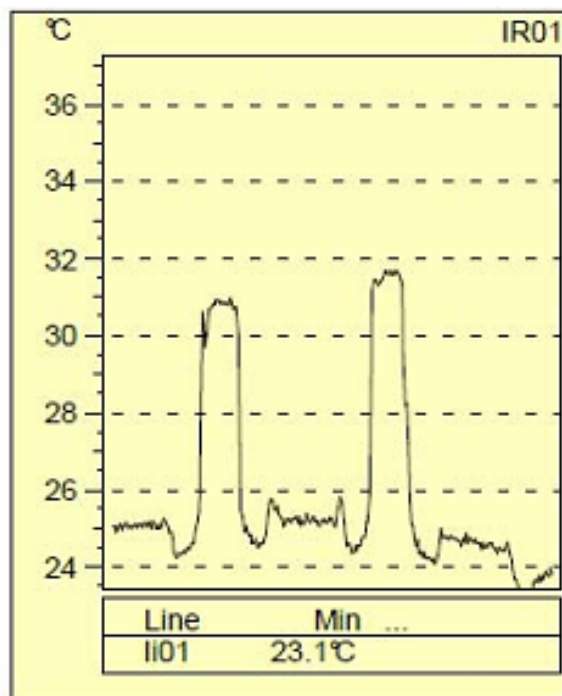
Ogled kratkog spoja ;  $f=10\text{kHz}$ ,  $D=28\%$



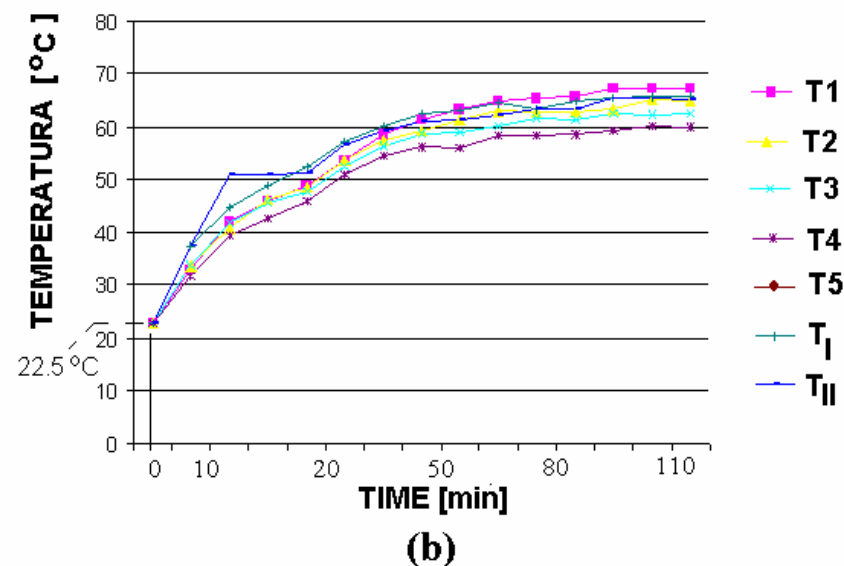
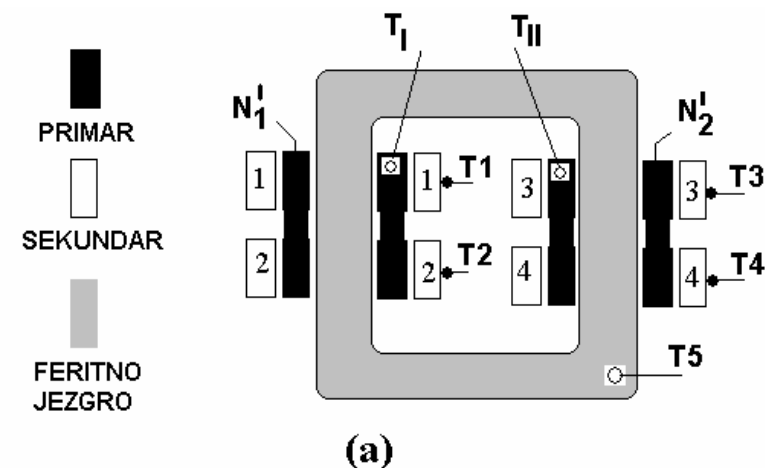
Object parameter	Value
Emissivity	0.95
Object distance	2.0 m
Ambient temperature	25.0°C

**Termovizijsko snimanje VNVF transformatora 70kVA  
nakon 3h rada u praznom hodu;**

TIME: 02. 05. 2009, 13 h, 50 min



Label	Value	Diff temp
SP01	32.4°C	*
SP02	36.3°C	*
SP03	24.4°C	*
SP04	32.2°C	*
LI01 : max	31.7°C	304.8°C
LI01 : min	23.1°C	296.3°C
LI01 : avg	25.8°C	298.9°C
LI01: stdev	2.4°C	-
AR01 : max	32.4°C	305.5°C
AR01 : min	24.2°C	297.4°C
AR01 : avg	25.9°C	299.0°C
AR01: stdev	2.1°C	-



**Merenje porasta temperature karakterističnih tačaka VNVF transformatora;**

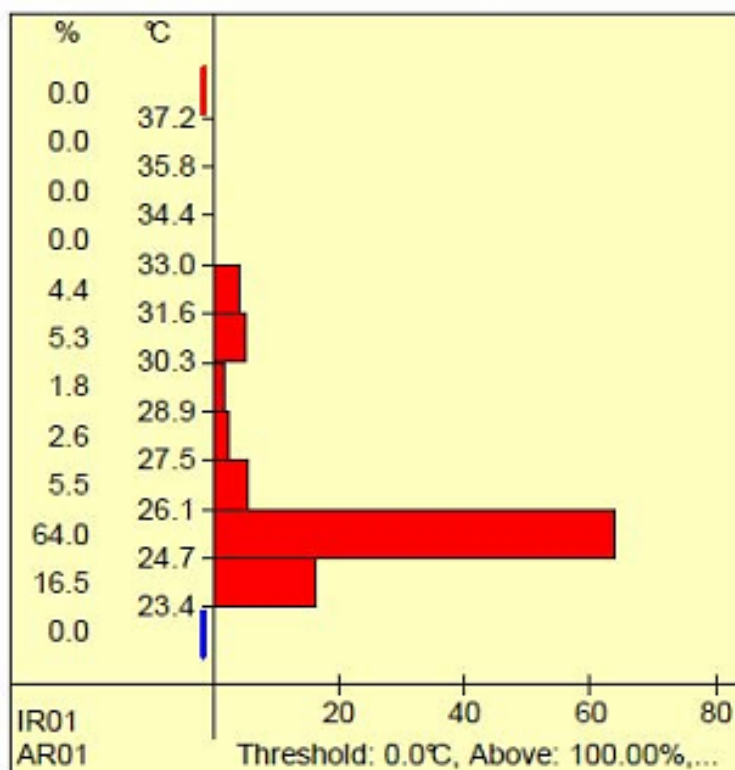
(a)-raspored mernih tačaka,

(b)-porast temperature pojedinih tačaka

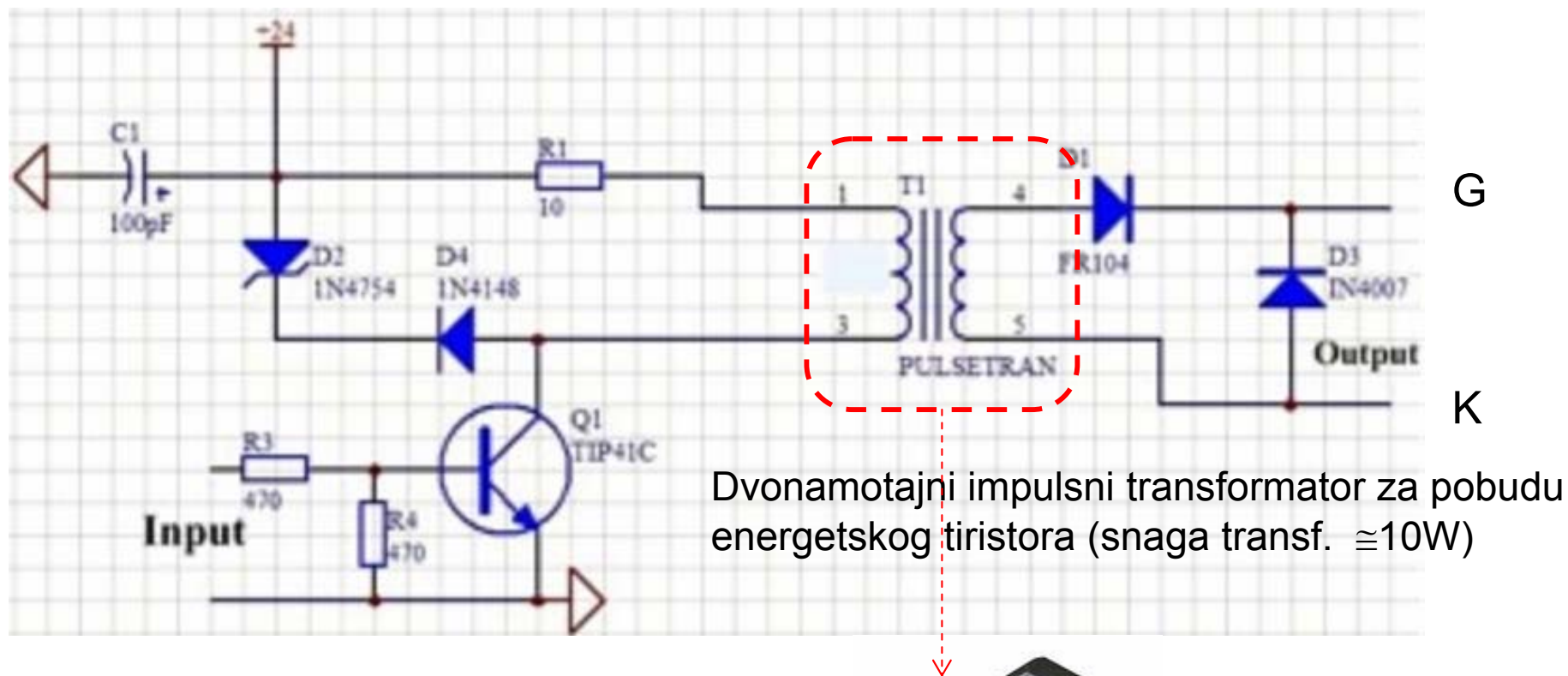
(c) –rezultati termovizije

TIME: 10h50min

(c)



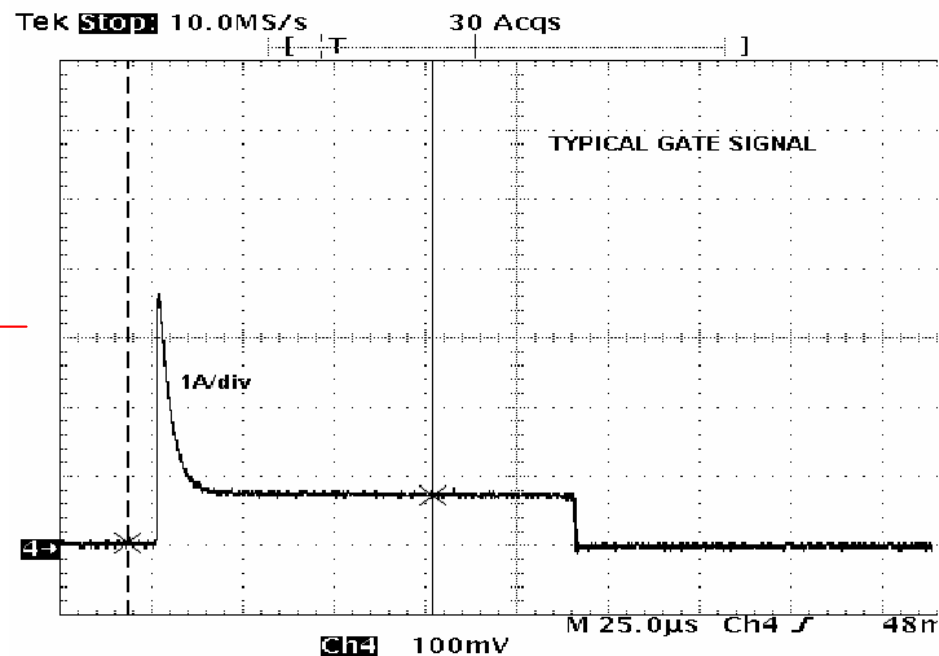
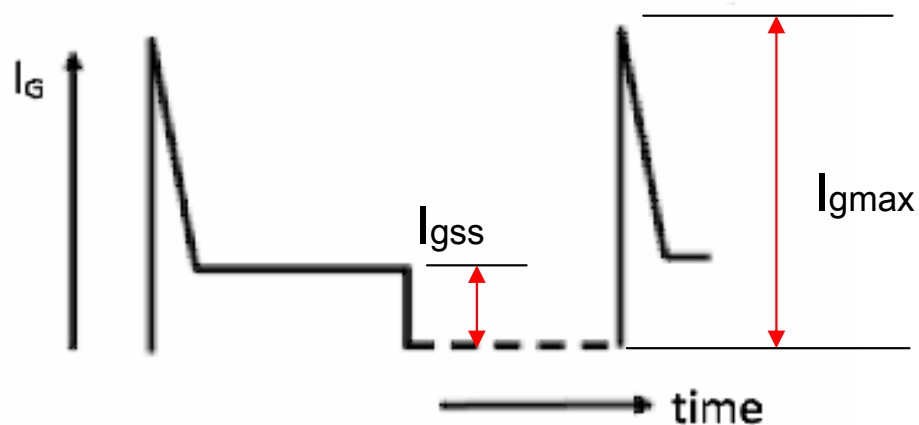
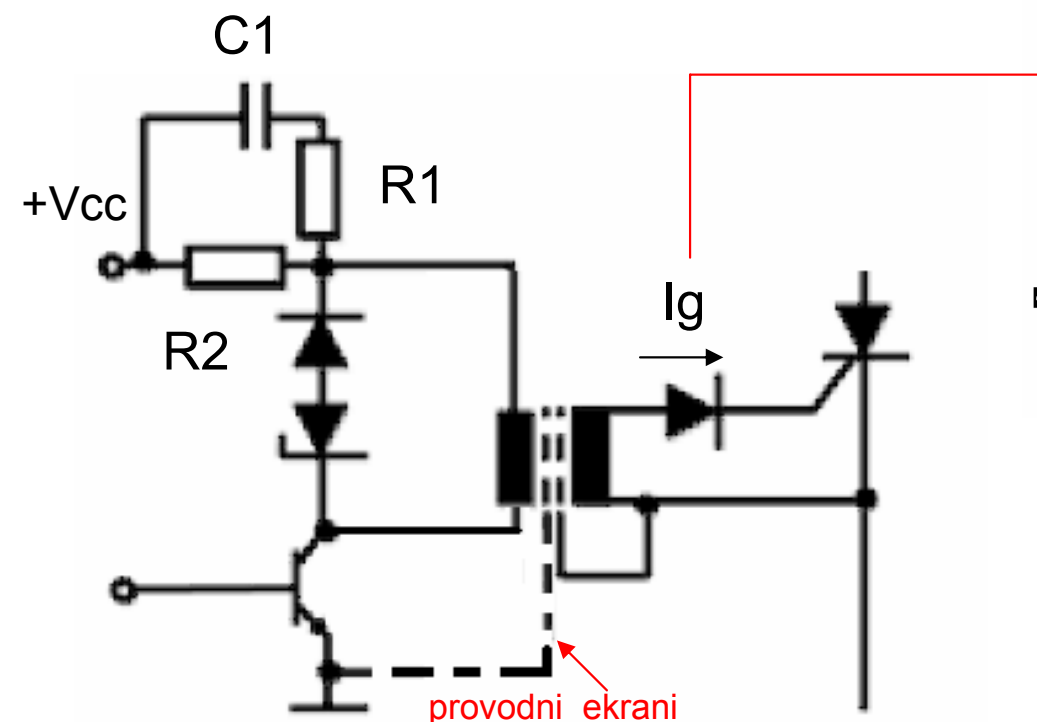
## PRIMER 2: Impulsni transformator snage 10VA



Dvonamotajni impulsni transformator  
(jedan primar i jedan sekundar)



# TIPIČNO POBUDNO TIRISTORSKO KOLO

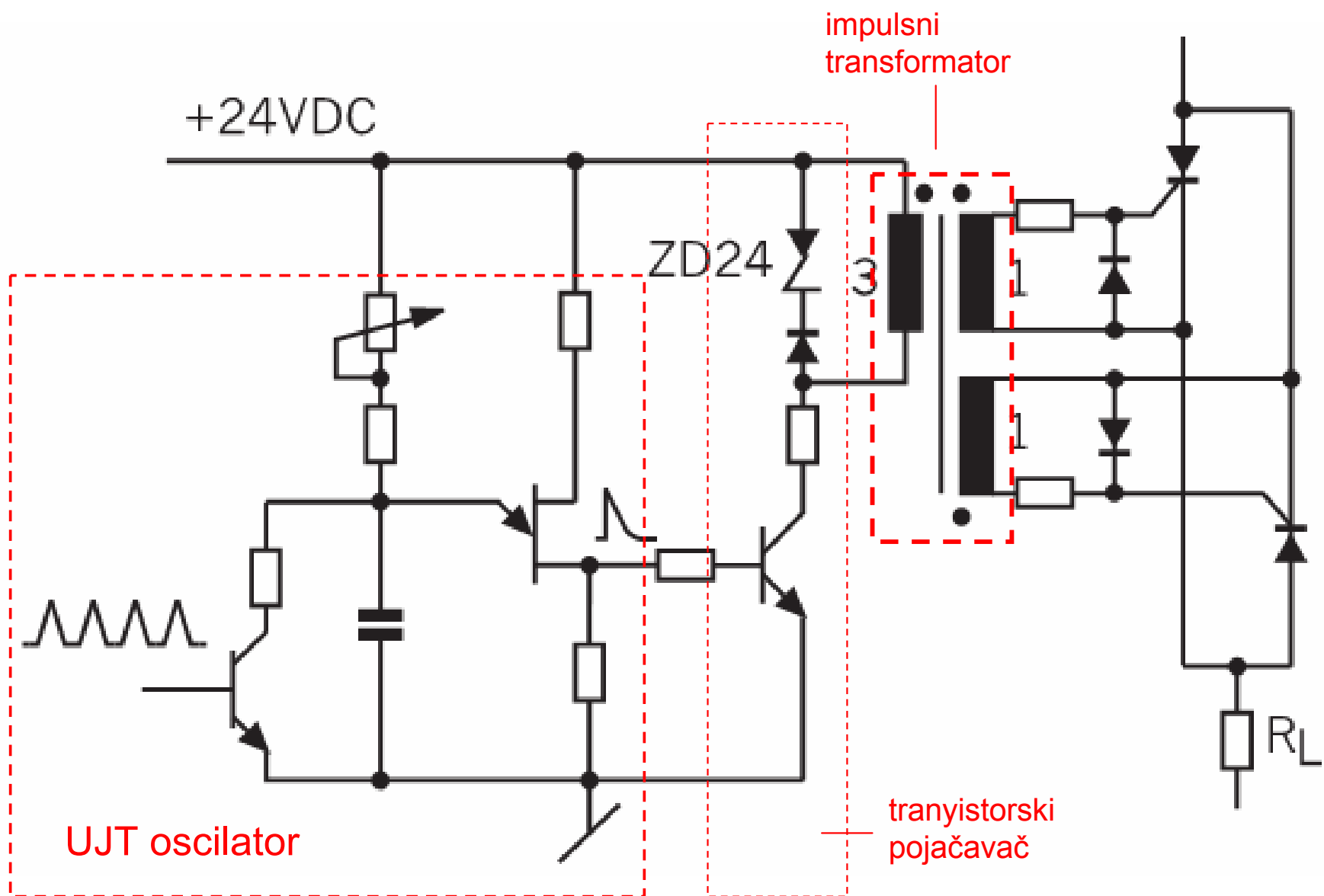


Osciloskopski snimak karakterističnog pobudnog impulsa struje geja energetskog tiristora

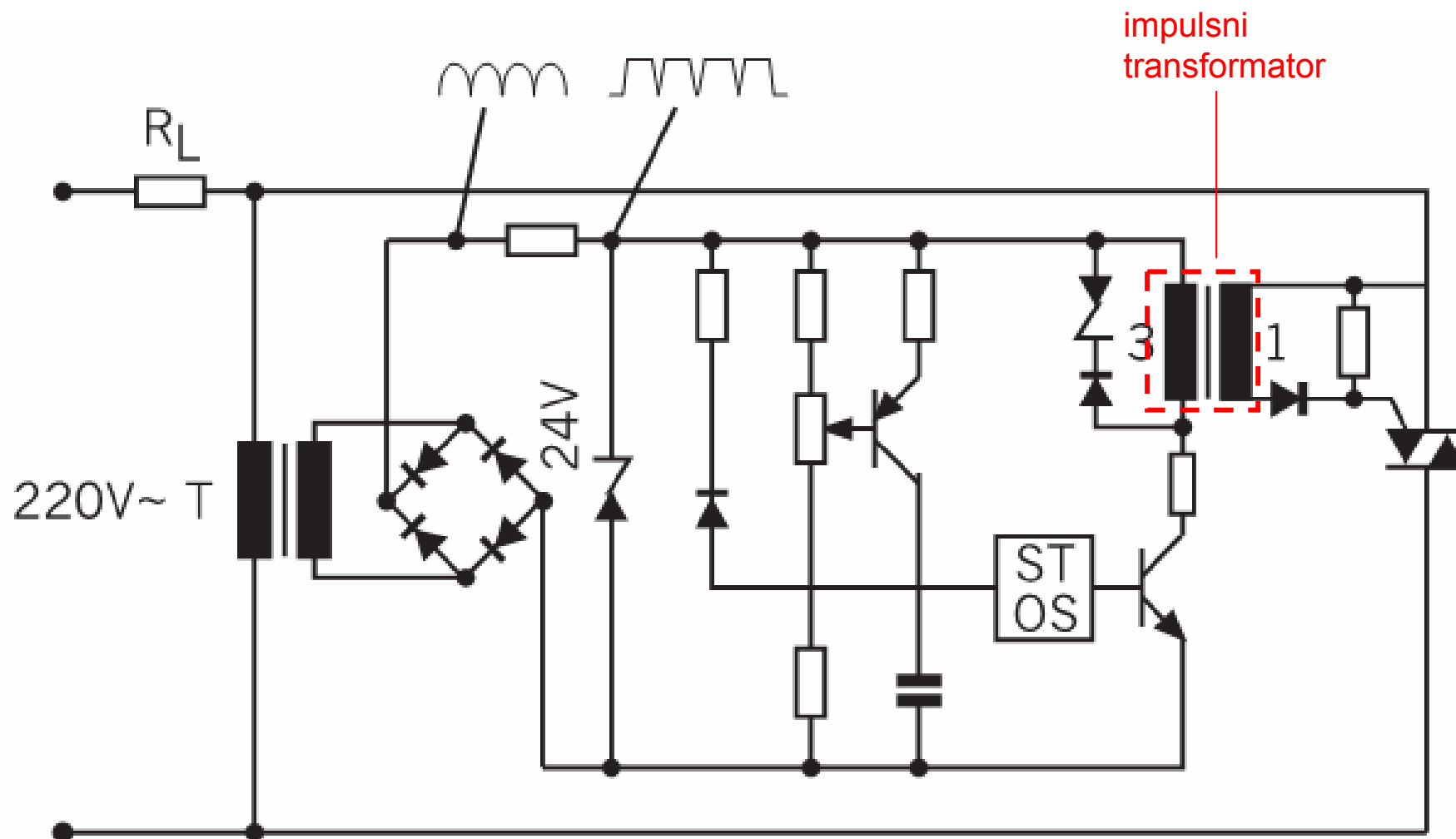
Karakteristične vrednosti struja:

$$I_{gmax} = V_{cc}/R_1$$

$$I_{gss} = V_{cc}/R_2$$



Pobuda antiparalelne sprege tiristora preko tronamotajnog impulsnog transformatora (jedan primar i dva sekundara)



Pobuda trijaka preko dvonamotajnog impulsnog transformatora  
(jedan primar/jedan sekundar)

# Kataloški podaci za impulsni transformator za pobudna tiristorska kola



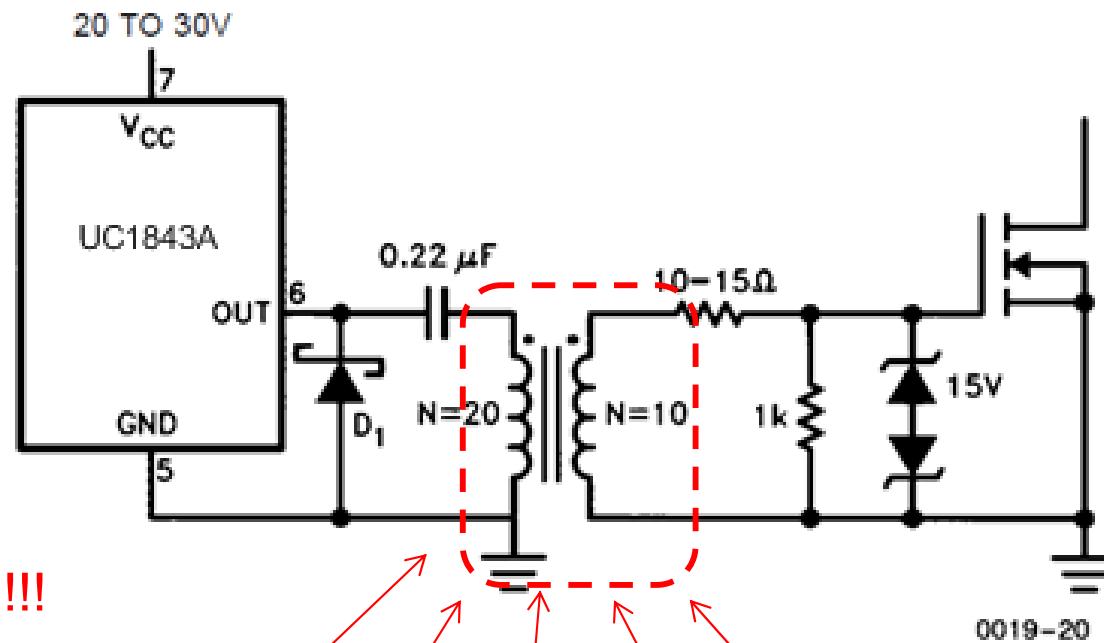
<b>Nominal operating voltage</b>	Up to 3000 V
<b>Operating frequency</b>	40 kHz max. 500 kHz max. for data transmission DC to 40000 Hz
<b>Ignition currents</b>	0.1 to 3 A @ 40°C
<b>Rise time</b>	0.3 to 2.3 $\mu$ s
<b>Test voltage</b>	Up/50 Hz/2 s max. according to VDE 110b
<b>Max. partial discharge voltage</b>	$1.5 \times U^{\text{nom}}$
<b>Temperature range (operation and storage)</b>	-25°C to +70°C (25/70/21)
<b>Flammability corresponding to</b>	UL 94 V-0 listed materials

Pulse transformer	Turns ratio	Ignition current lign [A]	Voltage		Voltage time area V0t [V $\mu$ s]	Rise time tr [ $\mu$ s]	Inductance*		Resistance		Coupling capacitance Ck [pF]	Input/ Output connections		Weight [g]
			Unom [V]	Up [kV]			Lp [mH]	Lstr [ $\mu$ H]	Rp [ $\Omega$ ]	Rs [ $\Omega$ ]				
IT 155	1:1	0.1	500	4	480	1	5	85	1.2	1.2	6	02		13
IT 245	1:1	0.1	750	4	500	1.2	8	100	1.48	1.48	10	02		6
IT 237	1:1	0.25	500	2.5	1100	1	25	35	1.9	2.2	50	02		14
IT 239	1:1	0.25	1000	6	300	2.3	3	80	0.9	0.9	5	02		13
IT 255	1:1	0.25	750	4	250	1.1	2.2	40	0.8	0.8	8	02		6
IT 258	1:1	1	750	3.2	250	0.25	2.5	3	0.62	0.75	80	02		6
IT 370	1:1	1	1000	5	4000	0.6	0.3	6	0.16	0.18	40	02		71
IT 364**	1:1	3	3000	8	5000	1.7	1.5	10	0.16	0.14	35		05	220
IT 246	2:1	0.1	750	4	200	0.4	7	35	2.1	1.1	7	02		6
IT 248	2:1	0.25	750	3.2	350	2.2	17	80	3.2	1.6	9	02		6
IT 260	3:1	0.1	500	3.2	200	0.3	12	30	2	0.8	8	02		6

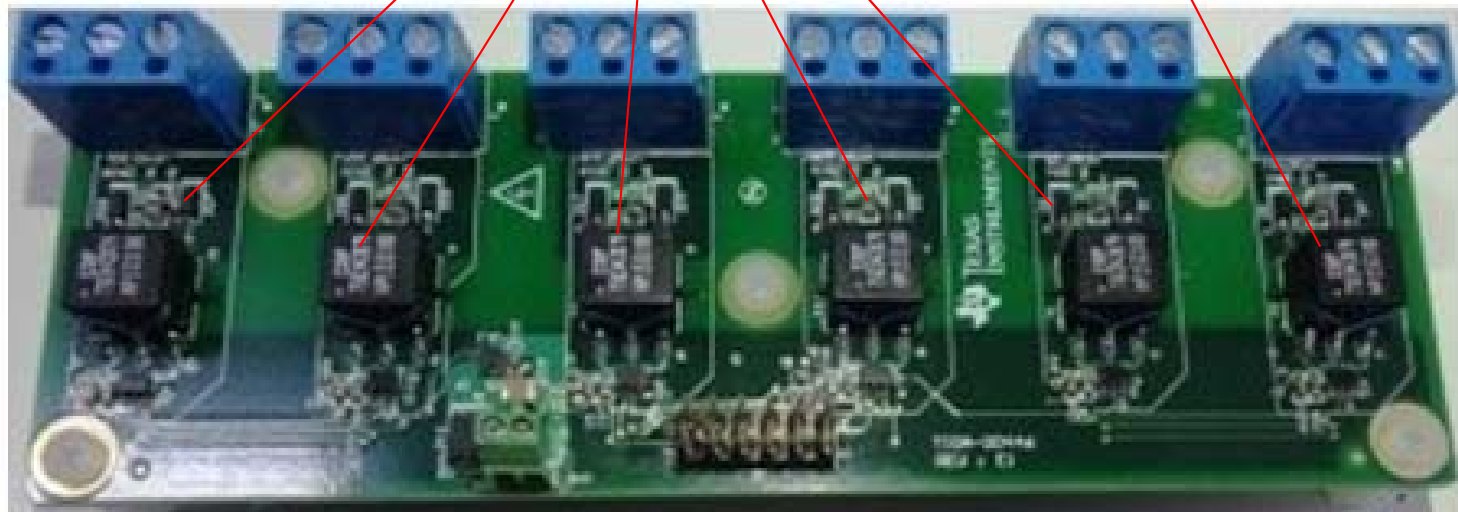
\* Tolerance: +50%; -30%

\*\* Not suitable for PCB-mounting.

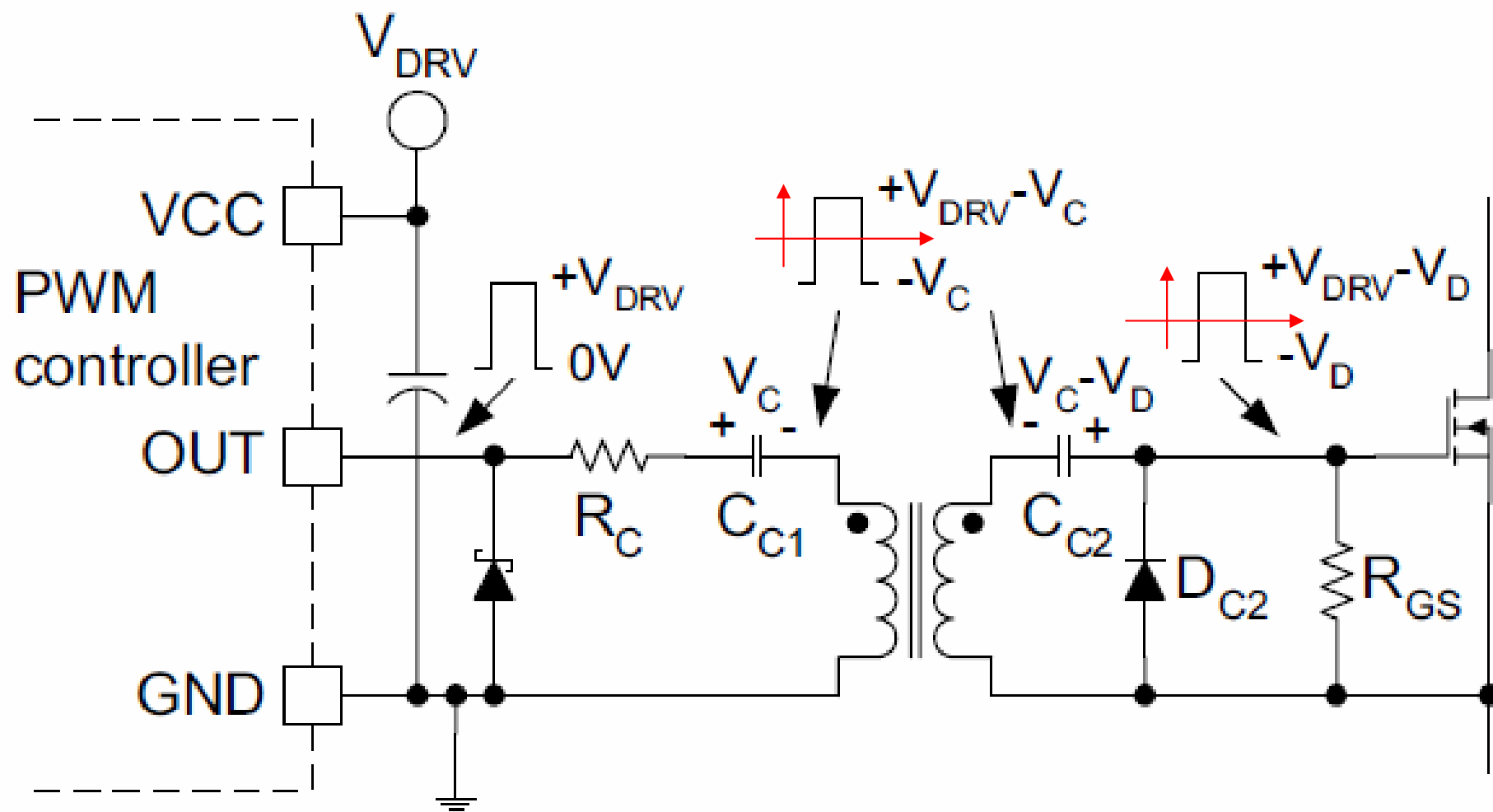
# PRIMER 3: Impulsni transformator za pobudu MOSFET prekidača (snage $\ll 10\text{W}$ , tipično $1\text{W}$ )



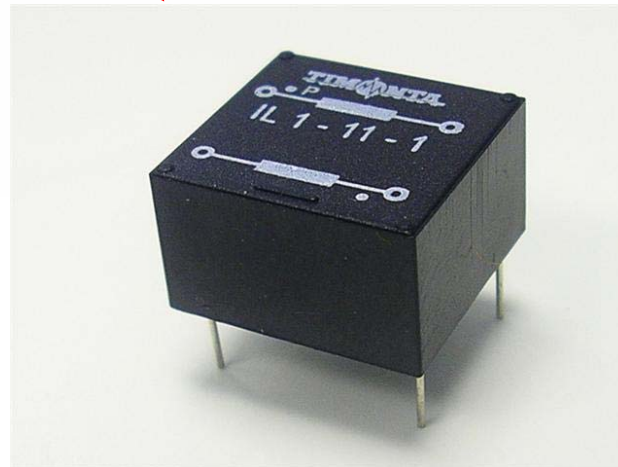
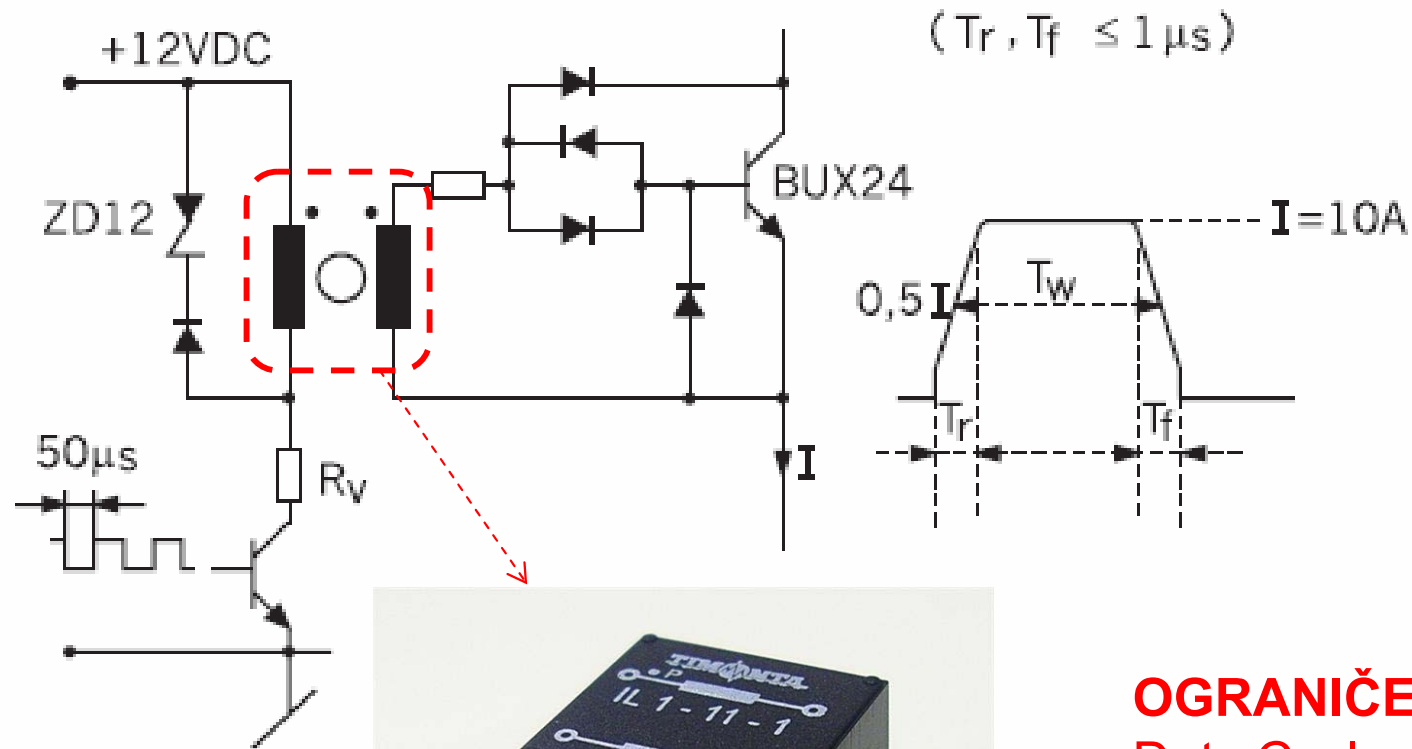
**OGRANIČENJE:**  
Duty Cycle  $\leq 50\%$  !!!!



## NAPONSKI TALASNI OBLICI NA PRIMARU I SEKUNDARU IMPULSNOG TRANSFORMATORA

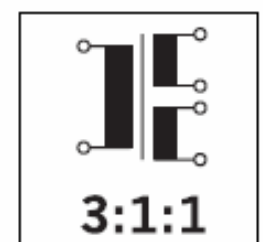
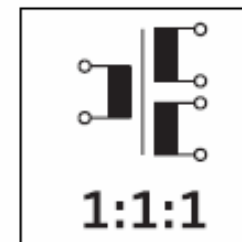
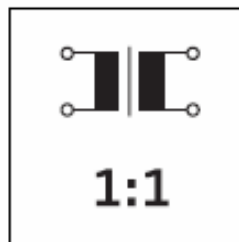


# PRIMER 4: POBUDA BIPOLARNOG TRANZISTORA



**OGRANIČENJE:**  
Duty Cycle  $\leq 50\%$  !!!!

Prenosni odnosi  
impulsnog  
transformatora





## Kataloški podaci za impulsni transformator za pobudna kola MOSFET prekidača (snaga <1W)

Description	$\int U dt$ [V $\mu$ s]	$T_r$ [ $\mu$ s]	$R_L$ [ $\Omega$ ]	$I_t$ [A]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$C_c$ [pF]	$U_{isol}$ [kV~]	$P_m^{(1)}$ [W]	Case	Turn ratio [N]	$L_s$ [mH]	Application
ITNA-0235-D103	200	0.9	100	0.1	1	1	20	3.5	0.5	35 - 3	1 : 1	2.8	Universal
ITRA-0235-D103	200	0.05	100	0.1	1.5	1	80	3.2	0.5	35 - 3	1 : 1	2.8	$T_R \leq 0.05 \mu s$
ITNA-0249-D104	300	1	100	0.1	0.7	0.7	20	3.5	0.7	49 - 3	1 : 1	3.5	Universal
ITRA-0249-D104	300	0.05	100	0.1	0.7	0.7	90	3.2	0.7	49 - 3	1 : 1	3.5	$T_R \leq 0.05 \mu s$
ITNA-0239-D202	400	1	60	0.17	0.4	0.4	20	3.5	1.0	39 - 3	1 : 1	2.2	Universal
ITRA-0239-D502	400	0.1	20	0.5	0.4	0.4	100	3.2	1.0	39 - 3	1 : 1	2.2	$T_R \leq 0.1 \mu s$
ITNB-0249-D101	250	1	100	0.1	1.0	0.5	20	3.5	0.7	49 - 3	2 : 1	1.6	Universal
ITRB-0249-D101	250	0.05	100	0.1	1.0	0.5	70	3.2	0.7	49 - 3	2 : 1	1.4	$T_R \leq 0.05 \mu s$
ITNB-0239-D202	350	1.5	60	0.17	0.8	0.4	20	3.5	1.0	39 - 3	2 : 1	1.8	Universal
ITRB-0239-D502	350	0.5	20	0.5	0.8	0.4	90	3.2	1.0	39 - 3	2 : 1	1.8	$T_R \leq 0.5 \mu s$
ITNF-0135-D101	150	0.9	100	0.1	0.5	0.5	10	3.5	0.5	35 - 4	1 : 1 : 1	1.1	Universal
ITRF-0235-D101	150	0.05	100	0.1	1	0.5	40	3.2	0.5	35 - 4	1 : 1 : 1	1.1	$T_R \leq 0.05 \mu s$
ITNF-0249-D101	250	1	100	0.1	0.5	0.5	20	3.5	0.7	49 - 4	1 : 1 : 1	1.4	Universal
ITRF-0249-D101	250	0.05	100	0.1	0.4	0.5	70	3.2	0.7	49 - 4	1 : 1 : 1	1.2	$T_R \leq 0.05 \mu s$
ITNF-0239-D202	350	1.5	60	0.17	0.4	0.4	20	3.5	1.0	39 - 4	1 : 1 : 1	1.6	Universal
ITRF-0239-D502	350	0.5	20	0.5	0.4	0.4	90	3.2	1.0	39 - 4	1 : 1 : 1	1.6	$T_R \leq 0.5 \mu s$

# Hvala na pažnji!!!

## PITANJA????

