

## POBOLJŠANI MODEL ŠUMA MIKROTALASNIH FET TRANZISTORA ZA RAZLIČITE RADNE TEMPERATURE

Olivera Pronić, Jovana Randelović, *Elektronski fakultet u Nišu*

**Sadržaj** – U radu je predložen novi postupak modelovanja parametara šuma MESFET-a / HEMT-a za različite radne temperature tranzistora. Predloženi model šuma predstavlja modifikaciju modela Pospieszalskog sa ciljem da se poboljša tačnost modela. Postupak se bazira na određivanju frekvencijski zavisnih funkcija korekcije greške kojima se modifikuju jednačine za određivanje parametara šuma. Korišćenjem ovog postupka postignuta je tačnija predikcija parametara šuma u odnosu na originalni model, što je prikazano na primeru pakovanog HEMT-a. Funkcije korekcije greške određene na jednoj radnoj temperaturi tranzistora uspešno su primenjene i za modelovanje šuma istog tranzistora u celom radnom temperaturnom opsegu.

### 1. UVOD

Pri projektovanju savremenih mikrotalasnih komunikacionih sistema (mobilni sistemi, radio-relejni linkovi, satelitski sistemi, itd.) teži se da prijemni deo sistema unosi sto manji sopstveni šum, obzirom da nivo šuma određuje donju granicu jačine signala koji se može detektovati u prisustvu šuma. Zbog toga se velika pažnja posvećuje analizi šuma i predikciji šumnih karakteristika aktivnih komponenata.

U oblasti mikrotalasa najčešće korišćene malošumne komponente su MESFET i HEMT tranzistori. Problem karakterizacije šuma ovih komponenata aktuelan je već duži niz godina. Za neposredno merenje parametara šuma tranzistora neophodna je dosta složena i skupa oprema, pa se iz tih razloga radi na razvoju što pouzdanijih modela mikrotalasnih tranzistora koji bi omogućili simulaciju u širokom frekvencijskom opsegu, kako S parametara, tako i parametara šuma.

Modeli šuma ovih tranzistora se generalno mogu podeliti na fizičke, [1-5], i empirijske modele, [6-11]. Fizički modeli šuma mikrotalasnih tranzistora imaju osnovu u stvarnim mehanizmima generisanja šumova u tranzistorima, pa je pri razvoju ovih modela neophodno poznavanje brojnih parametara vezanih za geometriju, tehnološki proces izrade komponente i slično, što je retko kad poznato za komercijalno raspoložive komponente. Zbog toga su za primenu u okviru standardnih softverskih paketa za simulaciju i projektovanje mikrotalasnih kola pogodniji empirijski modeli šuma. Za ove modele je, pored elemenata ekvivalentnog kola, neophodno odrediti (optimizacijom ili na neki drugi način) i jedan broj empirijskih parametara kojima se reprezentuje šum tranzistora.

Dvoparametarski model šuma MESFET / HEMT tranzistora koji je uveo Pospieszalski, [10], pokazao se kao najpouzdaniji i najjednostavniji za implementaciju u okviru standardnih simulatora mikrotalasnih kola, kao što su Libra ili ADS. On se bazira na jednostavnim jednačinama za određivanje parametara šuma unutrašnjeg ekvivalentnog kola

tranzistora u funkciji elemenata unutrašnjeg kola i dva empirijska, frekvencijski nezavisna parametra, nazvana - ekvivalentne temperature gejta i drejna. Ovaj model generalno daje dobro slaganje sa merenim podacima, ali izvesno odstupanje i dalje postoji. Naime, u ovom modelu je korelacija između dva izvora šuma u potpunosti ignorisana. Netačnost modela prouzrokovana ovom aproksimacijom nije zanemarljiva za više frekvencije.

Jedan od načina za poboljšanje tačnosti modela jeste uključivanje dodatnih efekata u model. U radu [12] korelacija između izvora šuma uključena je definisanjem kompleksne korelacione temperature šuma. Na ovaj način, korišćenjem troparametarskog modela, ostvareno je tačnije modelovanje parametara šuma, ali je sam model šuma postao znatno kompleksniji.

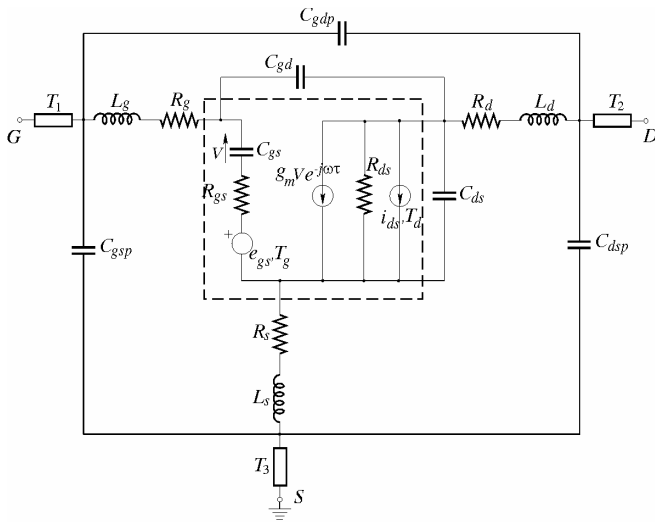
U radu [13] autori su predstavili jedan novi, jednostavan metod za poboljšanje tačnosti pomenutog modela šuma. U nameri da se postigne bolje slaganje između merenih i modelovanih parametara šuma, u standardne jednačine Pospieszalskog uključene su funkcije korekcije greške. Metod je primenjen za modelovanje šuma pri različitim uslovima napajanja.

U ovom radu izvršeno je poboljšanje modelovanja šuma MESFET-a / HEMT-a za različite temperaturne uslove. Funkcije korekcije greške uključene su u model šuma tranzistora u nameri da se postigne tačnija predikcija parametara šuma. Razmatrana je mogućnost primene istih korekcionih funkcija za različite radne temperature tranzistora.

### 2. MODEL ŠUMA MIKROTALASNIH FET TRANZISTORA

Pri razvoju modela šuma MESFET-a / HEMT-a polazi se od modela koji je predložen u [10]. Ekvivalentno kolo pakovanog MESFET-a / HEMT-a sa pridruženim izvorima šuma prikazano je na Sl.1. Unutrašnje ekvivalentno kolo tranzistora, koje je zajedničko za većinu modela mikrotalasnih FET tranzistora, označeno je isprekidanom linijom.

Izvori termičkog šuma unutrašnjeg kola su otpornosti  $R_{gs}$  i  $R_{ds}$ . Uticaji šuma ovih otpornosti predstavljeni su naponskim izvorom šuma,  $e_{gs}$ , i strujnim izvorom šuma,  $i_{ds}$ , respektivno. Naponskom izvoru šuma pridružena je ekvivalentna temperatura šuma gejta,  $T_g$ , a strujnom izvoru šuma – ekvivalentna temperatura šuma drejna,  $T_d$ . Ove dve ekvivalentne temperature su empirijski parametri modela koji se određuju na osnovu eksperimentalnih podataka o karakteristikama šuma komponente. Pri proračunu šuma cele komponente smatra se da je temperatura šuma parazitnih otpornosti jednaka temperaturi ambijenta.



Sl.1. Ekvivalentno kolo MESFET /HEMT tranzistora sa pridruženim izvorima šuma

Parametri šuma unutrašnjeg dela ekvivalentnog kola:

minimalni faktor šuma  $F_{mini} = 10 \log \left( 1 + \frac{T_{mini}}{T_0} \right)$ ,

optimalna impedansa izvora  $Z_{opti} = R_{opti} + jX_{opti}$  (odgovarajući optimalni koeficijent refleksije je  $\Gamma_{opti} = \frac{Z_{opti} - Z_0}{Z_{opti} + Z_0}$ ) i ekvivalentna otpornost šuma  $R_{ni}$ ,

moгу se odrediti pomoću sledećeg skupa jednačina, [10]:

$$T_{mini} = 2 \frac{\omega C_{gs}}{g_m} \sqrt{\frac{R_{gs} T_g T_d}{R_{ds}} + \left( \frac{\omega C_{gs} R_{gs} T_d}{g_m R_{ds}} \right)^2} + 2 \left( \frac{\omega C_{gs}}{g_m} \right)^2 \frac{R_{gs}}{R_{ds}} T_d, \quad (1)$$

$$Z_{opti} = \sqrt{\left( \frac{g_m}{\omega C_{gs}} \right)^2 \frac{R_{gs} R_{ds} T_g}{T_d} + R_{gs}^2} + j \frac{1}{\omega C_{gs}}, \quad (2)$$

$$R_{ni} = \frac{T_g}{T_0} R_{gs} + \frac{T_d}{T_0 R_{ds} g_m} \left( 1 + \omega^2 C_{gs}^2 R_{gs}^2 \right), \quad (3)$$

gde je  $T_0$  standardna referentna temperatura (290 K).

Parametri šuma tranzistora proračunati na ovaj način u određenoj meri odstupaju od referentnih vrednosti parametara šuma. Da bi se minimiziralo odstupanje koje postoji između merenih i modelovanih vrednosti parametara šuma, predložen je novi model koji uvodi funkcije korekcije greške u jednačine šuma Pospieszalskog, [13]. Predložena procedura modelovanja slična je proceduri predstavljenoj u [14] za model šuma Fukuia.

Najpre se za svaki od parametara šuma:  $F_{min}$ ,  $Mag(\Gamma_{opt})$ ,  $Ang(\Gamma_{opt})$  i  $r_n = R_n / 50$ , određuje količnik vrednosti merenog i odgovarajućeg modelovanog parametara šuma duž celog frekvencijskog opsega. Dobijene vrednosti

zatim se aproksimiraju pogodnim frekvencijski zavisnim krivama. Na ovaj način izabrane su najpodesnije matematičke funkcije za sva četiri parametara šuma. Ove funkcije predstavljaju funkcije korekcije greške za poboljšanje tačnosti modela šuma Pospieszalskog. Naime, standardne jednačine šuma množe se tako određenim funkcijama korekcije greške ( $y_i(f)$ ,  $i=1, \dots, 4$ ), što kao rezultat daje nove jednačine za proračun parametara šuma unutrašnjeg kola:

$$F_{mini_{new}} = F_{mini} \cdot y_1(f), \quad (4)$$

$$Mag(\Gamma_{opti}_{new}) = Mag(\Gamma_{opti}) \cdot y_2(f), \quad (5)$$

$$r_{ni_{new}} = r_{ni} \cdot y_3(f), \quad (6)$$

$$Ang(\Gamma_{opti}_{new}) = Ang(\Gamma_{opti}) \cdot y_4(f). \quad (7)$$

Primenom predloženog modela šuma, parametri šuma tranzistora modeluju se sa većom tačnošću u odnosu na pristup Pospieszalskog. Pored toga, ovaj model omogućava predikciju karakteristika šuma istog tranzistora pri promenjenim uslovima napajanja, [13].

### 3. NUMERIČKI REZULTATI

Predloženi model šuma mikrotalasnih FET tranzistora korišćen je za modelovanje pakovanog HEMT-a oznake NE20283A, kompanije NEC. Razmatrana je mogućnost primene ovog modela šuma pri promenjenim temperaturnim uslovima. Sve simulacije izvršene su u programskom paketu ADS, [15].

Za potrebe modelovanja korišćeni su mereni podaci o S-parametrima i parametrima šuma za temperaturni opseg od  $-40^\circ\text{C}$  do  $60^\circ\text{C}$  sa korakom  $20^\circ\text{C}$ , koji su dobijeni ranije na Univerzitetu u Palermu, Italija, [16].

Za svaku od temperatura najpre je izvršena ekstrakcija elemenata modela za male signale, sa reprezentacijom šuma po metodi Pospieszalskog. Obzirom da je ekvivalentna temperatura šuma gejta približno jednaka temperaturi ambijenta, [10], to su u ovom slučaju ove dve temperature izjednačene.

Kao ilustracija, na Sl.2 dato je poređenje parametara šuma dobijenih po metodi Pospieszalskog (puna linija) i merenih parametara šuma (kružići) za temperaturu ambijenta  $T=60^\circ\text{C}$ . Uočava se da izvesno odstupanje ekstrahovanih od merenih vrednosti parametara šuma postoji kod parametara  $F_{min}$ ,  $Mag(\Gamma_{opt})$  i  $r_n$ .

U cilju minimiziranja odstupanja modelovanih od merenih karakteristika šuma sproveden je postupak korekcije krivih parametara šuma pomoću funkcija korekcije greške, na način objašnjen u prethodnom poglavlju. Modifikovane frekvencijske zavisnosti parametara šuma prikazane su isprekidanim linijama na Sl.2. Funkcije korekcije greške za ove parametre šuma su oblika:

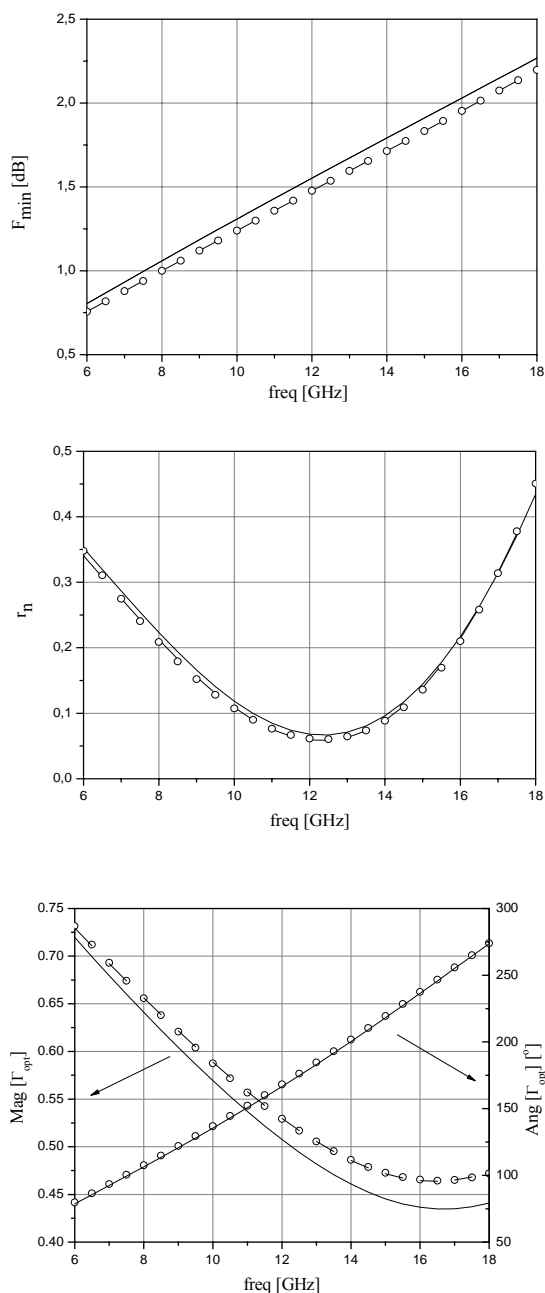
$$y_i(f) = a_i + b_i f + c_i f^2, \quad i=1,2,3 \quad (8)$$

gde je  $f$  – frekvencija (GHz), a  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  – koeficijenti polinoma.

Rezultati modelovanja parametra  $Ang(\Gamma_{opt})$  su zadovoljavajući, pa se funkcija korekcije greške ne definiše za ovaj parametar šuma. Dobijene vrednosti konstanti polinomnih funkcija (jednačina (8)) date su u Tabeli 1.

Poređenjem modelovanih karakteristika sa merenim vrednostima može se uočiti da se uvođenjem funkcija korekcije greške gotovo u potpunosti eliminišu odstupanja modelovanih od merenih vrednosti parametara šuma u celom radnom frekvencijskom opsegu.

Dalje je ispitivano da li se predloženi model šuma može primeniti i za promenjene temperaturne uslove rada komponente. Pokazano je da predloženi model šuma, sa jedanput modifikovanim skupom jednačina, pokazuje dobre rezultate i za različite temperature ambijenta, odnosno, jednom određene funkcije korekcije greške mogu se koristiti u potpuno istom obliku za ostale temperature.

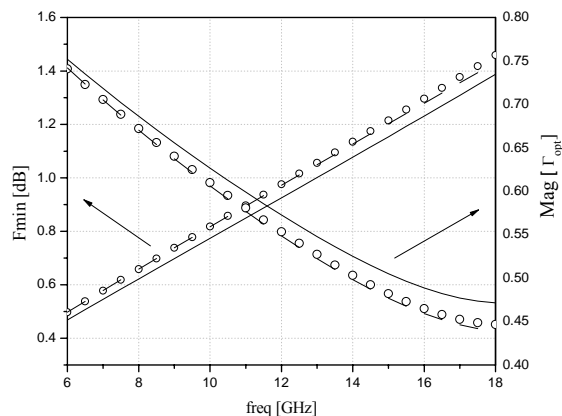


Sl.2. Poređenje parametara šuma za temperaturu  $T=60^{\circ}\text{C}$

Tabela 1 Koeficijenti polinoma  $y_1(f)$ ,  $y_2(f)$  i  $y_3(f)$

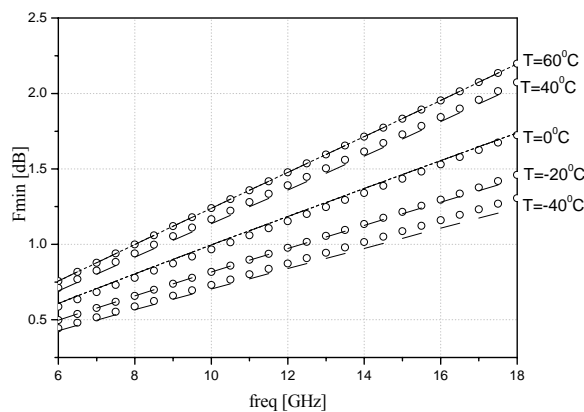
	$a$	$b$	$c$
$y_1(f)$	0.938	$2.837 \cdot 10^{-5}$	$9.502 \cdot 10^{-5}$
$y_2(f)$	1.292	$-6.885 \cdot 10^{-2}$	$3.038 \cdot 10^{-3}$
$y_3(f)$	0.982	$5.057 \cdot 10^{-3}$	0

Kao ilustracija, na Sl.3 su predstavljene frekvencijske zavisnosti minimalnog faktora šuma i magnitude optimalnog koeficijenta refleksije za radnu temperaturu od  $-20^{\circ}\text{C}$  dobijene predloženim postupkom, uz korišćenje funkcija korekcije greške kao u prethodnom primeru (određenih za temperaturu ambijenta od  $60^{\circ}\text{C}$ ). Uočava se da su parametri šuma i za promenjenu radnu temperaturu modelovani sa velikom tačnošću.



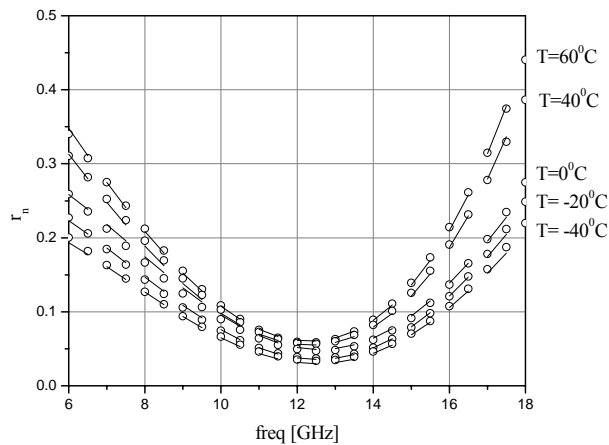
Sl.3. Poređenje parametara šuma  $F_{min}$  i  $Mag(\Gamma_{opt})$  za temperaturu ambijenta  $T=-20^{\circ}\text{C}$

Na Sl.4 i Sl.5 su predstavljene frekvencijske zavisnosti parametara  $F_{min}$  i  $r_n$  za opseg temperatura ambijenta od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  dobijene predloženom tehnikom modelovanja. Očigledno je da je ostvareno dobro modelovanje parametara šuma u celom radnom temperaturnom opsegu.



Sl.4. Poređenje merenih i modelovanih vrednosti  $F_{min}$  za različite temperature ambijenta

S



Sl. 5. Poređenje merenih i modelovanih vrednosti  $r_n$  za različite temperature ambijenta

#### 4. ZAKLJUČAK

Razvijen je novi model šuma mikrotalasnih FET tranzistora koji predstavlja modifikaciju standardnog metoda Pospieszalskog. Modifikacija je izvršena uključivanjem frekvencijski zavisnih funkcija korekcije greške u jednačine Pospieszalskog, čime je ostvarena tačnija predikcija parametara šuma. Pokazano je da se korišćenjem funkcija korekcije greške određenih na jednoj temperaturi može efikasno izvršiti modelovanje parametara šuma razmatranog tranzistora i za druge radne temperature tranzistora.

#### LITERATURA

- [1] A. Van der Ziel, "Thermal noise in field-effect-transistor", *Proc. IRE*, vol.50, pp. 1808-1812, 1962.
- [2] R.A. Pucel, H.A. Haus, and H. Statz, "Signal and noise properties of gallium arsenide microwave field-effect transistors", *Advances in Electronics and Electron Physics*, New York: Academic Press, pp. 195-265, 1975.
- [3] C.H. Liechti, "Microwave field-effect-transistors", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-24, pp. 279-300, 1976.
- [4] T.M. Brookes, "The noise properties of high electron mobility transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp. 52-57, 1986.
- [5] A. Cappy, A. Vanoverschelde, A. Schortgen, C. Versnaeyen, G. Salmer, "Noise modeling in submicrometer-gate two-dimensional electron-gas field-effect transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-32, pp. 2787-2795, 1985.
- [6] H. Fukui, "Design of microwave GaAs MESFET's for broad-band low-noise amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 643-650, 1979.
- [7] H. Fukui, "Optimal noise figure of microwave GaAs MESFET's", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-26, pp. 1032-1037, 1979.

- [8] A. Podell, "A functional GaAs FET noise model", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-28, pp. 511-517, 1981.
- [9] M.S. Gupta, O. Pitzalis, S.E. Rosenbaum, P.T. Greiling, "Microwave noise characterization of GaAs MESFETs: Evaluation by on-wafer low-frequency output noise current measurement", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-35, pp. 1208-1218, 1987.
- [10] M.W. Pospieszalski, "Modeling of noise parameters of MESFET's and MODFET's and their frequency and temperature dependence", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-37, No. 9, pp. 1340-1350, 1989.
- [11] R.K. Froelich, "An improved model for noise characterization of microwave GaAs FET's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-38, pp. 703-706, 1990.
- [12] V. Marković, B. Milovanović, N. Maleš-Ilić, "MESFET Noise Model Based on Three Equivalent Temperatures", *Proceedings of 27th European Microwave Conference*, Jerusalem, Israel, 1997, pp. 966-971.
- [13] O. Pronić, G. Mitić, J. Randelović, V. Marković, "Novi postupak modelovanja šuma mikrotalasnih FET tranzistora za različite uslove napajanja", *ETRAN 2004*, sveska II, Čačak, 2004, str.299-302.
- [14] P. Ratna and V.S.R. Kirty, "A novel technique for accurate noise modeling", *Proceedings of APMC2001*, Taipei, Taiwan, pp.730-734.
- [15] *Advanced Desing System - version 1.5*, Agilent Eesof EDA, 2000.
- [16] A. Caddemi, A. Di Paola and M. Sannino, "Microwave noise parameters of HEMTs vs. temperature by a simplified measurement procedure", *Proceedings of EDMO96 Conference*, Weetwood Hall, Leeds, 1996, pp. 153-157.

**Abstract** – A simple procedure for noise parameter prediction of microwave MESFETs / HEMTs versus temperature is proposed in this paper. The proposed noise model presents a modification of the Pospieszalski's noise model with the aim to improve the model accuracy. For this purpose, frequency-dependent error correction functions are determined and incorporated into the Pospieszalski's noise equations. By using this procedure, more accurate noise prediction is obtained, as it is shown by an example of packaged HEMT noise modeling. The error correction functions calculated for one device ambient temperature are used for efficient transistor noise parameter prediction for the whole range of device operating temperatures.

#### IMPROVED NOISE MODEL OF MICROWAVE FETS VALID FOR VARIOUS OPERATING TEMPERATURES

Olivera Pronić, Jovana Randelović