

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektrotechniky**

**Modelování chlazení tranzistorových zesilovačů**  
**Modeling of Transistor Amplifiers Cooling**

**2015**

**Patrik Bonczek**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Patrik Bonczek**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612R003 Aplikovaná elektronika  
Téma: **Modelování chlazení tranzistorových zesilovačů**  
**Modeling of Transistor Amplifiers Cooling**

Zásady pro vypracování:

1. Namodelujte chlazení tranzistorových zesilovačů pracujících ve třídě AB a D.
2. Pro vytvoření modelů použijte jeden z komerčních programů.
3. Porovnejte oba typy tranzistorových zesilovačů.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Laníček L.: Elektronika, Praha 2001, ISBN 80-86056-25-2
- [2] Vobecký, J., Záklava V.: Elektronika, Praha 2001, ISBN 80-7169-884-9
- [3] Schvarz S. E., Oldham W. G.: Electrical Engineering, New York 1984, ISBN 0-03-061758-8

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Zajaczek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *7. května 2015*

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Stanislavu Zajackovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá modelováním chlazení výkonových tranzistorových zesilovačů pracujících ve třídách AB a D. V úvodu práce jsou stručně shrnuty principy funkce zesilovačů ve třídách A, B, AB, C a D. Odvod tepelné energie z čipu tranzistoru se významnou měrou podílí na správné funkci a bezporuchovém chodu zařízení. Aby byla zajištěna správná a dlouhodobá funkce zařízení, kladou se v dnešní době vysoké požadavky na efektivní odvod tepelné energie. Z těchto důvodů se využívají modelační programy založené na řešení metodou konečných prvků. Model tranzistoru koncového stupně zesilovače je vytvořen pomocí programu COMSOL Multiphysics a působí na něj odlišné vlastnosti, které vycházejí z předpokladu rozdílné účinnosti porovnávaných zesilovačů třídy AB a D. Cílem této práce je namodelovat chlazení takovýchto tranzistorů v daných třídách a výsledné modely porovnat a zhodnotit.

## **Klíčová slova**

Zesilovač; třída zesilovače; ztrátový výkon; chladič; povrchová teplota

## **Abstract**

This Bachelor thesis deals with the modeling of cooling power transistor amplifiers working in classes AB and D. In the introduction of the work are briefly summarised the principles of function the amplifiers in the classes A, B, AB, C, and D. Dissipation of the thermal energy from the chip of the transistor significantly participate proper functioning and trouble-free operation of the device. In order to ensure the proper and long-term functions of the equipment, are nowadays high demands on effective dissipation of the heat energy. For this reason are used modelling programs based on the finite element method. The model of the end stage amplifier transistor was created by using the COMSOL Multiphysics program and dissimilar properties, based on the presuppositions of the different effectiveness of compared amplifiers of the class AB and D, acts on it. The aim of this work is to create model of the cooling these transistors in the specified classes and the resulting models compare and evaluate.

## **Key words**

Amplifier; class of amplifier; heat dissipation; cooler; surface temperature

## Seznam použitých symbolů

| Symbol                | Jednotky                      | Význam symbolu                             |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| $C_{oss}$             | pF                            | Výstupní kapacita tranzistoru              |
| $f_{spínací}$         | Hz                            | Spínací frekvence                          |
| $h_{coeff}$           | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Součinitel přestupu tepla                  |
| $I_{Cstř}$            | A                             | Střední hodnota kolektorového proudu       |
| $I_{Cef}$             | A                             | Efektivní hodnota kolektorového proudu     |
| $I_{Cmax}$            | A                             | Maximální proud tekoucí zátěží             |
| $I_{CP}$              | A                             | Proud v pracovní bodě                      |
| $I_{Dmax}$            | A                             | Maximální proud elektrody                  |
| $I_{Dstř}$            | A                             | Střední hodnota proudu elektrody           |
| $j_{CE}$              | $A \cdot m^{-2}$              | Proudová hustota                           |
| $M$                   | -                             | Stupeň modulace                            |
| $P_{max(AB)}$         | W                             | Ztrátový výkon tranzistoru AB zesilovače   |
| $P_{max(D)}$          | W                             | Ztrátový výkon tranzistoru D zesilovače    |
| $P_{spínací-celkové}$ | W                             | Celkové spínací ztráty                     |
| $P_{spínací}$         | W                             | Spínací ztráty                             |
| $P_{vedením}$         | W                             | Ztrátový výkon vedením                     |
| $P_{hradlo}$          | W                             | Ztrátový výkon na hradle                   |
| $P_{OUT}$             | W                             | Výstupní výkon                             |
| $P_{SS}$              | W                             | Stejnsměrný výkon dodávaný zdrojem         |
| $P_Z$                 | W                             | Největší střídavý výkon dodávaný do zátěže |
| $Q_G$                 | nC                            | Náboj hradla                               |
| $Q_{rr}$              | nC                            | Komutační náboj                            |
| $R_C$                 | $\Omega$                      | Zatěžovací odpor                           |
| $R_{DS-on}$           | $\Omega$                      | Statický odpor                             |
| $R_Z$                 | $\Omega$                      | Odpor zátěže                               |
| $T_{max}$             | $^{\circ}C$                   | Maximální teplota                          |
| $T_j$                 | $^{\circ}C$                   | Teplota čipu                               |

|              |   |  |
|--------------|---|--|
| $t_{d(on)}$  | s | Zpoždění sepnutí                                 |
| $t_{d(off)}$ | s | Zpoždění vypnutí                                 |
| $U_{BE}$     | V | Napětí báze-emitor                               |
| $U_{DS}$     | V | Průrazné napětí                                  |
| $U_{DSmin}$  | V | Minimální napětí mezi elektrodami drain a source |
| $U_{RC}$     | V | Efektivní hodnota napětí na zátěži               |
| $U_{RCmax}$  | V | Maximální amplituda napětí na zátěži             |
| $U_{GS}$     | V | Budící napětí                                    |
| $U_N$        | V | Napájecí napětí                                  |
| $\eta$       | % | Účinnost   |

---



## Seznam použitých zkratek

| Zkratka        | Význam   |
|----------------|--|
| <b>FEM</b>     | Finite Element Method – metoda konečných prvků                     |
| <b>PWM</b>     | Pulse Width Modulation - pulsně šířková modulace                   |
| <b>MOSFET</b>  | Tranzistor řízený polem  |
| <b>PDE</b>     | Parciálně diferenciální rovnice                                    |
| <b>MATLAB</b>  | Matrix Laboratory – maticová laboratoř                             |
| <b>CAD</b>     | Computer Aided Design – počítačem podporované kreslení             |
| <b>NASTRAN</b> | Finite element analysis program                                    |
| <b>AVI</b>     | Formát multimediálního souboru                                     |
| <b>GIF</b>     | Graphic Interchange Format – grafický formát pro rastrovou grafiku |

# Obsah

|   |        |
|---|--------|
| Úvod.....   | - 1 -  |
| 1 Zesilovače .....  | - 2 -  |
| 1.1 Základní analogové třídy zesilovačů.....              | - 2 -  |
| 1.1.1 Zesilovače třídy A .....                            | - 2 -  |
| 1.1.2 Zesilovače třídy B .....                            | - 3 -  |
| 1.1.3 Zesilovače třídy AB.....                            | - 5 -  |
| 1.1.4 Zesilovače třídy C .....                            | - 6 -  |
| 1.2 Spínané třídy zesilovačů.....                         | - 7 -  |
| 1.2.1 Zesilovače třídy D .....                            | - 8 -  |
| 2 COMSOL Multiphysics .....                               | - 9 -  |
| 2.1 Pracovní postup modelování v programu.....            | - 10 - |
| 2.1.1 Geometrie .....                                     | - 10 - |
| 2.1.2 Zadání okrajových podmínek a vlastností modelu..... | - 10 - |
| 2.1.3 Generování FEM sítě.....                            | - 10 - |
| 2.1.4 Řešení modelu .....                                 | - 11 - |
| 2.1.5 Výsledky řešení .....                               | - 11 - |
| 3 Modelování v COMSOL Multiphysics .....                  | - 12 - |
| 3.1 Geometrie.....  | - 12 - |
| 3.1.1 Geometrie chladiče.....                             | - 13 - |
| 3.2 Zadání okrajových podmínek a vlastností modelu.....   | - 17 - |
| 3.2.1 Výběr vhodných materiálů .....                      | - 17 - |
| 3.2.2 Zadání okrajových podmínek .....                    | - 19 - |
| 3.3 Generování FEM sítě .....                             | - 24 - |
| 3.4 Řešení modelu.....                                    | - 25 - |
| 3.5 Výsledky řešení modelu.....                           | - 25 - |
| 3.5.1 Chladič č. 1.....                                   | - 25 - |
| 3.5.2 Chladič č. 2.....                                   | - 28 - |
| 3.5.3 Chladič č. 3.....                                   | - 29 - |
| 3.5.4 Tabulka výsledků řešení.....                        | - 30 - |

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| Závěr .....              | - 32 - |
| Použitá literatura ..... | - 33 - |
| Seznam příloh.....       | - 34 - |

## Úvod

Cílem této práce je namodelovat chlazení tranzistorových zesilovačů, pracujících ve třídách AB a D, pomocí některého z komerčních programů.

Zesilovač je elektrické zařízení, na jehož vstup přivádíme signál, který chceme zesílit. Obvykle zesilovač zesiluje amplitudu signálu tak, aby se neměnila frekvence ani tvar. Můžeme je dělit podle mnoha kritérií. Jedním z těchto kritérií je rozdělení podle polohy klidového pracovního bodu do takzvaných tříd. V těchto třídách mají zesilovače rozdílné účinnosti a tedy i ztrátový výkon, který se na tranzistorech mění v nežádané teplo. Takto vzniklé teplo je potřeba odvést od součástky pomocí chladičů.

V druhé kapitole práce je představen program pro modelování a simulaci přenosu tepla modelem. K vytvoření modelu a zanesení vstupních podmínek geometrie je použit inženýrský program COMSOL Multiphysics.

Třetí kapitola se zabývá samotným postupem při tvorbě geometrie chladičů, zadáním potřebných okrajových podmínek modelu, nastavením fyzikálních modulů, generování FEM sítě a generováním výsledků ve formách teplotních map a grafů. Tyto výsledky popisují průběhy teplot jednotlivých chladičů, na nichž je umístěn buďto tranzistor koncového stupně zesilovače třídy AB nebo tranzistor koncového stupně zesilovače třídy D. Na konci této obsáhlé kapitoly je uvedeno porovnání a shrnutí vypočtených hodnot simulačním programem.

# 1 Zesilovače

Ne všechny zesilovače jsou stejné, a proto je rozdělujeme podle vlastností. Charakteristickými parametry zesilovače jsou linearita, zesílení, účinnost a výkon.

Jednou z metod používaných pro rozdělení elektrických vlastností různých druhů zesilovačů je podle tzv. třídy zesilovače. Do těchto tříd rozdělujeme zesilovače podle umístění klidového pracovního bodu a dle způsobu, jak zesilovač signál zpracovává. Tímto rozdělením nám vznikají následující třídy zesilovačů:

- a) Základní analogové třídy A, AB, B, a C
- b) Spínané D, T, E, F
- c) Další G, H, I atd.

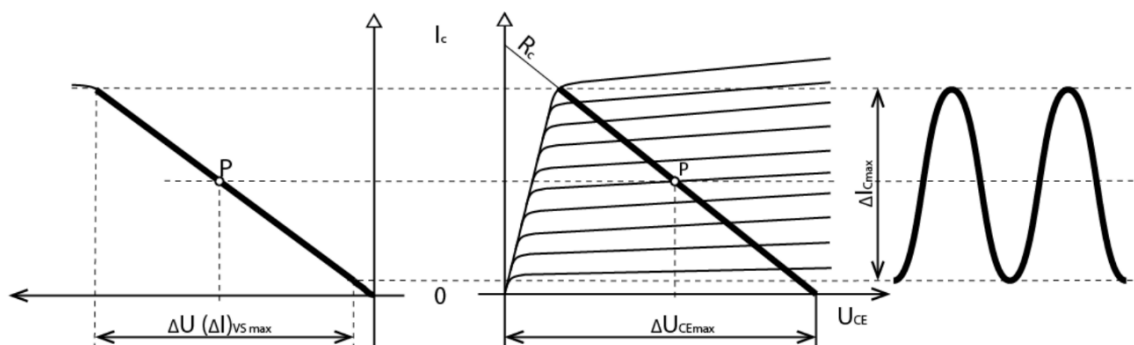
## 1.1 Základní analogové třídy zesilovačů

Charakteristickým rozdílem mezi analogovými třídami zesilovačů je v umístění pracovního bodu v soustavě charakteristik.

### 1.1.1 Zesilovače třídy A

U zesilovačů A třídy nastavujeme klidový pracovní bod do středu lineární části dynamické převodní charakteristiky. Zesilovače A třídy můžeme využívat jak v zapojení se společným kolektorem, tak se společným emitorem. [1]

Díky své jednoduché konstrukci se jedná o nejběžnější typ zesilovačů používaných zejména v nízkovýkonových koncových stupních pracujících v oblasti řádově stovek miliwattů (napájení sluchátek případně menších reproduktorů). Tyto zesilovače se vyznačují nejvyšší linearitou a na jejich výstupech poskytují věrnou reprodukci signálů vstupních. Vzhledem k tomu, že v této třídě vede výstupní zařízení stále proud, což představuje trvalý úbytek výkonu v zesilovači, produkují tyto zesilovače obrovské množství tepla a mají tedy velmi malou účinnost kolem 25 %. Právě proto je velmi nepraktické tyto zesilovače využívat pro velké výkony. [2]



Obrázek 1.1: Nastavení pracovního bodu zesilovače pracujícího ve třídě A [1]

Jak je patrné z obrázku, v pracovním bodě teče tranzistorem proud odpovídající vztahu

$$I_{CP} = \frac{U_N}{2 \cdot R_C}, \quad (1.1)$$

kde  $R_C$  je celkový zatěžovací odpor zesilovače a  $U_N$  napájecí napětí. Stejnoseměrný výkon  $P_{SS}$  dodávaný zdrojem vypočteme vztahem

$$P_{SS} = U_N \cdot I_{CP} = \frac{U_N^2}{2 \cdot R_C}. \quad (1.2)$$

Největší amplituda napětí na zátěži

$$U_{RCmax} \cong \frac{U_N}{2}, \quad (1.3)$$

efektivní hodnota napětí harmonického signálu

$$U_{RC} = \frac{U_{RCmax}}{\sqrt{2}}, \quad (1.4)$$

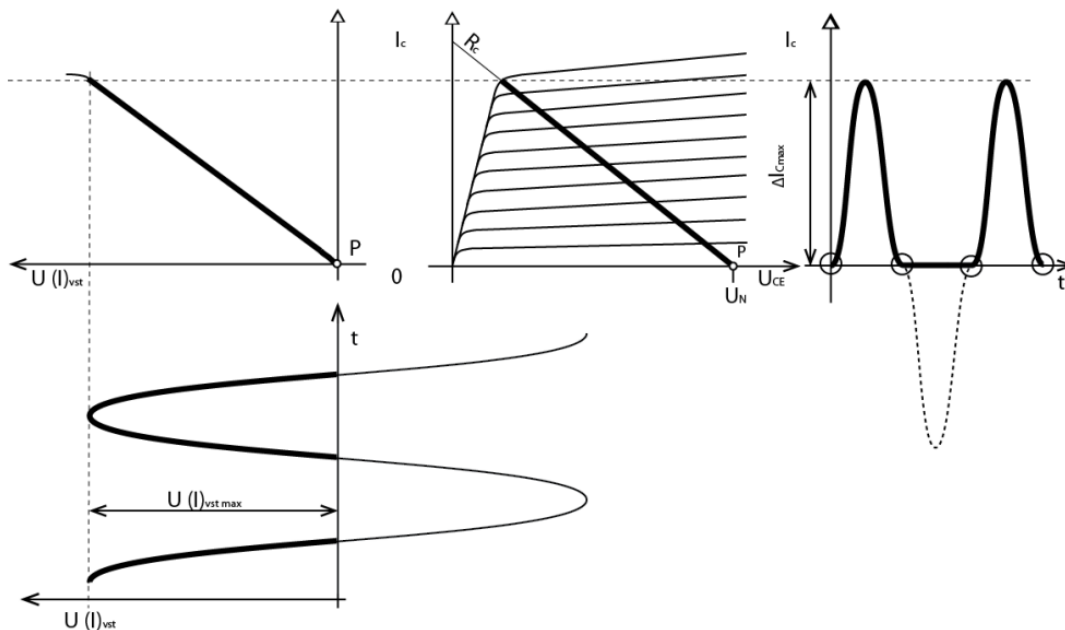
maximální teoretická účinnost zesilovače je

$$\eta = \frac{P_Z}{P_{SS}} = \frac{\frac{U_{RC}^2}{R_C}}{\frac{U_N^2}{2R_C}} = \frac{\frac{U_{RCmax}^2}{2R_C}}{\frac{U_N^2}{2R_C}} = \left(\frac{U_{RCmax}}{U_N}\right)^2 = \frac{1}{4} = 25 \%. \quad (1.5)$$

Jak vidíme, účinnost zesilovačů třídy A je velmi malá a v praxi je maximální dosažitelná účinnost okolo 20 %. Účinnost těchto zesilovačů můžeme zvýšit použitím transformátorové vazby mezi tranzistorem a zátěží. Tímto zapojením pak zvýšíme maximální teoretickou účinnost na 50 %. Nicméně zapojení s transformátorem se téměř nepoužívá, zejména kvůli jeho špatným vlastnostem při stejnosměrném proudu a kvůli náročnému ošetření ploché kmitočtové charakteristiky v širokém pásmu kmitočtů. Vzhledem k těmto špatným vlastnostem byly vyvíjeny nové třídy zesilovačů. [2]

### 1.1.2 Zesilovače třídy B

Jako zesilovače pracující ve třídě B nazýváme takové zesilovače, které nemají nastaven pracovní bod, respektive je nastaven do bodu zániku kolektorového proudu [3]. Díky tomu v době, kdy na tranzistor není přiveden signál, je tranzistor zavřený a neprotéká jím prakticky žádný proud. Proud tedy protéká tranzistorem po dobu poloviny periody  $T/2$ . Z těchto poznatků je zřejmé, že zesilovače třídy B se chovají jako jednocestné (jednopulzní) zesilovače.



Obrázek 1.2: Nastavení pracovního bodu zesilovače pracujícího ve třídě B [1]

Střední hodnota půlvlnného kolektorového proudu je

$$I_{Cstř} = \frac{1}{\pi} \cdot I_{Cmax}, \quad (1.6)$$

kde  $I_{Cmax}$  je maximální proud tekoucí v zátěži. Průměrný stejnosměrný výkon napájecího zdroje vypočteme vztahem

$$P_{SS} = I_{Cstř} \cdot U_N = \frac{1}{\pi} \cdot I_{Cmax} \cdot U_N. \quad (1.7)$$

Největší střídavý výkon dodávaný do zátěže je potom

$$P_Z = I_{Cef}^2 \cdot R_C = \left(\frac{1}{2} I_{Cmax}\right)^2 \cdot R_C = \frac{1}{4} \cdot I_{Cmax}^2 \cdot R_C. \quad (1.8)$$

Účinnost je dána vztahem

$$\eta = \frac{P_Z}{P_{SS}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{I_{Cmax} \cdot R_C}{U_N}. \quad (1.9)$$

Vidíme, že účinnost je úměrná amplitudě kolektorového proudu. Pro výpočet maximální teoretické účinnosti si stanovíme, že  $I_{Cmax} = U_N/R_C$ .

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{U_N}{R_C} \cdot R_C}{U_N} = \frac{\pi}{4} = 0,785 = 78,5 \%. \quad (1.10)$$

Jak již bylo zmíněno, tranzistorem v době, kdy nepřivádíme signál, neteče proud a díky tomu nedochází k rozptylování energie. Maximální teoretická účinnost je tedy 78,5 %. [2]

Tato třída je charakteristická svým velkým harmonickým zkreslením v oblasti malých signálů [3]. V praxi se se zesilovači třídy B zesilujícími pouze polovinu vstupního signálu téměř nesetkáváme. Daleko užívanější jsou zesilovače třídy B, využívají tzv. push-pull.

### **Push-pull zesilovač třídy B**

Tato zapojení dokáží díky dvěma tranzistorům zesilovat obě půlvlny vstupního signálu. V době, kdy je na vstupu kladná půlvlna, je sepnut jeden tranzistor, zatímco druhý tranzistor je vypnut a naopak je tomu při záporné půlvlně. Aby se tyto tranzistory sepnuly, potřebují napětí báze-emitor vyšší než 0,7 V. Právě díky tomu nedochází k přepínání vodivosti mezi těmito tranzistory v době, kdy je vstupní signál nulový, ale až po překročení  $U_{BE} = 0,7$  V. To má za následek, že část signálu není v oblasti od 0–0,7 V věrně reprodukována, a proto nejsou zesilovače třídy B vhodné pro aplikaci v přesných audiozesilovačích. Aby se odstranil tento nežádoucí jev nazývaný crossover zkreslení, byly vyvinuty zesilovače pracující ve třídě AB.

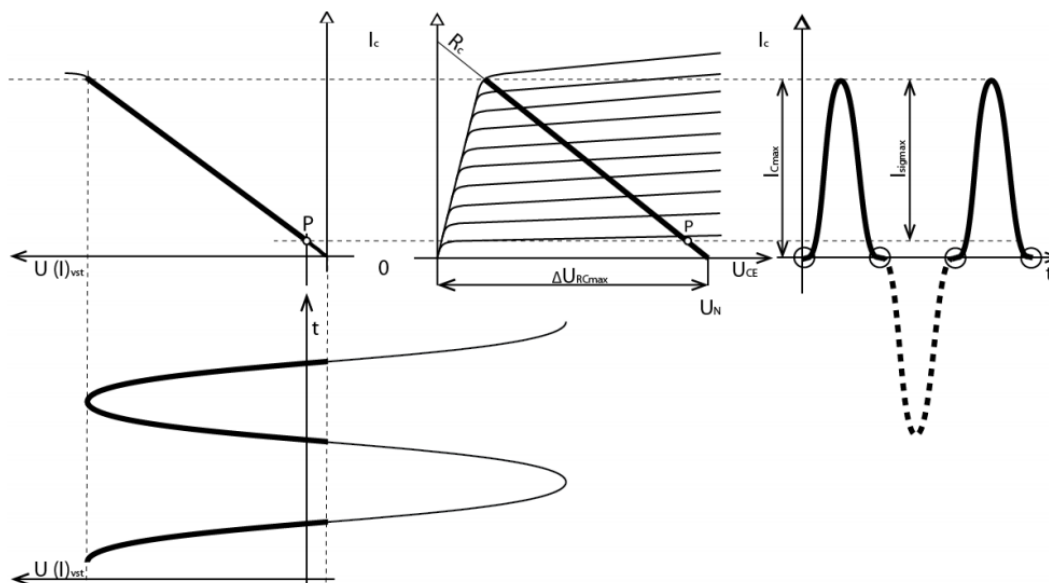
### **1.1.3 Zesilovače třídy AB**

Jak je již z názvu zřejmé, jedná se o kompromis mezi třídou A a třídou B. Vhodnou volbou pracovního bodu odstraníme největší zkreslení v oblasti malých signálů. Ta je způsobena nutností přivést určité napětí mezi bází a emitor tranzistoru tak, aby se tranzistor pohyboval v aktivní oblasti. Každý z tranzistorů je sepnut o něco delší dobu než je polovina cyklu, ale mnohem kratší dobu než je doba celého cyklu vstupního signálu.

U tranzistorových zesilovačů pracujících ve třídě B nedochází k případu, aby vedly oba tranzistory současně. Jinak je tomu u zesilovačů pracujících ve třídě AB. U těchto zesilovačů vede jeden z tranzistorů v případě, že vstupní signál je dostatečně vysoký, ať už kladný nebo záporný, a oba současně v oblasti kolem 0 V. Úhel spínání tranzistorových zesilovačů této třídy tedy leží mezi 180° až 360°.

V zapojení se vyskytují dvě velmi malé diody nazývané „předpínací“, které způsobí, že tranzistory vedou proud i v době, kdy není přítomen žádný vstupní signál. Díky tomu jsou tranzistory přednastaveny pro práci v aktivní oblasti a eliminuje se tak nežádoucí jev zvaný crossover zkreslení.





Obrázek 1.3: Nastavení pracovního bodu zesilovače pracujícího ve třídě AB [1]

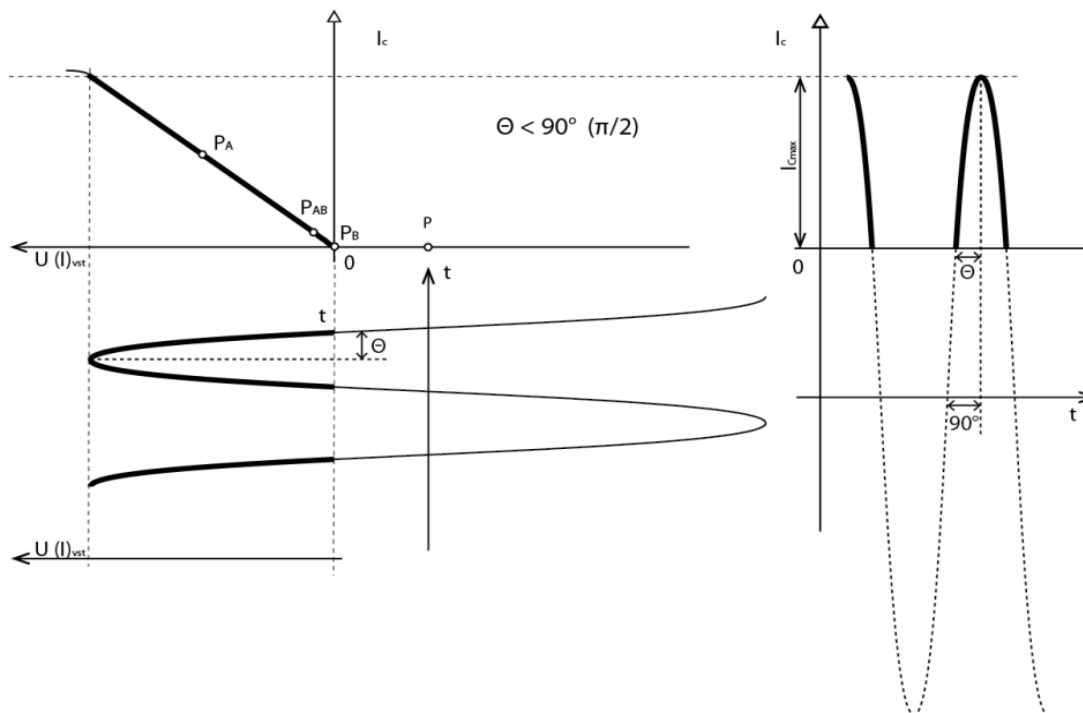
Tím, že se u tohoto zapojení vyskytuje na tranzistorech určitý kolektorový proud i v době nepřítomnosti vstupního signálu, je účinnost menší než u třídy B, ale zdatelně vyšší než u třídy A. Část z vysoké účinnosti zesilovačů třídy B se obětuje ve prospěch vyšší linearit. Stejně tak jako je tomu u zesilovačů třídy B, tak i zde je nutné zesilovat každou půlvlnu zvlášť.

#### 1.1.4 Zesilovače třídy C

U tranzistorových zesilovačů pracujících ve třídě C se volí pracovní bod až za bod zlomu dynamické převodní charakteristiky tj. pod bodem zániku kolektorového proudu. Jsou navrženy tak, aby měly účinnost co nejvyšší. Vysoká účinnost se ovšem negativně promítne na linearitě zesilovače. Výstupní proud je nulový po dobu větší, než je polovina vstupního sinusového signálu. Úhel otevření tranzistoru je zdatelně menší než  $180^\circ$ , obvykle pod  $90^\circ$ . [2]

S rezistivní zátěží se tyto zesilovače nepoužívají. Jak už víme, kolektorový proud tranzistoru této třídy je značně nelineární. Avšak při vhodné rezonanční zátěži můžeme z nelineárního průběhu získat základní harmonickou sinusovou složku. Impulzy kolektorového proudu budíme rezonanční obvod, který se rozkmitá, takže impulzní buzení eliminuje ztráty v reálném rezonančním obvodu. Teoreticky je tak možné rezonančními zesilovači dosáhnout účinnosti blížíci se 100 %. [1]

Ačkoli je u těchto zesilovačů účinnost kolem 80 %, nehodí se k použití jako audiozesilovače z důvodů velkého zkreslení kolektorového proudu tranzistoru vzhledem k budícímu signálu. Obvykle se používají pro zesilování impulzů v některých generátorech. [3]



Obrázek 1.4: Nastavení pracovního bodu zesilovače pracujícího ve třídě C [1]

## 1.2 Spínané třídy zesilovačů

Většina dnes používaných spínaných zesilovačů zpracovává analogový signál přeměnou na vysokofrekvenční obdélníkové signály proměnné střídy impulzů. Střídu můžeme měnit změnou amplitudy a fáze v rozsahu od nuly do sta procent (v praxi přibližně od 5 % do 95 %). Takto modulované vstupní napětí prochází k zátěži přes dolní propust, která převede impulzy zpět na analogový nízkofrekvenční signál.

Vysoké nároky se kladou na spínací vlastnosti výkonových tranzistorů a na jejich budící obvody. To je dáno nutností převedení analogového signálu v celém jeho kmitočtovém spektru s dostatečnou věrností na impulzní signály s proměnnou šířkou impulzů. Toho docílíme dostatečně vysokým kmitočtem obdélníkových impulzů. Spínací kmitočty bývají zpravidla vyšší než desetinásobek nejvyššího přenášeného kmitočtu analogového signálu, obvykle vyšší než 200 kHz. [1]

Při realizaci impulzních výkonových zesilovačů se používají výkonové spínací tranzistory pracující buďto v otevřeném nebo zavřeném stavu. V zavřeném stavu je mezi kolektorem a emitorem odpor vysoký a v otevřeném představuje tranzistor velmi malý odpor. Výkonová ztráta zavřeného tranzistoru je prakticky nulová (tranzistorem neteče proud). V otevřeném stavu je mezi kolektorem a emitorem malé napětí, takže může téct tranzistorem velký proud, který na malém odporu způsobuje malou výkonovou ztrátu, a tak nedochází k výkonovému přetížení tranzistoru. Abychom výkonovou ztrátu dále eliminovali, je dobré, aby se tranzistor pohyboval mezi otevřeným a zavřeným stavem (a naopak), co nejkratší možný okamžik. [1]

Díky malým výkonovým ztrátám bývá účinnost těchto zesilovačů mezi 70–97 %. Dále použitím těchto zesilovačů dochází k snížení zahřívání výkonových tranzistorů, a zároveň tedy k snížení požadavků na chlazení. Vzhledem ke své vysoké účinnosti se spínané třídy zesilovačů hojně začaly využívat v přenosné audioelektronice jako jsou například MP3 přehrávače. [1]

### 1.2.1 Zesilovače třídy D

Ve třídě D převádějí zesilovače vstupní analogový signál na šířkově modulované pulzy, které jsou zpracovány impulzními výkonovými zesilovači. Na vstup přichází analogový signál do komparátoru, kde je porovnáván s trojúhelníkovým případně pilovým signálem z oscilátoru. Komparátor pracuje s dvěma úrovněmi, a to vysoké a nízké. Dle toho, zda je analogový signál větší nebo menší než velikost trojúhelníkového (pilového) signálu, je na jeho výstupu vysoká nebo nízká úroveň. Jedná se o tzv. pulzně-šířkovou modulaci (PWM), kdy z původně analogového signálu vznikají pravoúhle impulzy o proměnné šířce úměrné velikosti původního analogového signálu. [12]

Takto komparátorem upravený signál vstupuje do řídicího obvodu spínačů, který řídí spínání dvou výkonových spínačů MOSFET tranzistorů. Jeden z výkonových spínačů je typu MOSFET s vodivým kanálem typu N a druhý MOSFET s vodivým kanálem typu P. Impulzy na jejich vstupech bývají obvykle dostatečně velké na to, aby byl tranzistor plně otevřen. V ideálním případě je vždy jeden ze spínačů plně otevřen, zatímco druhý plně zavřen. Další nezbytnou součástí zesilovače třídy D je nízkofrekvenční LC filtr. Tento filtr odstraní vysokofrekvenční složky a propustí pouze nízkofrekvenční analogový signál. [12]

## 2 COMSOL Multiphysics



COMSOL Multiphysics je inženýrský program určený vývojářům a vědeckým pracovníkům, pracujícím v široké škále vědeckých i technických oborů. Je určen k modelování a simulaci fyzikálních dějů a je díky němu možné nahlédnout do podstaty fyzikálních dějů v nejrůznějších oblastech. Jak už je z názvu patrné, COMSOL Multiphysics byl vytvořen právě pro řešení komplexních problémů multifyzikálních úloh, tj. úloh, kde na model vzájemně působí několik fyzikálních vlivů současně. Díky tomuto simulačnímu programu se snižují nároky na tvorbu fyzikálních prototypů a finanční náklady na vývoj. COMSOL Multiphysics umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) metodou konečných prvků. [4]

Dle toho, o jaký model se jedná a jaký proces chceme simulovat, volíme z knihovny příslušnou PDE. Například pro pozorování procesu zahřívání určitého modelu volíme PDE, popisující šíření tepla. Upravenou PDE pro konkrétní model můžeme nazývat aplikačním režimem. Knihovna PDE v programu COMSOL Multiphysics obsahuje celou řadu parciálně diferenciálních rovnic, které definují různé aplikační režimy. Dle výběru režimu se v grafickém editoru uživateli automaticky zobrazí dialogová okna pro zadání příslušných vlastností fyzikálních veličin jako např. tepelná vodivost, měrná hustota prostředí atd. Vytváříme-li kombinaci více aplikačních režimů pro jeden model, není potřeba vytvářet žádné přídavné kódy či skripty, vše je zajištěno programem COMSOL Multiphysics. Aplikační režimy, které jsou již definované vývojáři tohoto programu, jsou určeny pro řešení úloh v oblastech jako je pružnost a pevnost, akustika, prostupnost tepla, elektromagnetismus, elektrostatika, konvekce a difuze nebo dynamika tekutin. Díky možnosti propojování těchto různých režimů vznikají multifyzikální úlohy blížící se realitě a počítačová simulace se dostává na vyšší úroveň. [4]

Využití programu však není nikterak omezeno základní sadou modulů. Uživatel, zájímající se hlouběji o samotnou podstatu matematického problému dané úlohy, má možnost upravit stávající parciálně diferenciální rovnice popisující fyzikální jevy. V případě, že uživateli pro práci nevyhovují stávající ani upravené PDE, může si přímo v grafickém rozhraní programu nadefinovat vlastní parciální, případně obyčejné diferenciální rovnice, a není tedy nutné vytvářet jakékoli přídavné kódy či skriptovací soubory. Jedná se tedy o otevřený systém s možností vytvářet si vlastní aplikační úlohy s využitím obecného tvaru PDE. Pro vytvoření takovýchto aplikačních úloh musí být uživatel zasvěcen hluboko do fyzikální a matematické podstaty řešené úlohy. [4]

Jednou z dalších výhod simulačního programu COMSOL Multiphysics je možnost jeho propojení s nástrojem pro technické výpočty a simulaci MATLAB<sup>®</sup>. Toto vzájemné propojení nám umožňuje využít výpočetní sílu MATLABu a flexibilitu jeho aplikačních knihoven. Díky tomu i náročněji realizované úkoly, jako např. tvorba uživatelských aplikací, úprava modelů, optimalizace, kosimulace a pokročilé metody zpracování dat, případně vizualizace výsledků, nejsou pro COMSOL Multiphysics nikterak velkou překážkou. [4]

## 2.1 Pracovní postup modelování v programu

Pracovní postup při modelování v programu COMSOL Multiphysics se skládá z několika základních kroků.

### 2.1.1 Geometrie

Jako první se zabýváme geometrií objektu, pro který chceme provést simulaci. Tento model lze do simulačního programu importovat z programu CAD ve formátu DXF, nebo můžeme model vytvořit pomocí grafického editoru programu COMSOL Multiphysics, který využívá CAD nástroje. Dalšími možnostmi vytvoření modelu je pomocí příkazového řádku v programu MATLAB nebo importováním modelu popsáního 3D sítí ve formátu NASTRAN. Geometrický model se může skládat z více než jedné části, takovéto modely nazýváme soustavou. [4]

### 2.1.2 Zadání okrajových podmínek a vlastností modelu

Druhou a neméně důležitou částí při modelování v COMSOL Multiphysics je nadefinování okrajových podmínek a vlastností modelu. Různým částem geometrie přiřadíme takové vlastnosti, jaké na model působí v reálném prostředí, případně vlastnosti, jaké na model budou teprve působit. Každé části geometrie, ať už celé ploše, hraně nebo bodu, mohou být přiřazeny proměnné, výrazy nebo funkce. Při určování vlastností subdomén máme v nabídce možnost výběru z celé řady předdefinovaných materiálů a chemických prvků. Model může být sestaven z několika oblastí, z nichž každá může vykazovat vlastnosti jiného prostředí nebo materiálu. Do knihoven použitých materiálů a chemických prvků můžeme nadefinovat i svůj vlastní materiál, nebo vytvořit knihovnu vlastní. Díky tomu nejsou možnosti programu COMSOL Multiphysics z hlediska materiálu a prostředí nikterak omezeny. [4]

### 2.1.3 Generování FEM sítě

Jedná se o vygenerování sítě, v jejichž uzlových bodech dojde k výpočtu důležitých dat, potřebných ke konečnému zpracování a vygenerování výsledků. Síť lze generovat bez úprav automaticky nebo pomocí různých parametrů ovlivňovat vlastnosti sítě. K jednomu modelu lze nastavit několik variant sítí s různým typem a řádem elementů (například dle toho, jak vysoké jsou kladeny nároky na přesnost výsledků v jednotlivých částech modelu). Zkoumáme-li například změnu teploty pouze v určité části většího modelu, je zbytečné, aby byly prováděny stejně kvalitní výpočty i v místech modelu, kde nás výsledek tolik nezajímá. Vhodně vygenerovanou výpočetní sítí se dají znatelně snížit výkonové nároky počítačové soustavy na které model simulujeme, a zároveň můžeme znatelně snížit délku simulace. Vytvoření výpočetní

sítě souvisí s použitím řešiče pro danou úlohu. Standardně se řešení spustí z grafického rozhraní COMSOL Multiphysics. Postup modelování si však můžeme upravit pomocí funkcí programu v textovém M-souboru a k řešení využít program MATLAB a jeho příkazový řádek. [4]

#### 2.1.4 Řešení modelu

Výpočet řešení modelu se provádí pomocí řešičů, které jsou navrženy pro řešení lineárních a nelineárních úloh, úlohy v časové případně frekvenční oblasti a úlohy se zvoleným parametrem. Chceme-li řešit větší úlohu, využíváme tzv. segregované řešiče, které rozdělí řešení do skupin závisle proměnných a tyto jednotlivé skupiny následně vyhodnocuje a řeší postupně. Tímto postupem snížíme náročnost programu na využití operační paměti počítače. Postup modelování se standardně spouští z grafického prostředí COMSOL Multiphysics. Postup lze také definovat pomocí funkcí COMSOL Multiphysics v textovém M-souboru a k řešení modelu využít příkazové řádky programu MATLAB, který spuštěním M-souboru zahájí námi nadefinovaný postup řešení. [4]

#### 2.1.5 Výsledky řešení

Zpracování výsledků může program provést několika způsoby. Úlohy multifyzikálního charakteru obsahují různé typy vypočtených proměnných, které můžeme ve zvolených jednotkách zobrazit pomocí barevných map, proudnic, šipek, izočar, izoploch, částic nebo řezů. Úlohy řešené v čase lze animovat s možností zápisu do AVI, Quick Time případně GIF formátu. Další možností konečného zpracování je export do jednoduchých textových souborů. Výsledný model dále můžeme exportovat do prostředí MATLABu nebo do M-souboru. [4]

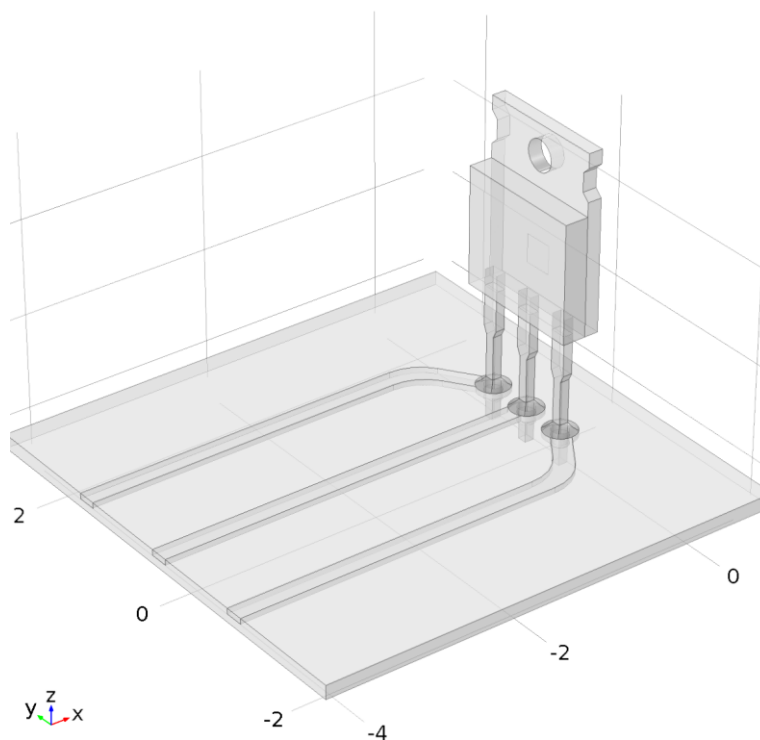
### 3 Modelování v COMSOL Multiphysics

Před prvotním spuštěním programu COMSOL Multiphysics je nutné si uvědomit, jaké fyzikální jevy chceme do modelu zahrnout, a v jaké prostorové dimenzi budeme tyto fyzikální jevy simulovat. V našem případě, kdy chceme simulovat chladič tranzistoru jedy zřejmé, že po spuštění programu zvolíme 3D dimenzi a ze stromové nabídky fyzik otevřeme složku *Heat Transfer*, v ní podsložku *Electromagnetic Heating* a následně vybereme *Joule Heating*. Fyzika *Joule Heating* obsahuje dvě podřadné fyziky a to *Electric Current* a *Heat Transfer in Solids*. Tyto dvě fyziky musíme vhodně nadefinovat, ale předtím než tak učiníme, je potřeba vytvořit geometrii modelu.

#### 3.1 Geometrie

Po základním nastavení programu je nutné vložit geometrii modelu (obr. 3.1). Zde byla zvolena jedna z předdefinovaných geometrií výkonového tranzistoru umístěného na malé desce plošných spojů o rozměrech 50 x 50 x 1,5 mm s vyznačenými trasami pro bázi, kolektor a emitor.

Samotný tranzistor je umístěn v pouzdře TO 220, které je charakteristické svým otvorem, díky kterému lze jednoduše připevnit pouzdro k chladiči.

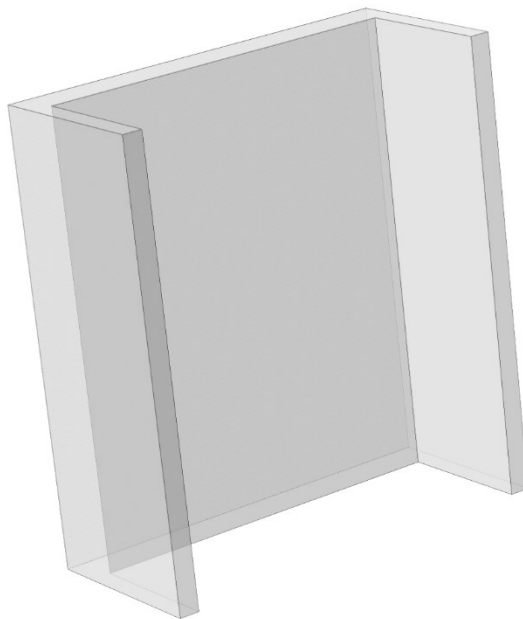


Obrázek 3.1: Geometrie tranzistoru v programu COMSOL Multiphysics

### 3.1.1 Geometrie chladiče

Abychom mohli chlazení pomocí programu modelovat, musíme si vytvořit také geometrii chladiče. Pro svou práci jsem se rozhodl modelovat chlazení pro tři různé geometrie chladičů lišících se zejména svou velikostí (plochou) a stylem žebrování. Návrhy geometrie těchto chladičů se dají do programu COMSOL Multiphysics importovat například z programu AutoCAD, nicméně já se rozhodl pro vytvoření geometrie chladičů přímo v programu COMSOL Multiphysics. Vytvoření takovéto geometrie probíhá pomocí různých operací, jako je například *block*, *difference*, *array*, *scale*, *move*, *delete entities* apod. Postup vytvoření jednoho z těchto chladičů pak může vypadat přibližně následovně.

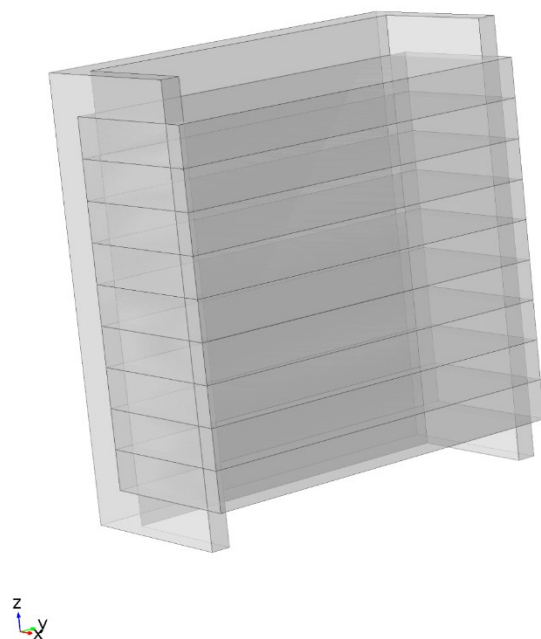
Jako první si vytvoříme pomocí geometrické funkce *block* kvádr, který se automaticky pojmenuje jako *block1*. Tento *block1* bude základní konstrukčním prvkem celého tohoto chladiče a všechny další operace se od něj budou odvíjet. Dalším krokem pro vytvoření geometrie tohoto chladiče je opět kvádr (*block2*) umístěný do stejného bodu jako *block1*. *Block2* má však o něco menší rozměry, a proto můžeme pomocí funkce *difference* (rozdíl), kterou najdeme ve skupině *boolean operations*, vytvořit geometrii vyobrazenou na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Chladič 1 – vytvoření základní geometrie

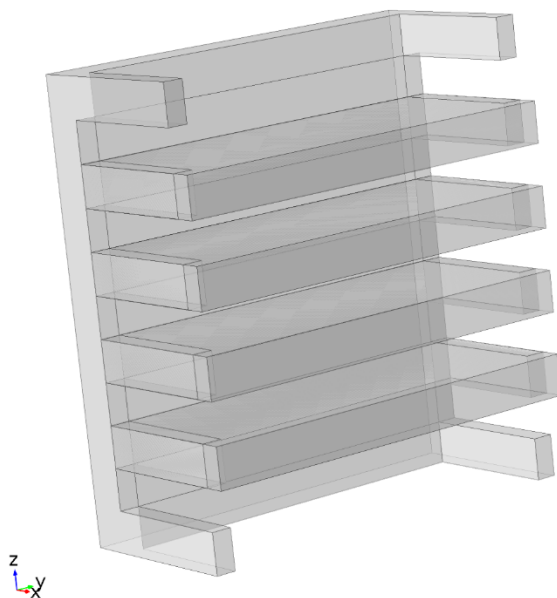
Žebrování vytvoříme pomocí dalšího bloku, který překrývá obě boční stěny již vytvořené geometrie. Abychom nemuseli vytvářet před následným odečtením několik těchto kvádrů o stejné velikosti, avšak v různých výškách, využil jsem funkce *array* (pole). Pomocí této funkce jsem rozmnožil *block3* na devět totožných bloků (obr. 3.3).





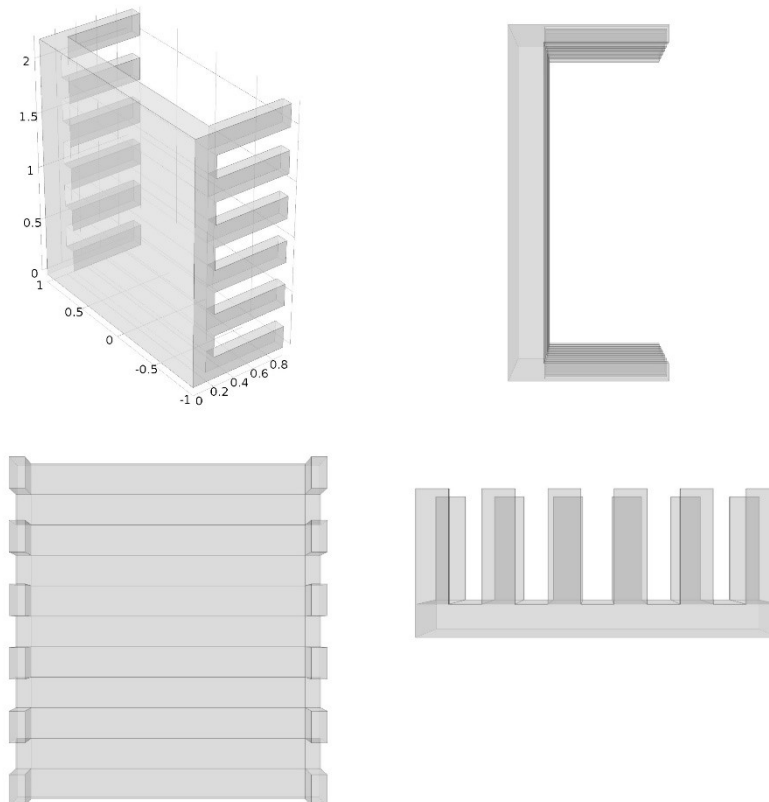
Obrázek 3.3: *Chladič 1 – vytvoření pole*

S takto vytvořeným modelem už můžeme pracovat tak, aby nám vzniklo požadované žebrování. Toho docílíme funkcí *difference* tak, že označíme dříve vytvořenou doménu s názvem *difference1* (obr. 3.2) a od ní odečteme každý lichý blok vytvořený pomocí *pole*. Nyní již máme vytvořený náznak žebrování (obr. 3.4).

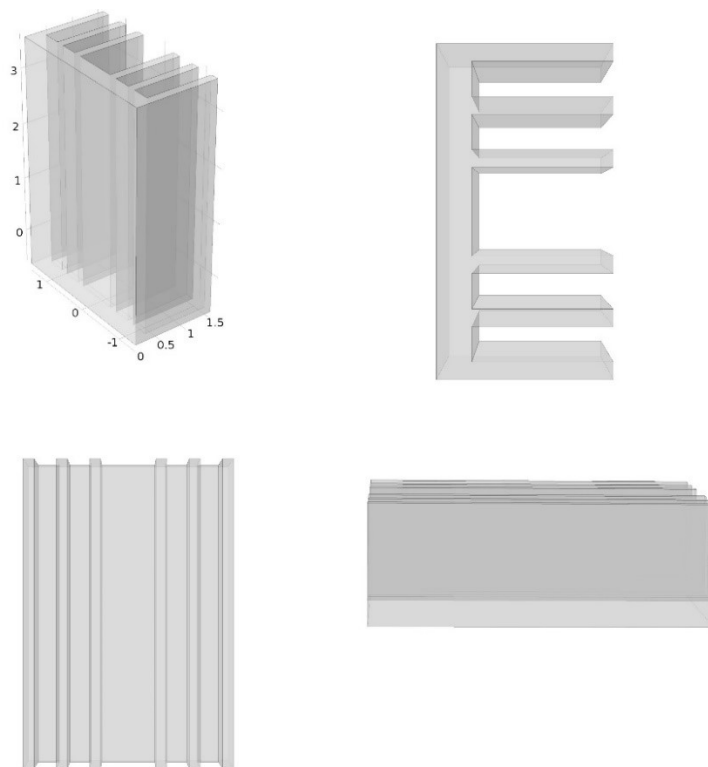


Obrázek 3.4: *Chladič 1 – průběh tvorby žebrování*

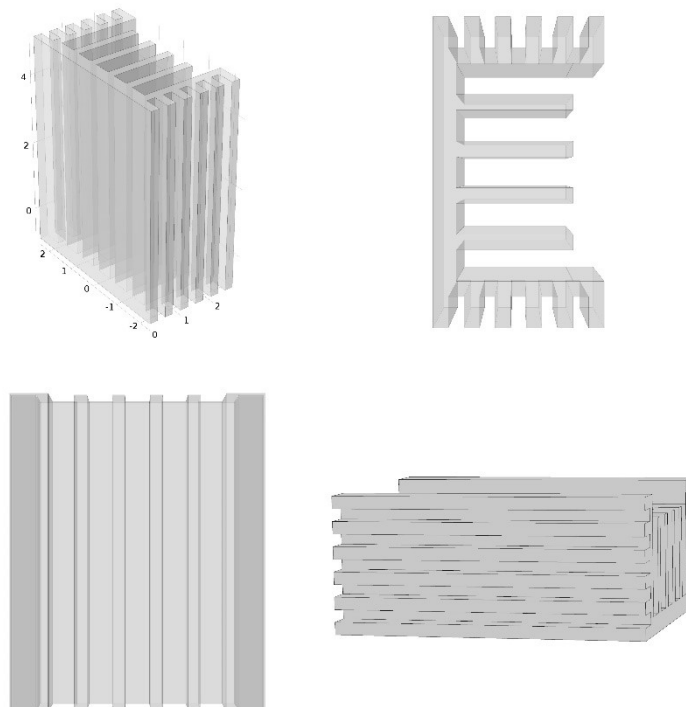
Jak vidíme, pro dokončení žebrování a celé geometrie tohoto chladiče musíme odstranit nadbytečné kvádry vytvořené již dříve pomocí pole. Abychom geometrii prvního chladiče dokončili, využijeme funkce *Delete Entities*, pomocí které odstraníme přebytečné kvádry. Výsledná geometrie prvního chladiče je na obr. 3.5.



Obrázek 3.5: *Geometrie chladiče 1*



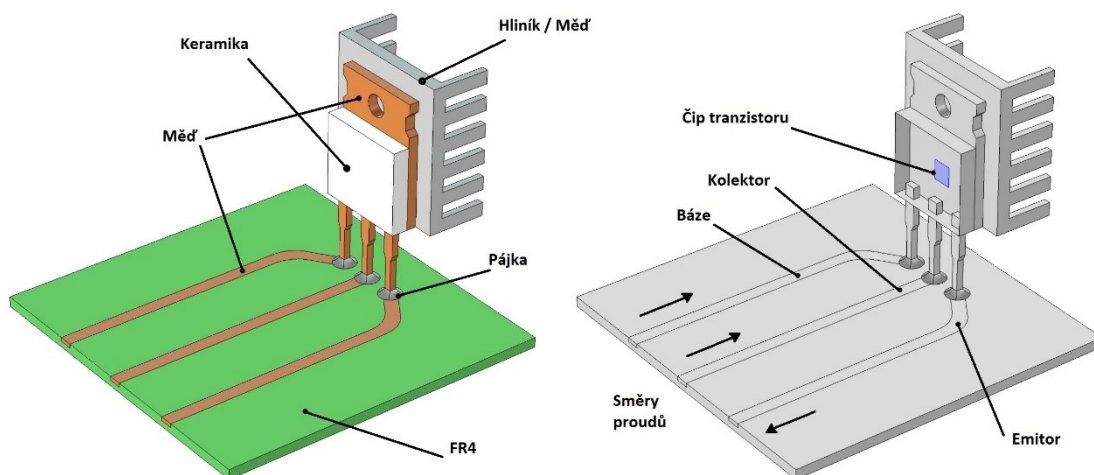
Obrázek 3.6: *Geometrie chladiče 2*



Obrázek 3.7: *Geometrie chladiče 3*

## 3.2 Zadání okrajových podmínek a vlastností modelu

Aby program COMSOL Multiphysics mohl správně pracovat, musíme dané geometrii přiřadit vhodné materiálové a fyzikální vlastnosti, nastavit proměnné a podobně. V následující kapitole se tedy budeme zabývat právě tím, jak program nastavit tak, aby model fungoval dle našich požadavků.



Obrázek 3.8: Zvolené materiály modelu a jeho fyzikální vlastnosti

### 3.2.1 Výběr vhodných materiálů

Výběr materiálu jak pro geometrii tranzistoru osazeného v pouzdře TO 220, tak pro samotný chladič, má zcela zásadní vliv na chování celého modelu v programu COMSOL Multiphysics. Jak lze vidět na obr. 3.8, tak pro model byly zvoleny materiály, které odpovídají materiálům používaných v praxi.

**Deska plošných spojů** – tato deska slouží k mechanickému upevnění a zároveň elektrickému propojení více elektronických prvků. V našem modelu je na tuto desku připojena pouze jedna součástka a to výkonový tranzistor. Tyto desky bývají nejčastěji vyráběny z laminátu ze skelné tkaniny syčené epoxidovou pryskyřicí [4]. Jedním z takovýchto nejběžněji používaných materiálů je materiál s označením FR4 (FR-4), a proto byl zvolen jako vhodný materiál pro náš model.

Zkratka FR znamená *flame retardant*, což se dá do češtiny přeložit jako materiál zpomalující hoření. Dalšími charakteristickými vlastnostmi tohoto materiálu, vyjma vysoké odolnosti proti hoření, je dobrá pevnost a dobré izolační vlastnosti i v prostorách se zvýšenou vlhkostí. [5]

**Měď** – dalším použitým materiálem je měď. Jak je všeobecně známo, měď je jedním z nejpoužívanějších materiálů k výrobě vodičů. Je tedy zřejmé, že měď dosahuje vysoké elektrické vodivosti. Další z charakteristických vlastností mědi je bezpochyby dobrá tepelná

vodivost a není tedy překvapením, že se tento materiál ve značné míře vyskytuje také v oblasti chlazení polovodičových součástek. Všechny tyto a jiné materiálové vlastnosti jsou zahrnuty v knihovně programu COMSOL Multiphysics, není však problém si tyto vlastnosti upravit dle vlastní iniciativy (obr. 3.9). Na stejném obrázku je také naznačeno, které z vlastností materiálu jsou pro daný fyzikální charakter úlohy aktivní.

Na obr. 3.8 lze vidět, že měď byla použita na domény představující vodivé trasy na desce plošných spojů, dále pak na piny tranzistoru představující bázi, emitor a kolektor. Posledním místem geometrie, kde byla měď aplikována, je zadní část pouzdra tranzistoru. Na tuto část se dle potřeby připevňuje chladič.

| Material Contents |                                     |                      |                |                   |                                    |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|
| »                 | Property                            | Name                 | Value          | Unit              | Property group                     |
| ✓                 | Electrical conductivity             | sigma                | 5.998e7[S/m]   | S/m               | Basic                              |
| ✓                 | Heat capacity at constant pressure  | Cp                   | 385[J/(kg*K)]  | J/(kg*K)          | Basic                              |
| ✓                 | Relative permittivity               | epsilon <sub>r</sub> | 1              | 1                 | Basic                              |
| ✓                 | Density                             | rho                  | 8700[kg/m...]  | kg/m <sup>3</sup> | Basic                              |
| ✓                 | Thermal conductivity                | k                    | 400[W/(m*...]  | W/(m*K)           | Basic                              |
|                   | Relative permeability               | mu <sub>r</sub>      | 1              | 1                 | Basic                              |
|                   | Coefficient of thermal expansion    | alpha                | 17e-6[1/K]     | 1/K               | Basic                              |
|                   | Young's modulus                     | E                    | 110e9[Pa]      | Pa                | Young's modulus and Poisson's r... |
|                   | Poisson's ratio                     | nu                   | 0.35           | 1                 | Young's modulus and Poisson's r... |
|                   | Reference resistivity               | rho <sub>0</sub>     | 1.72e-8[oh...] | Ω·m               | Linearized resistivity             |
|                   | Resistivity temperature coefficient | alpha                | 0.0039[1/K]    | 1/K               | Linearized resistivity             |
|                   | Reference temperature               | T <sub>ref</sub>     | 298[K]         | K                 | Linearized resistivity             |

Obrázek 3.9: Tabulka materiálových vlastností mědi

**Keramika** – je nekovový materiál nebo uhlíkový materiál vyrobený za vysokých teplot. Mezi charakteristické vlastnosti tohoto materiálu patří vysoká pevnost, nízká elektrická a tepelná vodivost, odolnost vůči vlhkosti. Mezi materiály označující se jako keramika se dnes zahrnují zejména slinuté karbidy kovů, oxid hlinitý Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, případně některé z nitridů a boridů. [6]

Jedním z takovýchto materiálů vhodných pro použití na přední straně pouzdra TO-220 je materiál pod názvem *silica glass*. Křemenné sklo, jak by se dal z angličtiny název přeložit, je jedním z materiálů s nízkou tepelnou a elektrickou vodivostí.

**Hliník** – je velmi lehký materiál stříbrně šedé barvy, který se často používá jako vodič díky své dobré elektrické vodivosti nebo jako materiál pro výrobu chladičů. Jak je na obr. 3.8 znázorněno, v našem modelu je z hliníku vyroben pouze chladič pouzdra TO-220.

**Pájka** – pájkami se rozumí kovy s nízkou teplotou tání. Pomocí těchto materiálů se pevně spojují různé materiály. V elektrotechnice se používají měkké pájky, obvykle slitiny cínu a olova s různými poměry těchto kovů. Pro náš spoj mezi měděnými trasami na desce plošných spojů a příslušnými piny tranzistoru byla zvolena slitina 60Sn-40Pb.

### 3.2.2 Zadání okrajových podmínek

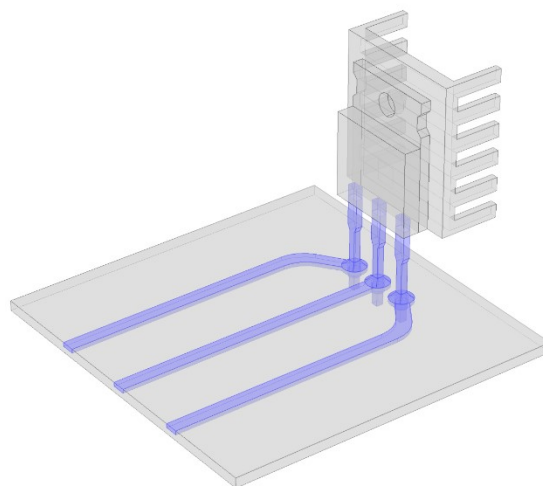
Zadání okrajových podmínek do simulačního programu můžeme provést hned několika způsoby a to pomocí funkcí, proměnných nebo výrazů. Jedním z nejpřehlednějších způsobů zadání těchto podmínek je pomocí tabulky proměnných (obr. 3.10).

| Parameters |               |                              |  |
|------------|---------------|------------------------------|--|
| Name       | Expression    | Value                        | Description                              |
| j_CE       | 1e5[A/m^2]    | 1.0000E5 A/m <sup>2</sup>    | Proudová hustota                         |
| h_coeff    | 5 [W/(m^2*K)] | 5.0000 W/(m <sup>2</sup> *K) | Součinitel přestupu tepla                |
| P_maxAB    | 3.33[W]       | 3.3300 W                     | Ztrátový výkon tranzistoru AB zesilovače |
| P_maxD     | 1.895[W]      | 1.8950 W                     | Ztrátový výkon tranzistoru D zesilovače  |
|            |               |                              |  |

Obrázek 3.10: Tabulka proměnných v programu COMSOL Multiphysics

#### Elektrický proud (Electric Current)

Jak již bylo dříve zmíněno, dle zvolených fyzik se nám otevřely příslušná dialogová okna s proměnnými, které je nutno nadefinovat. Jelikož pro některé domény geometrie modelu máme zvoleny materiály, které dokáží vést elektrický proud, ale v našem modelu nejsou určeny k vedení elektrického proudu (zádní měděná část pouzdra, chladič), musíme v záložce *Electric Current* zvolit pouze ty domény, v kterých pro daný model poteče proud (obr. 3.11). Označeny tedy byly měděné trasy v desce plošných spojů, slitina 60Sn-40Pb a měděné piny tranzistoru.



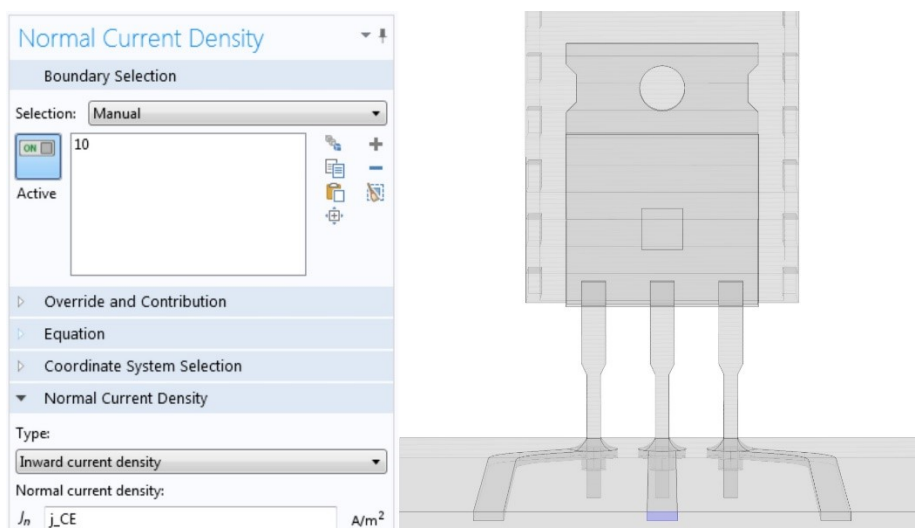
Obrázek 3.11: Volba domén vedoucí elektrický proud

Další věc, kterou musíme programu zadat, jsou samozřejmě vstupní proudy. Ty do modelu vstupují ve svislých hranicích (tzv. *boundaries*) měděných vodivých tras připojených k bázi, kolektoru a emitoru tranzistoru. Hodnoty těchto proudů se zadávají v jednotkách A/m<sup>2</sup> představující proudovou hustotu. Tuto proudovou hustotu už máme nadefinovanou v tabulce

proměnných (obr. 3.10) pod názvem  $j_{CE}$  a nyní jen zbývá tuto hodnotu přiřadit k příslušným měděným trasám.

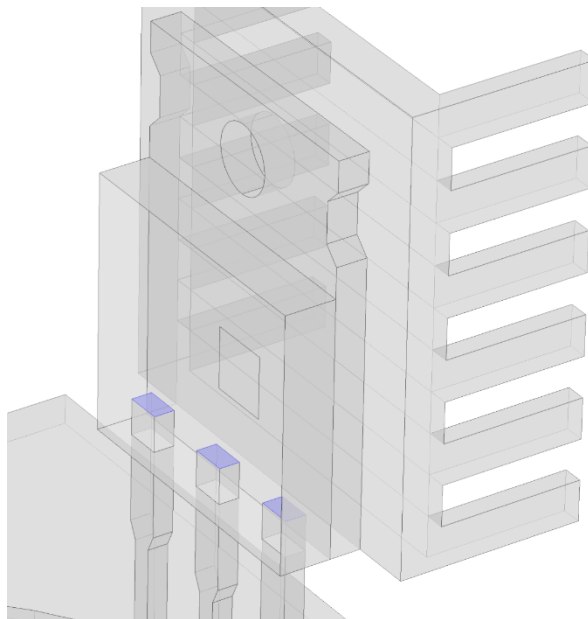
V záložce *Electric Current* manuálně přidáme tři vstupní veličiny a každou z nich si rozdílně pojmenujeme např. *Normal Current Density 1* (Emitor), *Normal Current Density 2* (Kolektor), *Normal Current Density 3* (Báze). Program samozřejmě nepozná, která z tras odpovídá emitorové, kolektorové případně bázevé trase, a tak je tyto trasy nutno nadefinovat tak, aby odpovídaly obr. 3.8. Nyní si ukážeme, jak nadefinovat proud, respektive proudovou hustotu např. kolektorové trasy. Zvolíme si tedy *Normal Current Density 2* (Kolektor) a v ní vybereme hranici (*boundary*) s číselným označením 10, která odpovídá kolektorové trase. Nyní ve stejné záložce změním typ proudové hustoty z *Current density* na *Inward current density* a do příslušného pole vepíšeme proměnnou  $j_{CE}$  odpovídající hodnotě v tabulce na obr. 3.10. Jak by měla v programu COMSOL Multiphysics vypadat správně nastavená proudová hustota emitorové trasy, je pro lepší přehlednost zobrazeno na obr. 3.12.

Obdobným způsobem nastavíme proudovou hustotu báze a emitoru. Hodnota bázevého proudu na hranici měděné trasy báze je 1 mA, kolektorové trasy 100 mA a emitorové trasy 99 mA.



Obrázek 3.12: Nastavení proudové hustoty kolektorové trasy

Poslední vlastnost, kterou musíme v *Electric Current* nastavit je zem (*ground*). Zem zvolíme na jednotlivé zakončení pinů tranzistoru v přední části pouzdra (obr. 3.13).



Obrázek 3.13: Nastavení země modelu tranzistoru

### ***Přenos tepla v pevných látkách (Heat Transfer in Solids)***

Přenos tepla je složitý náročný fyzikální děj. Obecně můžeme sdílení tepla rozdělit na tepelnou výměnu vedením (kondukcí), tepelnou výměnu prouděním (konvekci) a tepelnou výměnu sáláním (zářením).

Při vedení tepla předávají částice látky v oblasti s vyšší teplotou část své střední energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v místech s nižší teplotou, tj. majícím nižší střední energii. Při tomto ději se však částice nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. S takovýmto šířením tepla se nejčastěji setkáváme u těles z pevných látek, jejichž různé části mají jiné teploty. Výše popsaný přenos tepla nazýváme přenosem tepla vedením a spočívá v přenosu tepla ve směru klesající teploty. [7]

K přenosu tepla prouděním dochází například při kontaktu pevné látky s plynem nebo kapalinou. V takovýchto případech dochází k ochlazování případně oteplování vrstvy kapaliny nebo plynu kolem pevné látky. Vzniklé rozdíly teplot pak způsobují přirozené proudění.

Přenos tepla sáláním souvisí se změnami vnitřní energie tělesa, které následně vydává záření. Toto záření je vysíláno do prostředí obklopující těleso prostřednictvím elektromagnetických vln. V případě, že tyto vlny dopadnou na jiné těleso, předá se část vyzářené energie tomuto tělesu. Může se ale také stát, že těleso toto záření odrazí. Zda-li těleso energii pohltí nebo odrazí, se odvíjí zejména na jakosti a barvě povrchu tohoto tělesa. [7]

Obdobným způsobem jako jsme nastavovali *Electric Currents*, nyní musíme nastavit záložku *Heat Transfer in Solids*. Jako první si v ní označíme všechny domény a tím programu



řekneme, že k přenosu tepla dochází ve všech doménách modelu. Důležitým parametrem, který musíme zadat je součinitel přenosu tepla (*Heat Transfer Coefficient*).

Součinitel přestupu tepla udává tepelný tok, přestupující ze stěn modelu do prostředí. Velikost součinitele přestupu tepla se nedá obecně nijak vyjádřit, protože je ovlivňována řadou faktorů, jako je rychlost proudění plynu (kapaliny), tlak, tvar, rozměry, drsnost stěn a další. Při průchodu tepla rozhraním se počítá se součinitelem přestupu tepla, jehož velikost pro klidný vzduch udává hodnotu 3–10 kcal.m<sup>-2</sup>.C<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Toto rozmezí pro klidový vzduch můžeme převést na 3,5–12 W.m<sup>-2</sup>.C<sup>-1</sup>. [7, 8]

Jak už bylo zmíněno, součinitel přestupu tepla se udává pro přenos tepla prouděním (*Convective Heat Flux*), a tak v příslušné záložce změním součinitel udávaný jako *h* na hodnotu proměnné *h\_coeff*, která je nastavená v tabulce proměnných (obr. 3.10). Ve stejné záložce ještě nastavíme externí teplotu pro všechny části geometrie na  $T_{ext} = 313,15$  K, což odpovídá 40 °C. Nastavením této teploty chceme simulovat přibližnou teplotu okolí v krabici, v které je tento tranzistor umístěn.

V tranzistoru vzniká teplo převážně na čipu tranzistoru. Tento čip má velmi tenkou strukturu a v našem modelu představuje tento čip tenká plocha umístěná mezi keramickou a měděnou částí pouzdra (obr. 3.8). V reálném zapojení bývá čip samozřejmě spojen s piny tranzistoru. Toto spojení má však zanedbatelný vliv na přenos tepla, a tak jej v našem modelu neuvažujeme. Jelikož tato tenká plocha představující čip je zdrojem tepla tranzistoru, zvolíme ji jako tzv. *Boundary Heat Source*. Nyní nám zbývá nadefinovat, jak velký výkon se má v čipu tranzistoru změnit na teplo.

### Výpočet ztrátového výkonu

Jak z teorie víme, zesilovače ve třídách AB a D nejenže pracují jinak, ale disponují také jinou účinností, a tedy i jiným ztrátovým výkonem, který se mění zejména v tranzistorech na teplo. Vzhledem k tomu, že nás v naší modelaci zajímá to, jak se bude tranzistor v dané třídě oteplovat, musíme si tento ztrátový výkon pro dané třídy spočítat.

#### Ztrátový výkon zesilovače pracujícího ve třídě AB

U zesilovačů pracujících v této třídě je maximální teoretická účinnost kolem 70 %, reálná o trochu nižší. Je tedy zřejmé, že zbylých přibližně 30 % se změní na teplo, které je potřeba z koncových tranzistorů odvést a rozptýlit do okolí. K tomuto účelu nám slouží navrhované chladiče.

Uvažujeme-li výstupní výkon dvojčinného zapojení koncových tranzistorů 20W při práci ve třídě AB, dá se maximální ztrátový výkon spočítat jako (dle [9])

$$P_{\max(AB)} = \frac{P_{OUT}}{3} = \frac{20}{3} = 6,66 \text{ W}. \quad (3.1)$$

Vzhledem k tomu, že koncový výkonový stupeň dvojčinného zapojení je osazen dvěma výkonovými tranzistory, musíme tento vypočtený ztrátový výkon vydělit počtem těchto tranzistorů a tím zjistíme ztrátový výkon jednoho z těchto tranzistorů.

$$P_{\max(\text{AB})} = \frac{6,66}{2} = 3,33 \text{ W} \quad (3.2)$$

### Ztrátový výkon zesilovače pracujícího ve třídě D

Abychom tyto dvě třídy mohli úspěšně porovnávat, musíme spočítat také ztrátový výkon na jednom z tranzistorů koncového stupně zesilovače, pracujícího ve třídě D. Ztrátový výkon počítáme pro výkon zesilovače 20 W při zátěži 4  $\Omega$ . Předpokládejme, že spínací frekvence koncových tranzistorů je  $f_{\text{spínací}} = 300 \text{ kHz}$  a budící napětí na hradle „gate“ tranzistoru MOSFET je  $U_{\text{GS}} = 12 \text{ V}$ .

Jako první si vybereme vhodný výkonový tranzistor, pro který budeme ztrátový výkon počítat. Pomocí vzorce vypočítáme minimální průrazné napětí [10].

$$U_{\text{DSmin}} = \frac{\sqrt{2 \cdot P_{\text{OUT}} \cdot R_Z}}{M} + 40 \% = 17,7 \text{ V} \quad (3.3)$$

Velmi důležité je volit tranzistor tak, aby hodnota tranzistoru  $U_{\text{DSmax}}$  byla co nejmenší, ale rozhodně ne menší, než hodnota vypočtená vztahem 3.3. Dle uvedených požadavků na výkonový tranzistor byl vybrán tranzistor IRF1404 s parametry uvedenými v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: *Parametry tranzistoru IRF1404 potřebné k výpočtu ztrátového výkonu [11]*

|                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Průrazné napětí                   | $U_{\text{DS}} = 40 \text{ V}$      |
| Statický odpor                    | $R_{\text{DS-on}} = 0,004 \Omega$   |
| Celkový náboj hradla              | $Q_{\text{G}} = 200 \text{ nC}$     |
| Výstupní kapacita tranzistoru     | $C_{\text{OSS}} = 1680 \text{ pF}$  |
| Komutační náboj integrované diody | $Q_{\text{rr}} = 270 \text{ nC}$    |
| Zpoždění sepnutí                  | $t_{\text{d(on)}} = 17 \text{ ns}$  |
| Zpoždění vypnutí                  | $t_{\text{d(off)}} = 72 \text{ ns}$ |

K tomu, abychom vypočetli ztrátový výkon tranzistoru, musíme dále znát napájecí napětí tranzistoru  $U_{\text{nap}}$  a maximální proud elektrodou  $I_{\text{Dmax}}$ .

Napájecí napětí tranzistoru [10]

$$U_{\text{nap}} \geq 2 \cdot \sqrt{P_{\text{OUT}} \cdot R_Z} = 17,9 \text{ V} \quad (3.4)$$

K tomuto výsledku byla připočtena určitá rezerva, a tak výsledné napájecí napětí je  $U_{\text{nap}} = 20 \text{ V}$ .

Maximální proud elektrodou je určen vztahem

$$I_{\text{Dmax}} = \sqrt{\frac{P_{\text{OUT}}}{R_Z}} = 2,24 \text{ A} \quad (3.5)$$

Při výpočtu spínacího ztrátového výkonu používáme střední hodnotu proudu  $I_D$  počítanou dle

$$I_{D\text{stř}} = \frac{I_{D\text{max}} \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = 2,01 \text{ A} \quad (3.6)$$

Nyní známe všechny hodnoty potřebné pro výpočet ztrátového výkonu tranzistoru [dle 12]. Tyto ztráty se skládají ze dvou druhů ztrát. Jejich součtem získáme celkové ztráty výkonového tranzistoru.

$$P_{D(\text{max})} = P_{\text{vedením}} + P_{\text{spínací-celkové}} \quad (3.7)$$

Výkonová ztráta vedením proudu  $P_{\text{vedením}}$  není nulová, což je zapříčiněno nenulovým odporem kanálu MOSFET ve vodivém stavu. Odpor kanálu  $R_{DS(\text{ON})}$  je silně teplotně závislý a v katalogových listech bývá uveden pro teplotu čipu  $T_j = 25 \text{ °C}$ . V praxi však bývá teplota čipu daleko větší, a proto je ve vzorci 3.8 uvažováno s dvojnásobnou hodnotou odporu  $R_{DS(\text{ON})}$ . [12]

$$P_{\text{vedením}} = I_{D\text{max}}^2 \cdot 2 \cdot R_{DS(\text{ON})} = 0,04 \text{ W} \quad (3.8)$$

Spínací ztráty MOSFET tranzistoru v přechodových dějích získáme součtem ztrát vypočtených pomocí vzorců 3.9 a 3.10. [12]

$$P_{\text{spínací}} = \frac{5}{24} \cdot I_D \cdot U_{\text{nap}} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{\text{spínací}} + \frac{1}{2} \cdot C_{\text{OSS}} \cdot U_{\text{nap}}^2 \cdot f_{\text{spínací}} + \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{rr}} \cdot U_{\text{nap}} \cdot f_{\text{spínací}} = 1,135 \text{ W} \quad (3.9)$$

Po sepnutí, případně rozepnut výkonového tranzistoru je nezbytné přivést na elektrodu (*gate*) určité množství náboje. Přenosem tohoto náboje vznikají ztráty  $P_{\text{hradlo}}$  na MOSFET tranzistoru.

$$P_{\text{hradlo}} = Q_G \cdot U_{\text{budič}} \cdot f_{\text{spínací}} = 0,72 \text{ W} \quad (3.10)$$

Celkové spínací ztráty jednoho výkonového tranzistoru v zesilovači D jsou:

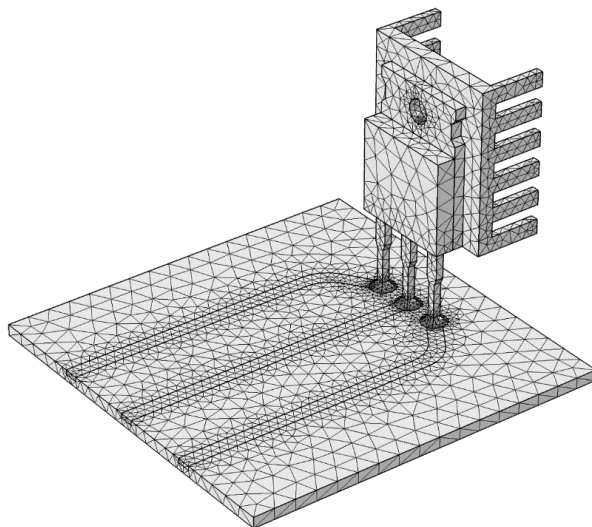
$$P_{\text{spínací-celkové}} = P_{\text{spínací}} + P_{\text{hradlo}} = 1,855 \text{ W} \quad (3.11)$$

Celkový maximální ztrátový výkon na jednom výkonovém tranzistoru zesilovače pracujícího ve třídě D

$$P_{D(\text{max})} = P_{\text{vedením}} + P_{\text{spínací-celkové}} = 1,895 \text{ W} \quad (3.12)$$

### 3.3 Generování FEM sítě

Jak již bylo zmíněno ve druhé kapitole, FEM síť slouží k získání uzlových bodů, pro které dochází k výpočtu daného modelu. Může mít znatelný vliv na výpočet výsledků a na délku simulace. Pro svoji úlohu jsem zvolil tzv. *Free Tetrahedral Mesh* s klasickou velikostí. Počet stupňů volnosti modelu bylo 64981.



Obrázek 3.14: Vytvoření sítě pro výpočet modelu

### 3.4 Řešení modelu

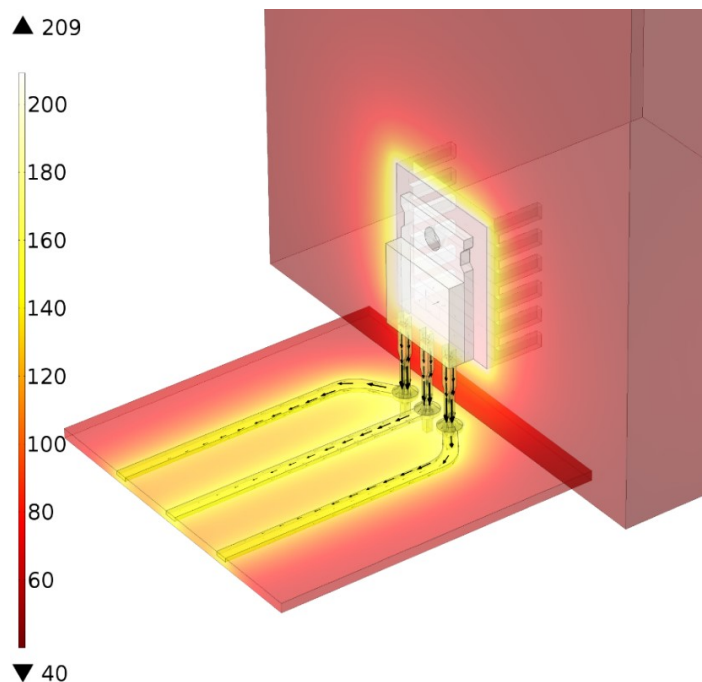
Poslední věcí, kterou musíme zvolit je řešič úlohy. V nabídce programu je celá škála řešičů jako např. frekvenční, časově závislý, parametrický případně stacionární řešič. V našem případě nás zajímá, na jaké teplotě se hodnota chladiče ustálí a za jak dlouho, a proto zvolíme časově závislý řešič (*Time Dependent*).

### 3.5 Výsledky řešení modelu

Řešeními našeho modelu jsou teplotní mapy pro tranzistor koncového stupně zesilovače pracujícího ve třídě AB a D. Modelování v těchto třídách probíhalo vždy pro všechny tři druhy hliníkových chladičů. Pro dosažení lepších výsledků, byla do geometrie modelu přidána krychle se vzduchem obklopující povrch chladiče (obr. 3.15), díky čemuž dochází k přenosu tepla vedením i mezi žebrováním chladiče. Maximální teploty a doby ustálení jednotlivých chladičů byly zaznamenány do tabulky 3.2.

#### 3.5.1 Chladič č. 1

První z navrhovaných chladičů je stejně jako ostatní chladiče vyroben z hliníku. Oproti ostatním chladičům má malou plochu a to 15,52 cm<sup>2</sup>.

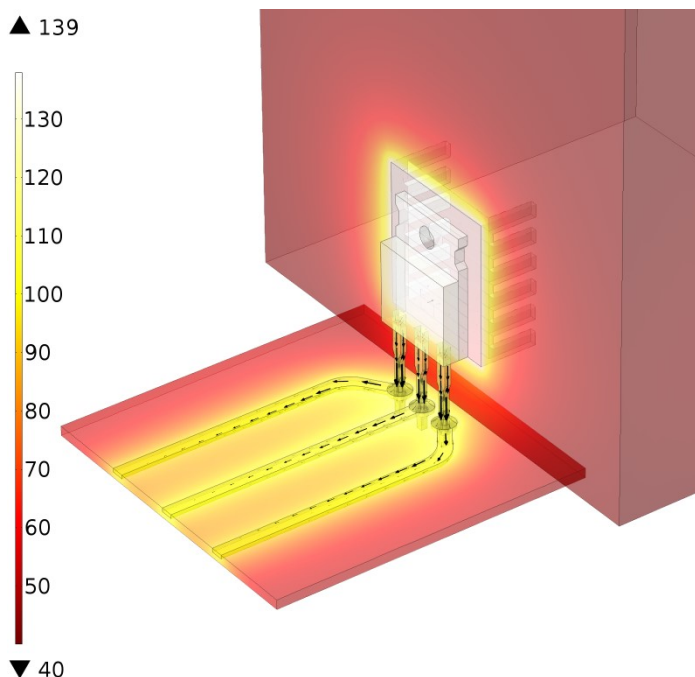


Obrázek 3.15: *Povrchová teplota tranzistoru koncového stupně zesilovače ve třídě AB s chladičem č. 1*

Jak lze vidět (obr. 3.15), maximální povrchová teplota tranzistoru v zesilovači třídy AB s daným ztrátovým výkonem a připevněným chladičem č. 1 byla 209 °C v ustáleném stavu, který nastal po 41 minutách. Oproti tomu při simulaci bez chladiče, kdy ustálená povrchová teplota modelu dosahovala hodnoty 250 °C, tak došlo přidáním tohoto chladiče k poklesu teploty o 41 °C. Malé šipky na pinech tranzistoru a ve vodivých trasách na desce plošných spojů jsou vektory, znázorňují směry šíření tepla. Teplotní mapy tohoto modelu v různých časech (1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 29 min) jsou uvedeny v příloze A.

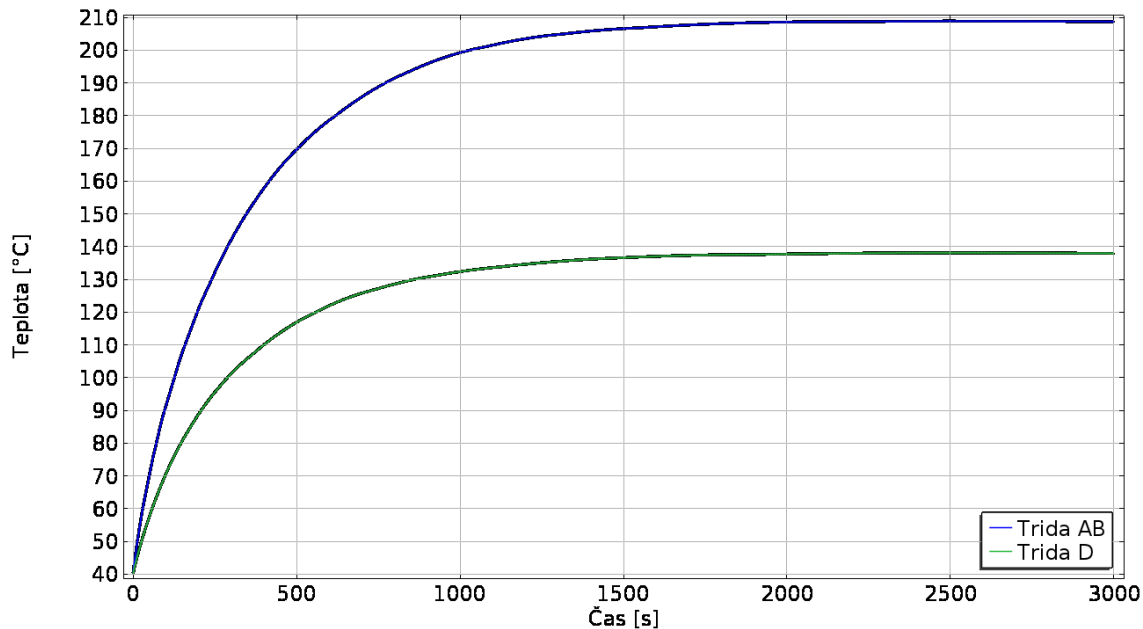
Jak lze dále vidět (obr. 3.15), tak přestože bazový proud odpovídá setině kolektorového proudu, je na jejich trasách téměř totožná teplota. Tento fakt můžeme odůvodnit vysokou teplotní vodivostí měděných tras. Dochází tedy k přenosu tepla nejen z pouzdra na chladič, ale také z pinů tranzistoru na vodivé trasy a ty dále oteplují desku plošných spojů.

Jakých ustálených povrchových teplot dosahoval model tranzistoru s tímto chladičem při práci zesilovače ve třídě D je vidět na následujícím obrázku (obr. 3.16). V příloze B jsou povrchové teploty tohoto modelu opět ve stejných časech (vyjma ustáleného stavu) jako pro třídu AB.



Obrázek 3.16: *Povrchová teplota tranzistoru koncového stupně zesilovače ve třídě D s chladičem č. 1*

K lepšímu porovnávání těchto dvou tříd tranzistorových zesilovačů s připevněným chladičem č. 1, byl z programu exportován graf závislosti povrchové teploty na čase (obr. 3.17).



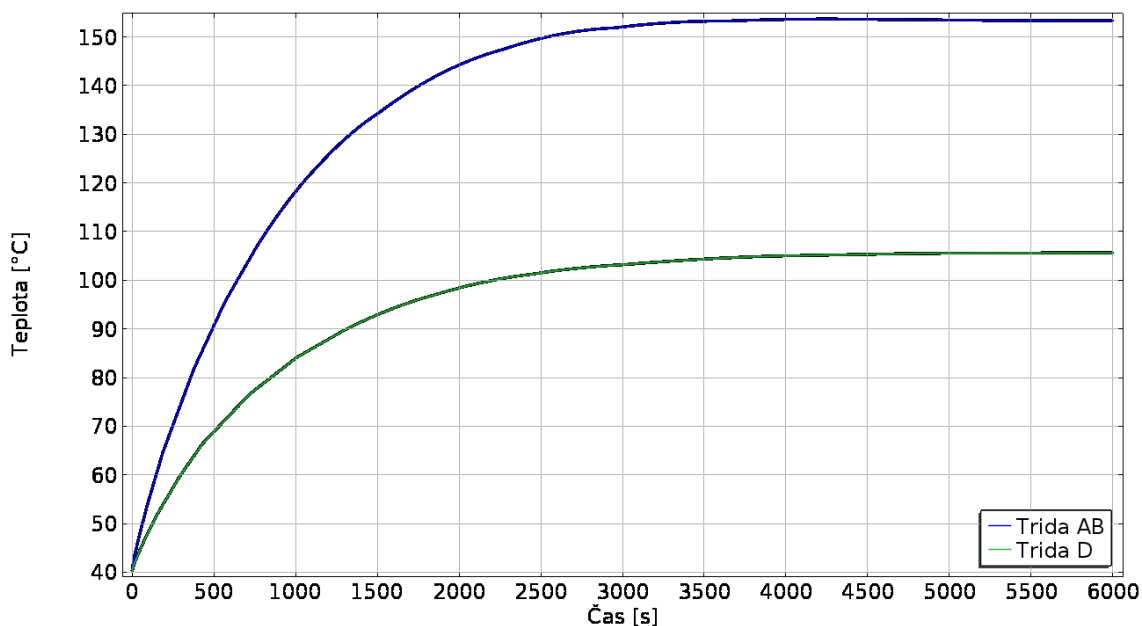
Obrázek 3.17: *Maximální povrchová teplota chladiče tranzistoru pro třídu AB a D*

Z grafu (obr. 3.17) lze vidět, že povrchová teplota modelu narůstá v obou třídách nelineárně a ve třídě AB se ustálí na teplotě 209 °C, za to u modelu tranzistoru ve třídě D se

teplota ustálí na 139 °C. Pro obě tyto třídy s chladičem č. 1 se teplota ustálí přibližně po 40 minutách od počátku působení ztrátového výkonu. Lze také vidět, že maximální povrchová teplota tranzistoru s daným chladičem je výrazně nižší ve třídě D, a to o 70 °C oproti třídě AB.

### 3.5.2 Chladič č. 2

Plocha druhého chladiče je necelých 91 cm<sup>2</sup> a je tedy téměř šestkrát větší než plocha prvního chladiče. K navýšení plochy tohoto chladiče došlo navržením jiného stylu žebrování.

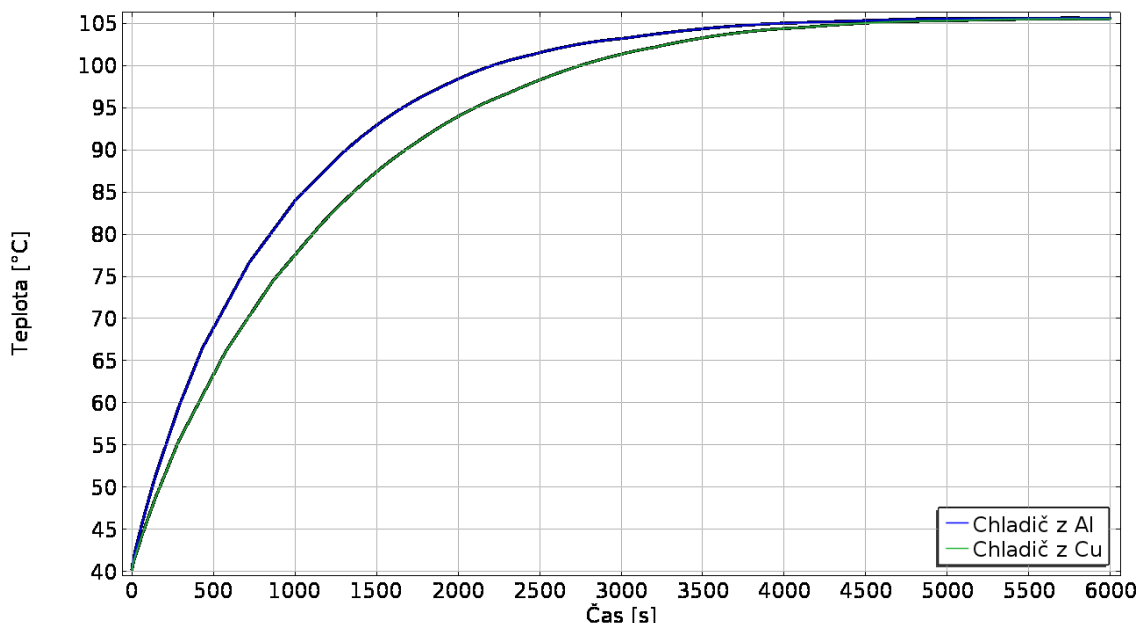


Obrázek 3.18: Maximální povrchová teplota chladiče tranzistoru pro třídu AB a D

Z grafu výše (obr 3.18) lze odečíst maximální povrchové teploty modelu. U modelu představující tranzistor zesilovače pracujícího ve třídě AB byla ustálená povrchová teplota vypočtená simulačním programem 154 °C. Z grafu je těžké určit přesnou dobu ustálení teploty chladiče a to z důvodu velmi malé změny teploty v časech před ustáleným stavem. Tato teplota se mění o méně než desetinu stupně za dobu 10 minut, a proto jsem se rozhodl určit přesnou dobu ustálení z tabulek generovaných simulačním programem. Z nich bylo zjištěno, že tento chladič dosáhne ustáleného stavu teploty po 71 minutách od začátku působení ztrátového výkonu třídy AB a po 95 minutách při simulaci zesilovače třídy D. Rozdíl mezi těmito ustálenými stavy tak činí 24 minut. Teplota při ustáleném stavu zesilovače třídy D byla  $T_{\max} = 106$  °C.

V příloze C jsou zaznamenány teplotní mapy modelu tranzistoru ve třídě AB v různých časech (1 min, 2 min, 5 min, 15 min, 25 min, 71 min). Teplotní mapy modelu tranzistoru zesilovače pracujícího ve třídě D s chladičem č. 2 jsou uvedeny v příloze D.

U tohoto chladiče jsem se rozhodl navíc simulovat chlazení tranzistorového zesilovače ve třídě D jak pro chladič z hliníku, tak pro chladič vyrobený z mědi. Teplotní časové závislosti jsou vyneseny do grafu na obr. 3.19.



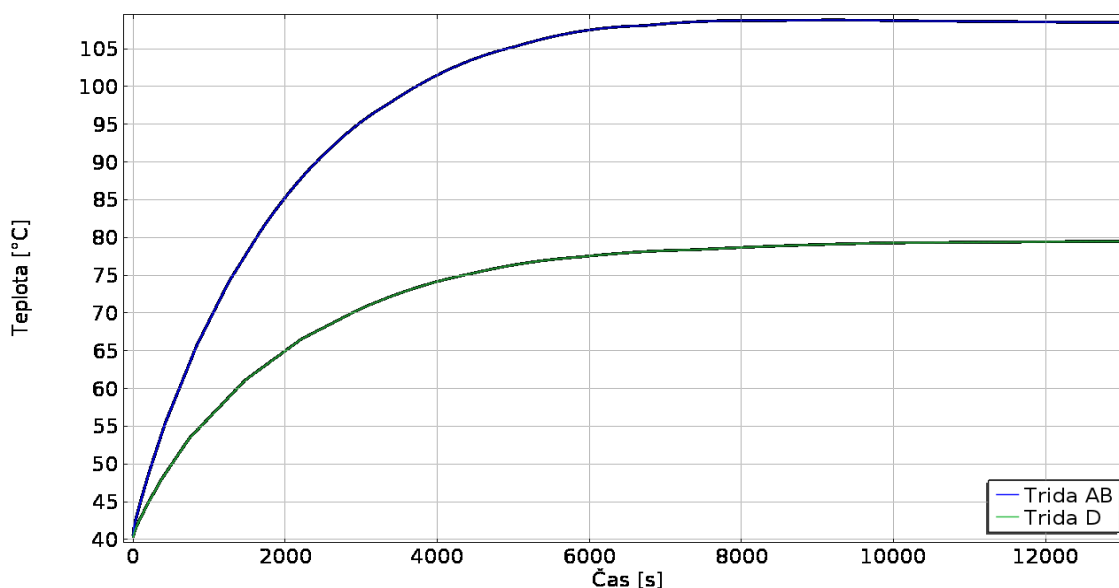
Obrázek 3.19: Maximální povrchová teplota hliníkového a měděného chladiče tranzistoru koncového stupně zesilovače třídy D

Tento graf (obr. 3.19) nám v podstatě ukazuje fyzikální vlastnosti chladičů vyrobených z mědi a hliníku. Měrná tepelná kapacita hliníku je  $896 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , zatímco měď má měrnou tepelnou kapacitu  $383 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Proto chladiče vyráběné z hliníku dokáží naakumulovat větší množství tepla, než měděné chladiče. Naproti tomu měď má vyšší tepelnou vodivost ( $384 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) než hliník ( $204 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), a proto dokáže odvádět teplo rychleji. Z grafu jde vidět, že při zachování velikosti chladiče a velikosti ztrátového výkonu, dochází k ustálení maximální teploty jak u hliníkové, tak u měděného chladiče ve stejný čas. Maximální povrchová teplota chladiče v provedení z mědi i hliníku byla  $T_{\text{max}} = 106 \text{ °C}$  a nastala v čase  $t = 95 \text{ min}$ .

### 3.5.3 Chladič č. 3

Chladič č. 3 se opět liší jiným stylem žebrování, které je členitější oproti předchozím chladičům. Těmito úpravami došlo k nárůstu celkové plochy chladiče na  $189 \text{ cm}^2$ , což odpovídá přibližně dvojnásobku plochy předešlého chladiče (chladiče č. 2). Můžeme tedy očekávat nejnižší povrchové teploty modelu jak pro AB, tak pro D třídu.





Obrázek 3.20: Maximální povrchová teplota chladiče tranzistoru pro třídu AB a D

Z grafu (obr 3.20) lze vidět, že ustálených hodnot dosahuje tento chladič za znatelně delší dobu, než předchozí chladiče. Vzhledem k těmto vysokým dobám ustálení bylo nutné nastavit délku simulace na 13000 sekund s krokem 10 s. Délka simulace s takto nastavenými časovými parametry trvala déle než hodinu pro každou třídu.

Při chlazení modelu tranzistoru ve třídě AB došlo k ustálení teploty po 154 minutách od začátku působení ztrátového výkonu na čip tranzistoru. V ustáleném čase je na chladiči maximální povrchová teplota  $T_{\max} = 109\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní mapy tohoto modelu jsou uvedeny v příloze E.

Nejnižších povrchových teplot ze všech simulací, dosahovat chladič při simulaci modelu tranzistoru ve třídě D právě s tímto chladičem. Jako jediný ze zkoumaných chladičů se dostal pod hranici  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Doba ustálení tohoto chladiče byla vypočtena na 210 minut a teplota se ustálila na  $T_{\max} = 79,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní mapy modelu v různých časech jsou uvedeny v příloze F.

### 3.5.4 Tabulka výsledků řešení

K porovnání jednotlivých chladičů pro modely pracující v zadaných třídách byla vytvořena tabulka 3.2. Tato tabulka uvádí třídu zesilovače, typ a plochu chladiče, maximální teplotu  $T_{\max}$ , dobu ustálení a označení přílohy, ve které jsou zaznamenány teplotní mapy pro různé časy konkrétního modelu.

Tabulka 3.2: Výsledky řešení simulace

| Třída                             | AB  |       |      |      | D   |       |      |      |
|-----------------------------------|-----|-------|------|------|-----|-------|------|------|
| Chladič                           | bez | č. 1  | č. 2 | č. 3 | bez | č. 1  | č. 2 | č. 3 |
| Plocha chladiče [ $\text{cm}^2$ ] | 0   | 15,52 | 90,8 | 189  | 0   | 15,52 | 90,8 | 189  |
| $T_{\max}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 250 | 209   | 154  | 109  | 161 | 139   | 106  | 79,6 |
| Doba ustálení [min]               | 38  | 41    | 71   | 154  | 31  | 42    | 95   | 210  |
| Příloha                           | /   | A     | C    | E    | /   | B     | D    | F    |

Z tabulky 3.2 je jednoduché vypočítat, že nižších povrchových hodnot dosahovaly modely tranzistoru s nižším ztrátovým výkonem, tedy modely tranzistorů koncového stupně zesilovače ve třídě D. Maximální ztrátový výkon na tranzistoru zesilovače třídy AB byl  $P_{\max(AB)} = 3,33 \text{ W}$  a u třídy D byl ztrátový výkon  $P_{\max(D)} = 1,895 \text{ W}$ , to odpovídá přibližně 43% snížení ztrátového výkonu použitím třídy D namísto třídy AB. To ovšem neznamená, že při aplikaci těchto ztrátových výkonů na čip tranzistoru se ve stejném poměru změní i maximální dosažené povrchové teploty. Například při použití prvního chladiče se teplota  $T_{\max}$  ve třídě D ustálila na hodnotě  $T_{\max} = 139 \text{ °C}$ , a to znamenalo snížení teploty o 33 % oproti teplotě dosažené simulací zesilovače ve třídě AB. Ačkoli se tedy zmenšil ztrátový výkon zesilovače třídy D o 43 %, tak teplota při použití prvního chladiče klesla jen o 37 %.

Takto vyjádřený poměr mezi ustálenými teplotami zesilovače třídy AB a zesilovačem třídy D není pro všechny chladiče stejný. Pro model s chladičem č. 2 klesla použitím tranzistorového zesilovače třídy D, namísto tranzistorového zesilovače třídy AB, teplota o 31 %, a u modelu s chladičem č. 3 klesla teplota modelu třídy D o 27 % oproti teplotě modelu ve třídě AB.

Největší měrou se na teplotě modelu projeví velikost povrchu chladiče. První z navrhovaných chladičů má plochu pouze  $15,2 \text{ cm}^2$ . Chladič dle výsledků simulace nedokáže dostatečně odvést teplo z čipu tranzistoru a model tak dosahuje značných povrchových teplot jak ve třídě D, tak zejména ve třídě AB, kde  $T_{\max}$  přesáhla hodnotu  $200 \text{ °C}$ . Po zvětšení plochy chladiče na  $90,8 \text{ cm}^2$ , tedy téměř šestinásobně, se teplota modelu snížila o  $55 \text{ °C}$  na  $154 \text{ °C}$  ve třídě AB. Můžeme tedy říct, že druhý z navržených chladičů byl o 26 % efektivnější, než první chladič. Plocha třetího chladiče je  $189 \text{ cm}^2$ , což je přibližně dvanáctinásobek prvního chladiče. Z tabulky 3.2 lze vyčíst, že teplota ve třídě AB s použitím právě třetího chladiče klesla oproti prvnímu chladiči z  $209 \text{ °C}$  na  $109 \text{ °C}$ . Z toho vyplývá, že použitím třetího chladiče namísto chladiče č. 1 klesne teplota o  $100 \text{ °C}$  tedy o 48 %.

Porovnáme-li chladiče a jejich efektivitu stejným způsobem také pro model tranzistoru ve třídě D zjistíme, že v této třídě je druhý z navržených chladičů o 24 % efektivnější, než chladič první. Třetí chladič je oproti prvnímu chladiči efektivnější o 54 %.

Doba ustálení teploty modelu závisí zejména na velikosti chladiče, ale také na velikosti ztrátového výkonu, který se na čipu tranzistoru mění v teplo. Z výsledků simulace (tabulka 3.2) vidíme, že chladiče s malou plochou dosáhnou ustálené teploty v řádech desítek minut, zatímco např. chladič s plochou  $189 \text{ cm}^2$ , dosáhl ustáleného stavu až po 3 hodinách. Čím větší je tedy chladič, tím větší teplo dokáže odvést z povrchu tranzistoru a jeho maximální teplota se ustálí v delším časovém horizontu. Porovnáme-li jednotlivé chladiče pro třídu AB a D zjistíme, že dle výpočtu simulace dochází k delší době ustálení u chladičů s nižším ztrátovým výkonem, tedy u modelů tranzistorového zesilovače ve třídě D.

## Závěr

Cílem této práce bylo namodelovat chlazení tranzistorových zesilovačů pracujících ve třídách AB a D, a tato chlazení vzájemně porovnat. Aby bylo možné tuto práci realizovat, seznámil jsem se se základními třídami zesilovačů a jejich principy. Krátké shrnutí základních tříd zesilovačů je uvedeno v první kapitole. Dále jsem se musel seznámit s druhy přenosu tepla, které probíhají buďto přenosem vedením, prouděním nebo sáláním. V reálných případech vstupují do interakce vždy minimálně dva z těchto druhů přenosu tepla. Tato práce je ovšem omezena na přenos tepla vedením.

K tomu abych mohl simulovat chlazení zadaných tříd zesilovačů jsem se nejprve seznámil s programem COMSOL Multiphysics. Program COMSOL Multiphysics je program pro simulaci fyzikálních dějů popsaných parciálně diferenciálními rovnicemi (PDE) metodou konečných prvků (FEM). Jedná se o program určený inženýrům a vědeckým pracovníkům, a tak pro mne nebylo zdaleka jednoduché, naučit se s tímto simulačním programem pracovat tak, aby bylo práci možné realizovat. Seznámení s programem trvalo několik týdnů. Pomocí programu jsem postupně vytvořil geometrie tří verzí chladičů a na model tranzistoru aplikoval takové podmínky, aby odpovídaly tranzistorům koncového stupně zesilovače ve třídě AB a D. Tyto podmínky vycházely zejména z rozdílné účinnosti zesilovačů pracujících v těchto třídách, a tedy i rozdílné velikosti ztrátového výkonu na tranzistorech. Tento ztrátový výkon se na součástkách mění v teplo. Ztrátové výkony tak bylo nutné spočítat a v modelu jejich působení aplikovat na čip tranzistoru.

Vlastní simulaci jsem prováděl pro každý ze tří druhů navržených chladičů. Na model tranzistoru s připevněným konkrétním chladičem působil vždy nejprve ztrátový výkon 3,33 W odpovídající ztrátovému výkonu tranzistoru zesilovače třídy AB a v další simulaci pak ztrátový výkon 1,895 W, vypočtený jako ztrátový výkon tranzistoru zesilovače třídy D. Výsledky byly zpracovány ve formě teplotních map pro každý z navržených chladičů a danou třídu. Jednotlivé třídy byly porovnávány mezi sebou pomocí grafů a tabulky s výsledky řešení simulace.

Jak z obrázků v přílohách, tak zejména pak z grafů a tabulky výsledků řešení simulace je nanejvýš patrné, že modely tranzistorových zesilovačů ve třídě D dosahovaly znatelně nižších teplot, než modely tranzistorových zesilovačů ve třídě AB. Geometrie každého z navržených chladičů je rozdílná a liší se zejména velikostí plochy. S narůstající plochou výrazně klesala teplota modelu. Při simulaci modelu tranzistoru ve třídě D bez použití chladiče byla maximální teplota modelu 161 °C. Přidáním největšího chladiče do geometrie modelu se podařilo tuto teplotu snížit na necelých 80 °C. Zvětšením plochy chladiče také výrazně narůstala doba, za kterou se teplota na chladiči ustálila na hodnotě  $T_{\max}$ . Z výsledků simulace lze také říct, že modely chladičů pro tranzistorové zesilovače ve třídě D, se ustalovaly na maximální teplotu déle, než chladiče pro modely tranzistorových zesilovačů ve třídě AB. Dalším pozorováním výsledných teplotních map si lze také všimnout, že přestože bazový proud odpovídal setině kolektorového proudu, tak se na těchto vodivých trasách akumulovala téměř totožná teplota. To je způsobeno šířením tepla měděnými vodivými trasami směrem od čipu tranzistoru.

## Použitá literatura

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN, 2006, 295 s. ISBN 80-730-0185-3.
- [2] ElectronicsTutorials. [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.electronicstutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- [3] LÁNÍČEK, R. *Elektronika obvody, součástky, děje*. Praha, 1998, 478 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [4] HUMUSOFT: *Propagační materiály firmy HUMUSOFT o programu COMSOL Multiphysics*. Praha 8.
- [5] Wikipedia: FR4. [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>
- [6] Wikipedia: Keramika. [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Keramika>
- [7] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [8] *Výpočty chlazení elektronických součástí: s řešenými příklady* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [9] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-730-0065-2.
- [10] Přednáška BNFE č. 5. bnfe\_prednaska\_5.pdf. doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, VUT FEKT Brno, 2006
- [11] *International Rectifier: Datasheet IRF1404* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/i/irf1404.pdf>
- [12] ŠTÁL, Petr. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D: [základní principy a konstrukce zesilovače]*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 198 s. ISBN 978-80-7300-230-5.

## Seznam příloh

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Příloha A: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě AB..... | I   |
| Příloha B: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě D ..... | II  |
| Příloha C: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě AB..... | III |
| Příloha D: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě D ..... | IV  |
| Příloha E: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě AB..... | V   |
| Příloha F: | Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě D.....  | VI  |
| Příloha G: | Prostředí simulačního programu COMSOL Multiphysics .....   | VII |

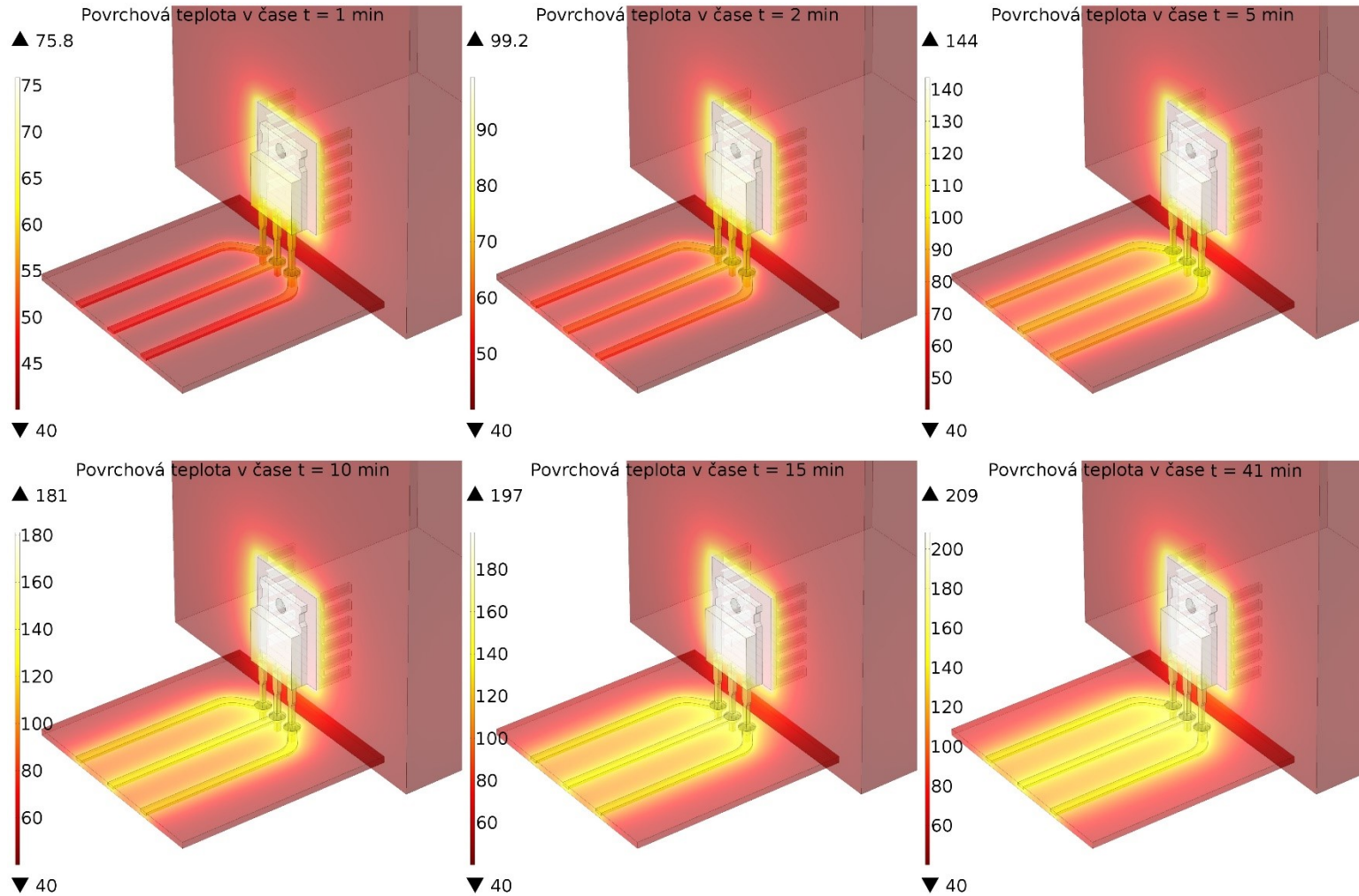
Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- Bakalářská práce v PDF/A formátu
- Animace šíření tepla modelem s chladičem č. 2 ve třídě AB
- Animace šíření tepla modelem s chladičem č. 2 ve třídě D

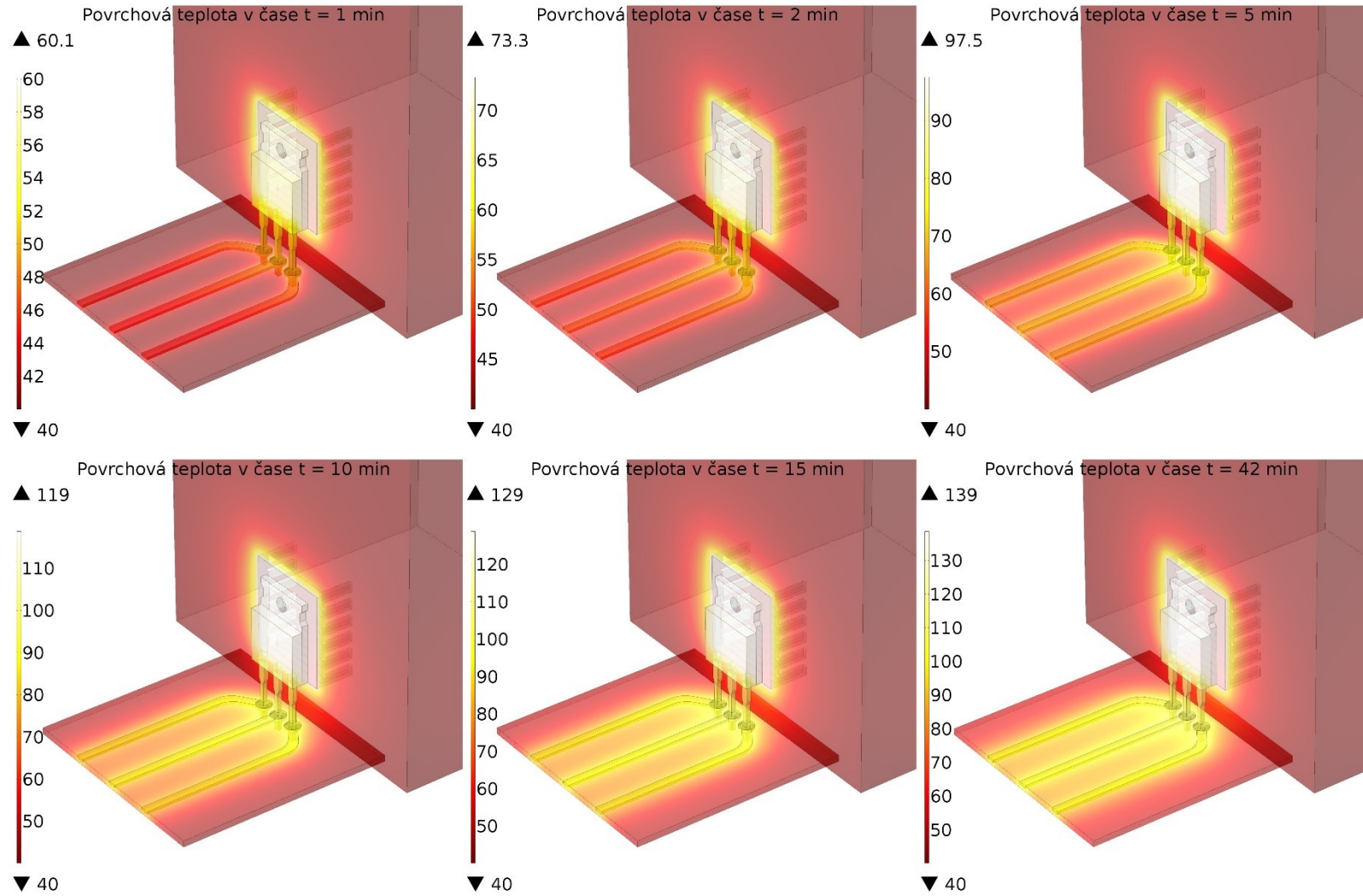
# Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě AB

## Příloha A: Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě AB



Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě D

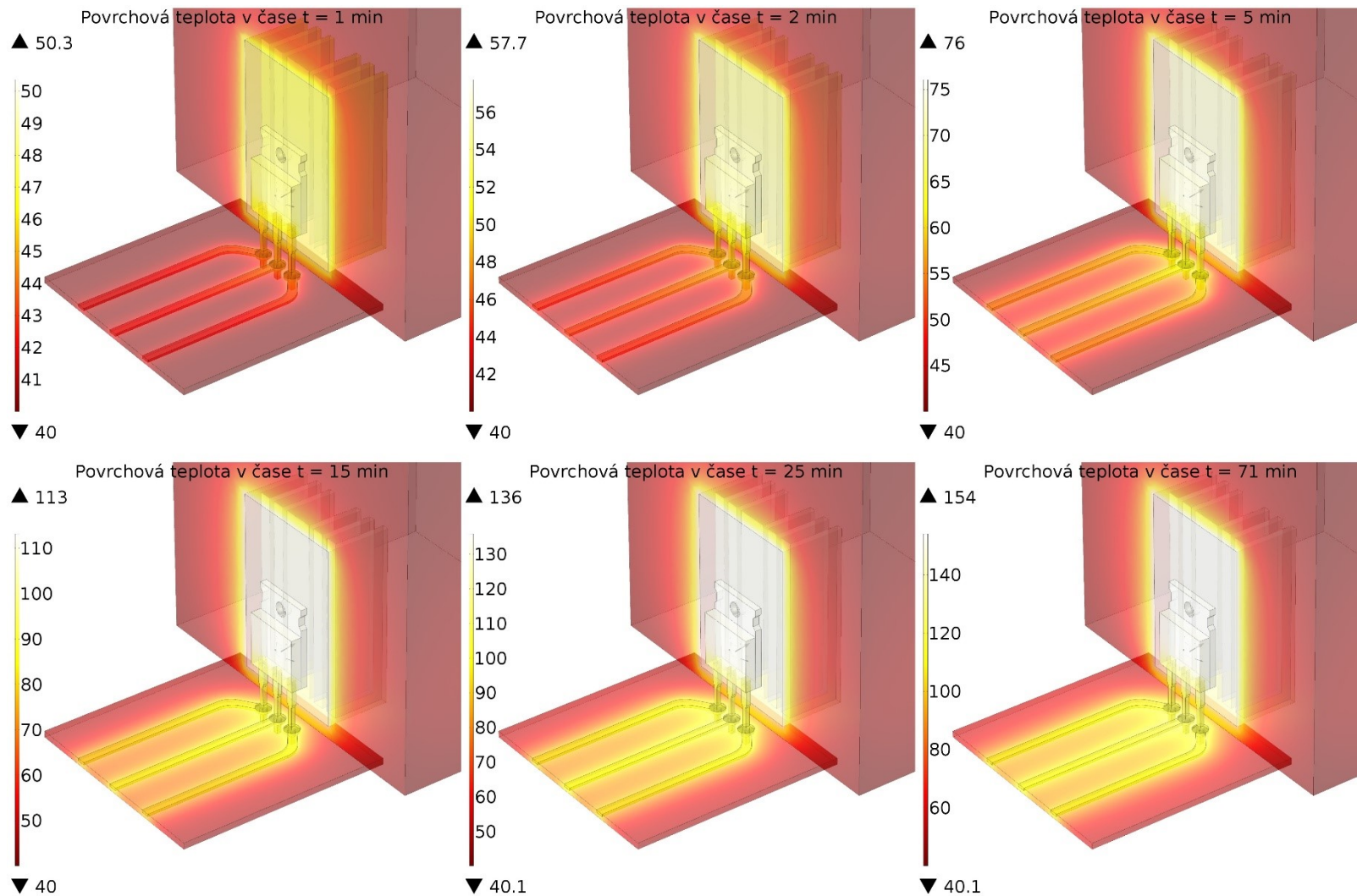
Příloha B: Povrchová teplota modelu s chladičem č. 1 ve třídě D





Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě AB

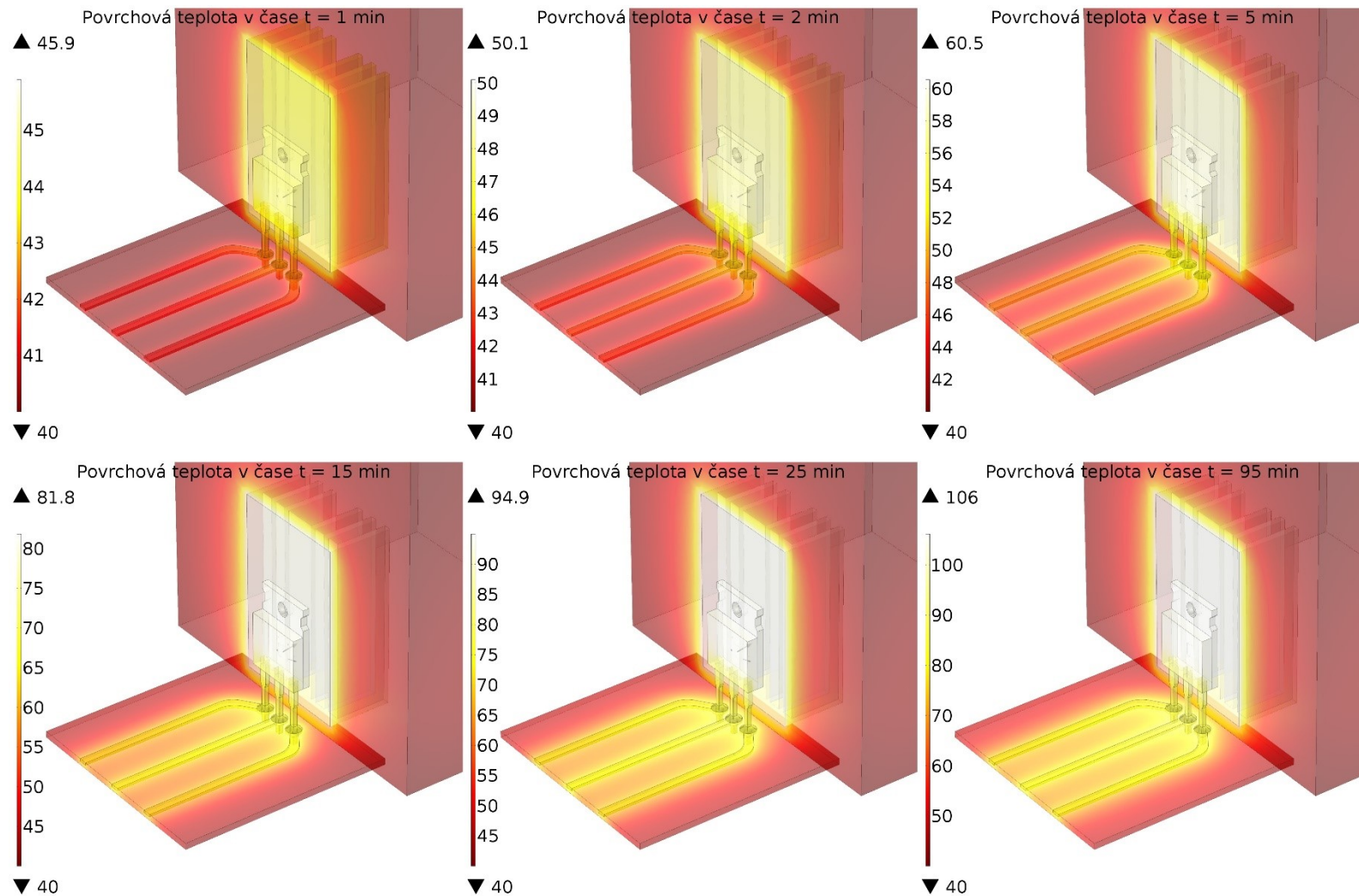
Příloha C: Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě AB





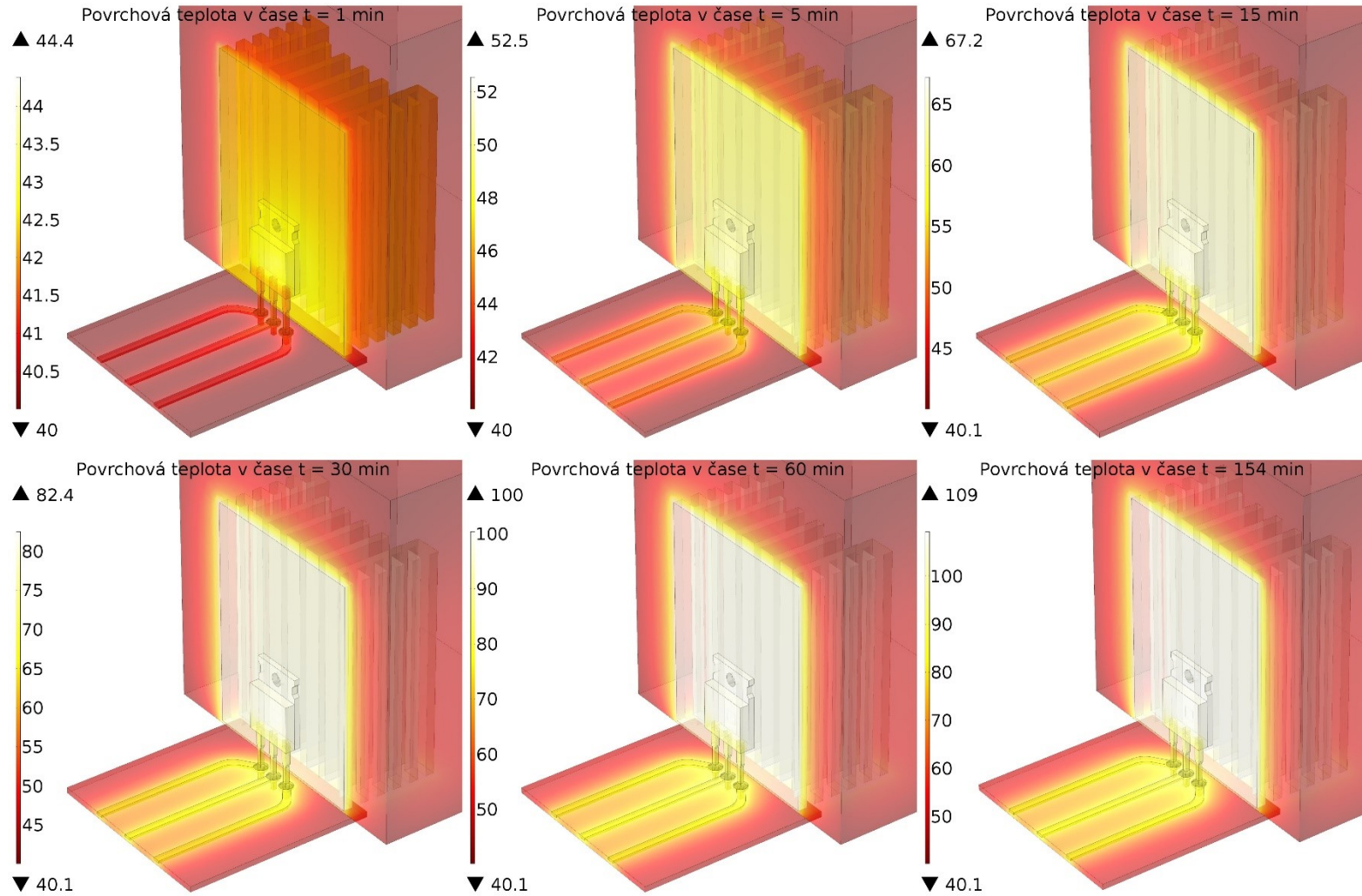
# Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě D

## Příloha D: Povrchová teplota modelu s chladičem č. 2 ve třídě D



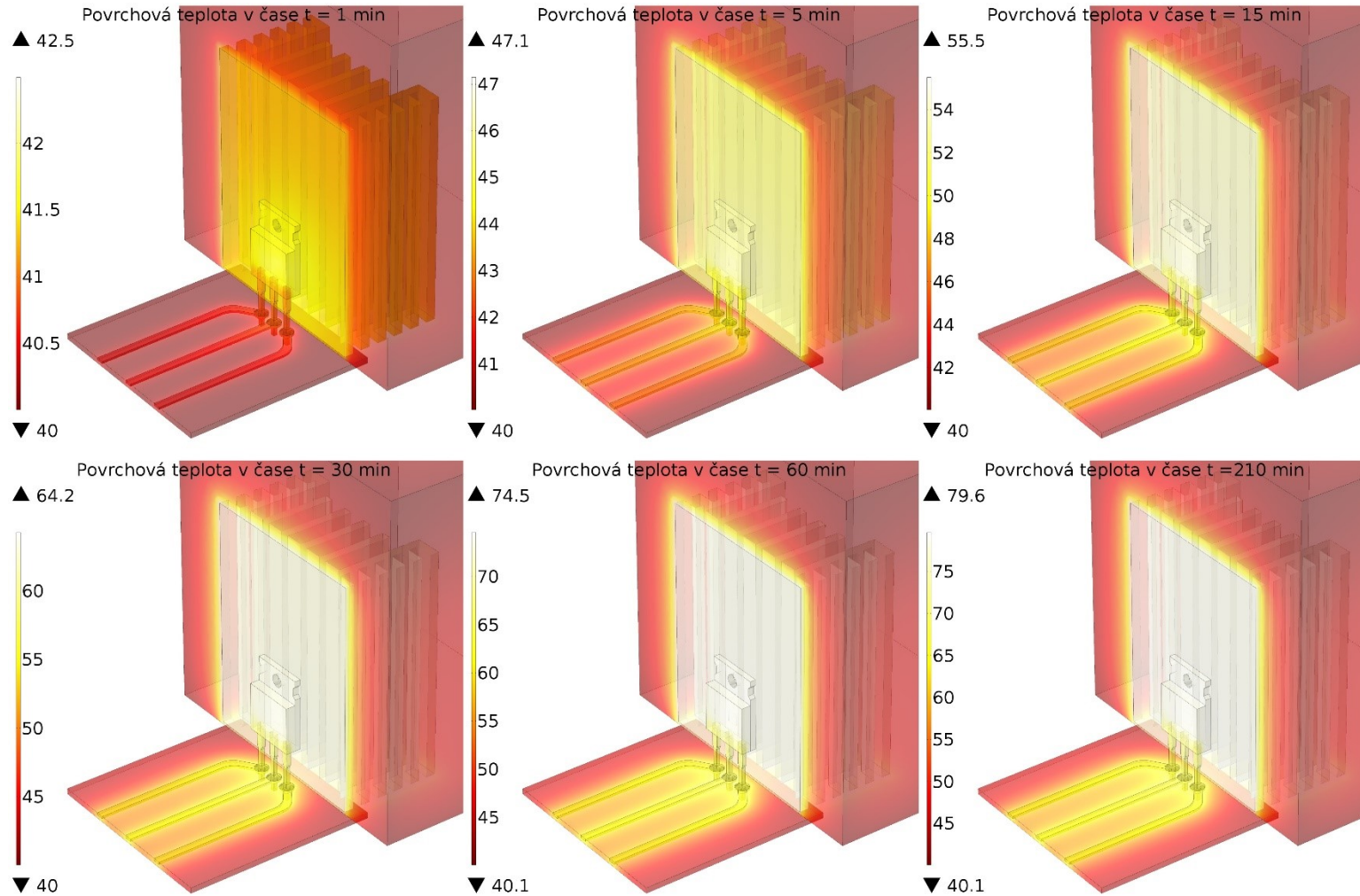
# Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě AB

## Příloha E: Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě AB



Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě D

Příloha F: *Povrchová teplota modelu s chladičem č. 3 ve třídě D*





# Prostředí simulačního programu COMSOL Multiphysics

## Príloha G: *Prostředí simulačního programu COMSOL Multiphysics*

