

# Návrh tepelného modelu měniče a identifikace jeho parametrů

Martin Votava, Tomáš Glasberger  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
mvotava@rice.zcu.cz

## Design of Converter Thermal Model and Identification of Model Parameters

**Abstract** – The paper is focused on a thermal model identification of power semiconductor module for estimation of junction temperature of the semiconductor elements (transistors). The model describes differences between converter baseplate temperature and temperature of each transistor in the module. The thermal model parameters are identified by least squares method from experimentally obtained waveforms. Parameters are verified on validation data with periodical switching of converter transistors.

**Keywords** – Least Squares Method; Model Identification; Transistor

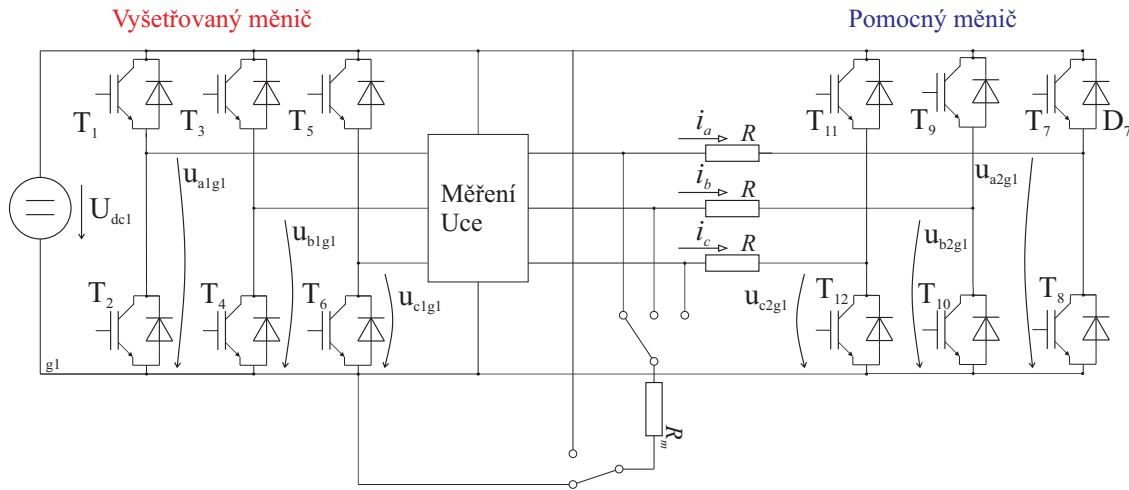
### I. ÚVOD

Přesný tepelný model výkonového polovodičového měniče je důležitý pro řízení měniče s ohledem na maximalizaci zatížení jednotlivých tranzistorů měniče a ochranu měniče proti přetížení. Výzkum byl prováděn kvůli možnosti určení maximálního zatížení jednotlivých tranzistorů pro algoritmus popsáný v [1]. Nejjednodušší způsob určení parametrů modelu je použití hodnot uvedených v datasheetu. Nevýhodou tohoto způsobu je nepřesnost. Nepřesnosti mohou být například dány jiným provedením chladiče, různou polohou jednotlivých tranzistorů uvnitř pouzdra měniče, atd. [2]. Tato práce si stanovuje úkol navrhnout tepelný model měniče, identifikovat a verifikovat jeho parametry.

### II. MODEL

Určit termální model výkonového modulu je poměrně komplikovaná úloha, neboť ohřev modulu je způsoben tepelnými účinky jednotlivých tranzistorů, které nemusí být v modulu rozmístěny rovnoměrně, a také nejsou rovnoměrně zatěžovány. Model tedy musí pro všechny tranzistory zahrnout vliv a geometrické uspořádání i ostatních prvků. Teplota jednotlivých tranzistorů je odhadována pomocí měření teploty pouzdra a modelování rozdílu mezi teplotou pouzdra a daného PN přechodu

$$\hat{T}_k = \Delta\hat{T}_k + T_{p,k}, \quad (1)$$



**Obrázek I. Schéma zapojení pro měření teploty tranzistorů**

kde  $\hat{T}_k = [\hat{T}_{1,k}, \hat{T}_{2,k}, \hat{T}_{3,k}, \hat{T}_{4,k}, \hat{T}_{5,k}, \hat{T}_{6,k}]^T$  je vektor odhadované teploty tranzistorů v kroku  $k$ ,  $T_{p,k}$  je měřené teplota pouzdra měniče,  $\Delta\hat{T}_k = [\Delta\hat{T}_{1,k}, \Delta\hat{T}_{2,k}, \Delta\hat{T}_{3,k}, \Delta\hat{T}_{4,k}, \Delta\hat{T}_{5,k}, \Delta\hat{T}_{6,k}]^T$  je vektor odhadovaných rozdílů mezi teplotou PN přechodu jednotlivých tranzistorů a pouzdrem měniče. Rozdíl teplot tranzistoru  $y$  ( $y = 1, \dots, 6$ ) a pouzdra měniče lze určit dle modelu

$$\Delta\hat{T}_{y,k} = -\hat{a}_y \cdot \Delta\hat{T}_{y,k-1} + \hat{b}_{y1} \cdot P_{1,k-1} + \hat{b}_{y2} \cdot P_{2,k-1} + \hat{b}_{y3} \cdot P_{3,k-1} \quad (2)$$

$$+ \hat{b}_{y4} \cdot P_{4,k-1} + \hat{b}_{y5} \cdot P_{5,k-1} + \hat{b}_{y6} \cdot P_{6,k-1}, \quad (3)$$

kde  $\hat{a}_y = [a_{y,n-1}, a_{y,n-2}, a_{y,n-3}, \dots, a_{y,0}]$  je vektor koeficientů udávajících vliv rozdílů teplot z předchozích kroků,  $\Delta\hat{T}_{y,k-1} = [\hat{T}_{y,k-1}, \hat{T}_{y,k-2}, \hat{T}_{y,k-3}, \dots, \hat{T}_{y,k-n}]^T$  je vektor odhadovaných teplot prvku  $y$  v předchozích krocích,  $\hat{b}_{yz} = [b_{yz,m}, b_{yz,m-1}, b_{yz,m-2}, \dots, b_{yz,0}]$  je vektor koeficientů udávajících vliv okamžitých výkonů prvku  $z$  ( $z = 1, \dots, 6$ ) v předchozích krocích,  $P_{y,k-1} = [P_{y,k-1}, P_{y,k-2}, P_{y,k-3}, \dots, P_{y,k-m}]^T$  je vektor okamžitého výkonů tranzistoru  $y$  v předchozích krocích.

### III. ODHAD PARAMETRŮ

Odhad parametrů byl proveden z naměřených průběhů teplot a ztrátových výkonů jednotlivých tranzistorů a teploty pouzdra. Teplota tranzistorů byla vyhodnocena pomocí měření proudu a napětí na tranzistoru pomocí měřícího převodníku popsaného v [3]. Pro měření proudu a napětí na přechodu tranzistorů bylo použito obvodové schéma zobrazené na obr. I. Schéma obsahuje dohromady čtyři rezistory, přičemž rezistory  $R=3,3\ \Omega$  jsou použity k zatížení jednotlivých tranzistorů měniče a rezistor  $R_m = 30\ \Omega$  je použit k měření teploty měniče. Hodnota  $R_m$  je zvolena tak, aby vlivem měřícího proudu dostal tranzistor do lineární části závislosti napětí na teplotě PN přechodu tranzistoru. Pro zajištění stejných podmínek v měřícím obvodu jsou při odečtu napětí na vyšetřovaném tranzistoru uzavřeny tranzistory pomocného měniče a zatěžovací rezistory neteče proud. Perioda odečtu je stanovena na 20 ms, 4 ms jsou vyhrazeny na odečty napětí měřeného tranzistoru a 16 ms je vyhrazeno na zatížení jednotlivých tranzistorů.

Parametry  $\hat{a}_y$  a  $\hat{b}_{yz}$  lze identifikovat ze zaznamených průběhů rozdílů teplot mezi teplotou jednotlivých tranzistorů a pouzdra měniče. Jako příklad naměřených dat je na horním grafu na obr. IIa) červeně zobrazen průběh rozdílů teplot mezi tranzistorem  $T_1$  a pouzdrům měniče a na dolním grafu průběh okamžitých výkonů jednotlivých tranzistorů. Identifikace parametrů byla provedena pomocí metody nejmenší čtverců. Dle této metody se hledají parametry  $x_{LS}$  splňující podmínku

$$\|Ax_{LS} - b\|_2 = \min_{x \in \mathbb{R}} \|Ax - b\|_2, \quad (4)$$

Parametry lze získat řešením rovnice

$$\left[ (Ax - b)^T (Ax - b) \right]' = 2A^T Ax_{LS} - 2A^T b = 0. \quad (5)$$

Po upravení rovnice lze vyjádřit:

$$x_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (6)$$

U odhadu parametrů navrhovaného tepelného modelu je systém rozdělen na šest dílčích subsystémů reprezentující model jednotlivých tranzistorů daný rovnicí (2). Matice  $A$  je složená z rozdílů naměřených teplot mezi PN přechodem jednotlivých tranzistorů a pouzdrům měniče ( $T_y - T_p$ ) a ztrátových výkonů jednotlivých tranzistorů

$$A = \begin{bmatrix} T_{y,k-1} - T_{p,k-1} & P_{1,k-1} & P_{2,k-1} & & P_{6,k-1} \\ T_{y,k} - T_{p,k} & P_{1,k} & P_{2,k} & & P_{6,k} \\ T_{y,k+1} - T_{p,k+1} & P_{1,k+1} & P_{2,k+1} & \cdots & P_{6,k+1} \\ T_{y,k+l-1} - T_{p,k+l-1} & P_{1,k+l-1} & P_{2,k+l-1} & & P_{6,k+l-1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Vektor  $b$  je určen jako:

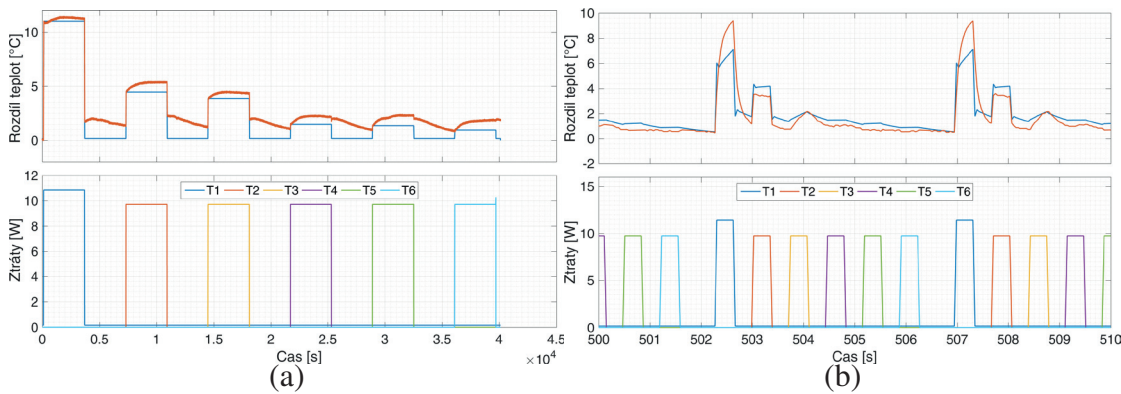
$$b = \begin{bmatrix} T_{y,k} \\ T_{y,k+1} \\ T_{y,k+2} \\ \vdots \\ T_{y,k+l} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

kde  $T_{y,k}$  je naměřené teplota PN přechodu tranzistoru  $y$ . Vektor parametrů  $x_{LS}$  je dán

$$x_{LS} = \begin{bmatrix} \hat{a}_y \\ \hat{b}_{y1} \\ \hat{b}_{y2} \\ \hat{b}_{y3} \\ \hat{b}_{y4} \\ \hat{b}_{y5} \\ \hat{b}_{y6} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Pro model druhého řádu vychází modré průběhy zobrazené na obr. IIa) . Maximální nepřesnost mezi měřeným a odhadovaným rozdílem teplot tranzistoru a teplotou pouzdra je přibližně dva stupně.

Oproti identifikaci byly pro validaci modelu použity průběhy, kde je vyšší frekvence spínání. Detail průběhů použitých pro validaci dat tranzistoru  $T_1$  je zobrazen na obr. IIb). Maximální rozdíl mezi odhadovanou skutečnou teplotou je přibližně 2,5 °C.



**Obrázek II. Odhadovaný a skutečný průběh rozdílu teplot přechodu měřeného tranzistoru a pouzdra měniče a průběh ztrátových výkonů pro (a) identifikační data, (b) validační data**

#### IV. ZÁVĚR

Práce popisuje identifikaci tepelného modelu jednotlivých tranzistorů měniče metodou nejmenších čtverců. Teplota je odhadovaná na základě výstupu teplotního čidla na pouzdru měniče a modelu rozdílů teplot mezi PN přechodem jednotlivých tranzistorů a pouzdem měniče. Parametry modelu byly identifikovány z experimentálních dat a ověřeny na průbězích s periodickým spínáním jednotlivých tranzistorů měniče. Maximální odchylka mezi odhadovanými a změřenými daty byla přibližně 2,5°C.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III.

#### LITERATURA

- [1] Martin Votava, Vaclav Smidl, Tomas Glasberger, and Zdenek Peroutka. Model predictive control of dual inverter respecting temperature limits of igbts. In *Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016 18th European Conference on*, pages 1–10. IEEE, 2016.
- [2] Humphrey Mokom Njawah Achiri, Lubos Streit, Vaclav Smidl, and Zdenek Peroutka. Experimental validation of igbt thermal impedances from voltage-based and direct temperature measurements. In *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, pages 3396–3401. IEEE, 2016.
- [3] Votava Martin, Glasberger Tomáš. Výzkumná zpráva č. 22160-012-2017 - návrh měřicího převodníku pro měření napětí mezi kolektorem a emitorem otevřeného igbt tranzistoru.