

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: 2302T041 Stavba jaderně energetických zařízení

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Hodnocení vlivu vzduchové mezery na tepelný režim elektromagnetů  
pohonů řídicích tyčí jaderných reaktorů VVER pro různá konstrukční  
provedení pohonů

Autor: **Bc. Martin Kykal**  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**

Akademický rok 2011/2012

Originální zadání

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Zdeborovi CSc. a svým konzultantům Dr. Ing. Janu Šikovi a Ing. Jiřímu Pedálovi za jejich cenné rady a připomínky k této práci. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem přátelům za jejich podporu během studia.

Martin Kykal

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

|               |  |  |
|---------------|--|--|
| AUTOR         | Příjmení<br>Kykal  | Jméno<br>Martin                                  |
| STUDIJNÍ OBOR | Stavba jaderně energetických zařízení  |  |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů)<br>Ing. Zdebor, CSc.  | Jméno<br>Jan                                     |
| PRACOVISŤE    | ZČU - FST - KKE  |  |
| DRUH PRÁCE    | DIPLOMOVÁ  | <del>BAKALÁŘSKÁ</del><br>Nehodící se<br>škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE   | Hodnocení vlivu vzduchové mezery na tepelný režim elektromagnetů pohonů řídicích tyčí jaderných reaktorů VVER pro různá konstrukční provedení pohonů |  |

|         |         |         |     |             |      |
|---------|---------|---------|-----|-------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKE | ROK ODEVZD. | 2012 |
|---------|---------|---------|-----|-------------|------|

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|        |    |              |    |               |   |
|--------|----|--------------|----|---------------|---|
| CELKEM | 60 | TEXTOVÁ ČÁST | 60 | GRAFICKÁ ČÁST | 0 |
|--------|----|--------------|----|---------------|---|

|   |  |
|---|--|
| STRUČNÝ POPIS<br>(MAX 10 ŘÁDEK)<br>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br>POZNATKY A PŘÍNOSY          | Práce se zabývá konstrukčním řešením bloku elektromagnetů u lineárních krokových pohonů používaných na jaderných elektrárnách typu VVER1000-V320. Dále se zabývá teplotnickým výpočtem bloku elektromagnetů za nominálních a havarijních podmínek. |
| KLÍČOVÁ SLOVA<br>ZPRAVIDLA<br>JEDNOSLOVNÉ POJMY,<br>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br>PODSTATU PRÁCE | LKP-M/3, ŠEM3, lineární krokový pohon, numerická simulace, elektromagnet   |

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

|                   |  |                     |                            |
|-------------------|--|---------------------|----------------------------|
| AUTHOR            | Surname<br>Kykal   | Name<br>Martin      |                            |
| FIELD OF STUDY    | Nuclear Power Equipment Design   |                     |                            |
| SUPERVISOR        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Zdebor, CSc.  | Name<br>Jan         |                            |
| INSTITUTION       | ZČU - FST - KKE  |                     |                            |
| TYPE OF WORK      | DIPLOMA  | <del>BACHELOR</del> | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Evaluation of the influence of air interspace on the thermal mode of electromagnets control rod drive of nuclear reactor VVER for different design of the drive. |                     |                            |

|         |                        |            |     |              |      |
|---------|------------------------|------------|-----|--------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KKE | SUBMITTED IN | 2012 |
|---------|------------------------|------------|-----|--------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|         |    |           |    |                |   |
|---------|----|-----------|----|----------------|---|
| TOTALLY | 60 | TEXT PART | 60 | GRAPHICAL PART | 0 |
|---------|----|-----------|----|----------------|---|

|  |  |
|--|--|
| BRIEF DESCRIPTION<br>TOPIC, GOAL, RESULTS<br>AND CONTRIBUTIONS | This diploma deals with the design of block of electromagnets linear stepper drive used in nuclear power plants VVER1000- type V320. It also deals with heat-technical calculation of block of electromagnets at nominal and emergency conditions. |
| KEY WORDS  | LKP-M/3, SHEM3, linear stepper drive, numerical simulation, electromagnet  |

## 2 Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2     | Obsah.....  | 1  |
| 3     | Úvod.....   | 3  |
| 4     | Tlakovodní reaktor .....                                  | 4  |
| 4.1   | Princip fungování tlakovodního reaktoru.....              | 4  |
| 4.2   | Primární okruh reaktoru typu VVER 1000 - V320.....        | 4  |
| 4.2.1 | Tlaková nádoba reaktoru.....                              | 5  |
| 4.2.2 | Vnitřní části reaktoru.....                               | 6  |
| 4.2.3 | Horní blok .....  | 9  |
| 4.3   | Sekundární okruh .....                                    | 10 |
| 5     | Technický popis lineárního krokového pohonu LKP-M/3 ..... | 11 |
| 5.1   | Konstrukce a funkce LKP-M/3 .....                         | 12 |
| 5.2   | Pouzdro pohonu.....                                       | 12 |
| 5.3   | Blok elektromagnetů .....                                 | 13 |
| 5.4   | Blok zdvihání .....                                       | 14 |
| 5.5   | Závěsná tyč.....  | 14 |
| 5.6   | Ukazatel polohy.....                                      | 15 |
| 5.7   | Podmínky provozu LKP-M/3.....                             | 15 |
| 5.8   | Základní technická data LKP-M/3 .....                     | 16 |
| 5.9   | Popis činnosti LKP-M3 .....                               | 18 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6     | Porovnání technických parametrů LKP-M/3 a ŠEM3 .....               | 22 |
| 7     | Teplotní výpočet bloku elektromagnetů .....                        | 27 |
| 7.1   | Výpočetní model LKP-M/3 .....                                      | 27 |
| 7.1.1 | Návrh modelu .....   | 27 |
| 7.1.2 | Geometrie .....  | 27 |
| 7.1.3 | Nastavení výpočetního modelu .....                                 | 27 |
| 7.1.4 | Definování vstupních veličin pro výpočet nominálního režimu .....  | 31 |
| 7.1.5 | Definování vstupních veličin pro výpočet havarijního režimu .....  | 32 |
| 7.2   | Výpočetní model ŠEM3 .....   | 33 |
| 7.2.1 | Geometrie .....  | 33 |
| 7.2.2 | Nastavení výpočetního modelu .....                                 | 33 |
| 7.2.3 | Definování vstupních veličin pro výpočet nominálního režimu .....  | 35 |
| 7.2.4 | Definování vstupních podmínek pro výpočet havarijního režimu ..... | 35 |
| 8     | Výsledky výpočtu .....   | 37 |
| 8.1   | Provozní režim LKP-M/3 .....                                       | 37 |
| 8.2   | Provozní režim ŠEM3 .....  | 41 |
| 8.3   | Havarijní režim LKP-M/3 .....                                      | 45 |
| 8.4   | Havarijní režim ŠEM3 .....   | 52 |
| 9     | Závěr .....  | 57 |
| 10    | Literatura .....   | 60 |



### 3 Úvod

Práce se zabývá pohony regulačních orgánů typu LKP-M/3 a ŠEM3 používanými na jaderných elektrárnách typu VVER 1000/V320. Pro připomenutí, v jakém technickém celku oba pohony pracují, je v úvodu práce stručný popis primárního okruhu jaderné elektrárny VVER 1000/V320. Následuje detailnější popis konstrukce a technických parametrů samotného lineárního krokového pohonu.

Prvním cílem byl návrh konstrukčního řešení bloku elektromagnetů LKP-M/3 a pohonu ŠEM3 a jejich umístění v horním bloku jaderného reaktoru VVER 1000/V230. Druhým cílem bylo zhotovení teplotního výpočtu bloku elektromagnetů LKP-M/3 a pohonu ŠEM3 za provozních režimů reaktoru VVER 1000/V230. Dalším cílem byla teplotní analýza bloku elektromagnetů u výše zmíněných typů pohonů při výpadku chlazení. Ke zkoumání teplotních analýz bylo využito výpočtového programu Ansys, který umožňuje pomocí metody konečných prvků určit poměrně přesně rozložení teplot v jednotlivých okamžicích ohřevu. Jako vstupní parametry byly použity teploty, ve kterých blok elektromagnetů pracuje. Výsledky práce byly vyneseny do příslušných grafů a rozložení teplot je dobře patrné z uvedených obrázků.

## 4 Tlakovodní reaktor

V současné době je na světě provozováno 436 jaderných reaktorů o celkovém instalovaném výkonu 374 973 GWe a dalších 62 reaktorů je ve výstavbě. Nejrozšířenějším typem jaderných reaktorů jsou reaktory tlakovodní, které pokrývají zhruba 66 % celkového instalovaného výkonu při počtu 272 reaktorů.[1]

### 4.1 Princip fungování tlakovodního reaktoru

Jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory mají dvouokruhové uspořádání. Primární okruh má na starosti výrobu páry a sekundární okruh převádí kinetickou energii páry na energii elektrickou. Dvouokruhové uspořádání nám umožňuje oddělit primární a sekundární okruh tak, aby nedocházelo k promíchání primárního aktivního chladiva s neaktivním chladivem sekundárním.

Jako palivo v tomto typu reaktorů je používán obohacený  $UO_2$  ve formě palivových tablet. Výměna paliva probíhá po kampaních. Jako moderátor je zde použita lehká voda, která slouží zároveň jako chladivo pro odvod tepla z primárního okruhu. Řízení reaktoru obstarávají absorpční tyče zasouvané shora. Dalším řídicím prvem je koncentrace kyseliny borité v chladicí vodě. Předností tohoto typu reaktorů je vysoká stabilita daná velkou hodnotou záporného teplotního koeficientu reaktivity.

### 4.2 Primární okruh reaktoru typu VVER 1000 - V320

Primární okruh je systém zařízení, které pomocí chladicí vody přenáší horkými větvemi tepelnou energii do parogenerátoru, kde se vyrábí pára a následně zpět do tlakové nádoby větvemi studenými. Zdrojem tepla pro ohřev chladicí vody je tepelná energie uvolněná při řízené štěpné reakci v jaderném palivu. Chladicí voda za běžného provozu cirkuluje primárním okru-

hem pomocí hlavních cirkulačních čerpadel, která jsou umístěna na studených větvích hlavního cirkulačního potrubí.

Hlavní části primárního okruhu jsou reaktor, parogenerátory, hlavní cirkulační čerpadla a kompenzátor objemu. Reaktor se skládá z tlakové nádoby a vnitřních částí reaktoru.

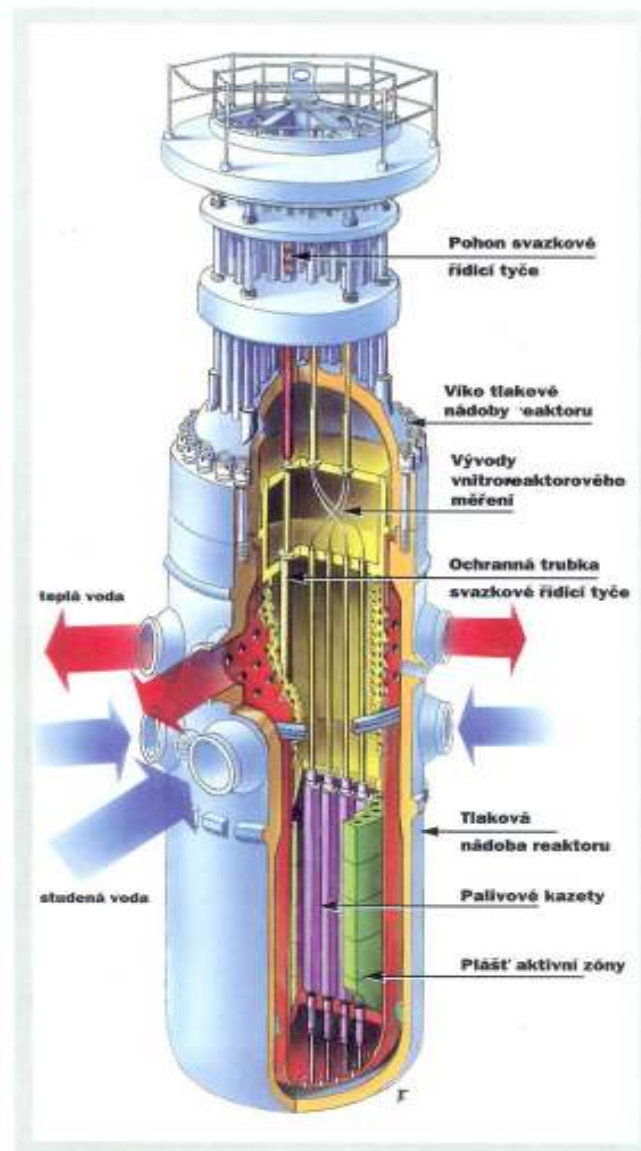
#### 4.2.1 Tlaková nádoba reaktoru

Tlaková nádoba reaktoru zabezpečuje provoz při vysokých parametrech chladiva primárního okruhu, které jsou nutné pro přeměnu jaderné energie na tepelnou a její odvod z aktivní zóny při všech provozních a havarijních režimech reaktoru. Tlaková nádoba je svařena z kovaných prstenců a eliptického dna. Na čele horního přírubového prstence je 54 otvorů pro závrtné šrouby těsnícího uzlu. Na tento prstenec dosedá víko reaktoru. Víko sloužící k těsnému uzavření tlakové nádoby je svařeno z eliptického vrchlíku a přírubového prstence. Na víku je navařeno 61 nátrubků pro připojení lineárních krokových pohonů. Další nátrubky slouží pro vývody měření neutronového toku a teplot. Pod přírubovým prstencem se nachází horní řada hrdel. Čtyři nátrubky s průměrem 850 mm jsou pro výstup chladiva z reaktoru a dva nátrubky s průměrem 270 mm jsou pro systém havarijního chlazení aktivní zóny. Pod horní řadou hrdel je prstenec se čtyřmi nátrubky průměru 850 mm pro přívod chladicí vody do aktivní zóny a dvěma nátrubky průměru 270 mm pro systém havarijního dochlazování.

| Technické parametry tlakové nádoby      |           |
|---|-----------|
| Výška tlakové nádoby                    | 10,9 m    |
| Vnitřní průměr tlakové nádoby           | 4,1 m     |
| Vnější průměr tlakové nádoby            | 4,5 m     |
| Celková síla stěny válcové části nádoby | 200 mm    |
| Tloušťka výstelky z austenitické oceli  | 7 mm      |
| Výška horního bloku                     | 8,2 m     |
| Celková výška horního bloku             | 19,1 m    |
| Celková hmotnost                        | cca 800 t |

#### 4.2.2 Vnitřní části reaktoru

Vnitřní části reaktoru jsou takové části, které jsou uzavřené v tlakové nádobě. Jsou jimi šachta reaktoru, plášť aktivní zóny a blok ochranných trub.



Obr. č.1 Vnitřní části reaktoru

#### 4.2.2.1 Šachta reaktoru

Hlavními funkcemi šachty reaktoru jsou zajištění polohy palivových kazet, pláště aktivní zóny a bloku ochranných trub, oddělení vstupu a výstupu chladiva, radiační a tepelné odstínění tlakové nádoby a zrovnoměnění proudění chladiva.

Šachta reaktoru je tenkostěnná válcová nádoba s eliptickým děrovaným dnem. Horní část tvoří přírubu, která slouží k zavěšení v tlakové nádobě. V osovém směru je šachta přitlačena víkem tlakové nádoby reaktoru přes pružné elementy ve tvaru toroidní trubky. Tyto pružné segmenty tlumí vibrace a zabraňují nadzvedávání šachty vlivem proudění chladiva. Pod přírubou je vyvrtáno v šachtě 278 otvorů o průměru 180 mm pro zrovnoměnění chladiva na výstupu z reaktoru. Spodní část uzavírá eliptické dno se 163 podpěrami palivových souborů.

#### 4.2.2.2 Plášť aktivní zóny

Plášť aktivní zóny slouží k uložení 163 palivových souborů, které tvoří aktivní zónu. Plášť je speciálně upraven tak, aby vyplnil mezeru mezi pláštěm aktivní zóny a palivovými soubory, které mají šestihranný průřez. Další funkcí pláště aktivní zóny je snižování toku neutronů na tlakovou nádobu. Do prostoru pláště aktivní zóny jsou také zasouvány regulační orgány, které jsou ovládány lineárním krokovým pohonem. Regulační orgány slouží k regulaci výkonu reaktoru a také jako reflektor.

| <b>Aktivní zóna reaktoru</b>              |                   |
|---|-------------------|
| Počet palivových kazet                    | 163               |
| Počet palivových proutků v kazetě         | 312               |
| Počet řídicích a regulačních svazků       | 61                |
| Počet absorpčních elementů jednoho svazku | 18                |
| Výška aktivní zóny                        | 3,53 m            |
| Průměr aktivní zóny                       | 3,16 m            |
| Obohacení paliva při první zavážce        | 1,3 – 3,8 % U 235 |
| Hmotnost palivové kazety                  | 766 kg            |
| Hmotnost paliva v jedné kazetě            | 563 kg            |
| Vsázka paliva                             | 92 t              |
| Maximální vyhoření paliva                 | 60 MWd/kg         |

#### 4.2.2.3 Blok ochranných trub

Blok ochranných trub je svařená konstrukce ze tří desek spojených mezi sebou pláští, z ochranných trubek klastrů, spojovacích tyčí a z ochranných trubek systému vnitroreaktorového měření. Mezi spodní a střední kruhovou deskou je přivařeno 61 trubek (průměr 180 mm x 6 mm) pro vedení klastrů a 60 trubek (průměr 108 mm x 6 mm) pro vyvedení vnitroreaktorového měření z aktivní zóny reaktoru. Tuto sestavu trubek obepíná spodní plášť, rovněž přivařený ke spodní a střední kruhové desce. Průměr spodního pláště se směrem nahoru zmenšuje pomocí přechodové kuželové části z důvodu plynulé změny rychlosti chladiva vystupujícího z aktivní zóny. Ve spodním plášti je vyvrtáno 2984 otvorů pro výstup chladiva z bloku ochranných trub do horní části šachty. Odtud proudí chladivo otvory v šachtě do horkých větví cirkulačních smyček. Po obvodu kuželové části jsou vyfrézovány obdélníkové otvory, jimiž prochází samostatné kanály pro vývod vnitroreaktorového měření z vnějšího obvodu aktivní zóny. Ke střední desce je přivařen horní válcový plášť, k němuž je v jeho horní části přišroubována horní kruhová deska. Spodní deska je výkovek o průměru 3490 mm a tloušťce 250 mm se 163 čelními otvory s kuželovým přechodem pro vedení hlavíc palivových souborů a 372 čelních průchozích otvorů pro průtok

chladiwa. Po obvodu spodní desky jsou vyfrézovány otvory ve tvaru slepé drážky, do kterých zapadají vodící klíny upevněné na vnitřním povrchu šachty reaktoru. Tímto způsobem je zajištěna poloha bloku ochranných trub v reaktoru. Vodící drážka bloku ochranných trub dosedá na pero upevněné v šachtě. Ve střední desce ohraničující prostor bloku ochranných trub jsou vyvrtány otvory, na které opět navazují ochranné trubky klastrů a vývodů vnitroreaktorové kontroly. Dále je ve střední desce vyvrtáno 132 otvorů pro vstup chladiwa do prostoru horního pláště. Na vnějším válcovém povrchu horního pláště je vytvořen nákrůžek, na který dosedá víko tlakové nádoby reaktoru a dotlačuje tak blok ochranných trub na hlavice palivových souborů.

Blok ochranných trub slouží k zajištění polohy palivových kazet v aktivní zóně, vedení řídicích tyčí, vyvedení vnitroreaktorového měření, zrovnoměnění toku chladiwa po příčném průřezu před výstupem z reaktoru, zabránění nadlehčování palivových kazet ve všech provozních a havarijních režimech.

#### **4.2.3 Horní blok**

Horní blok dosedá na víko tlakové nádoby. V horním bloku je umístěno 61 lineárních krokových pohonů klastrů regulačních orgánů. Dále jsou zde vyvedeny kabely od vnitroreaktorových měření. Horní blok zajišťuje vzduchové chlazení cívek lineárních krokových pohonů.



Obr. č.2 Horní blok

### 4.3 Sekundární okruh

Sekundární okruh je systém zařízení, který má za úkol výrobu elektrické energie. Pára se z parogenerátoru dopravuje hlavními parními kolektory do turbíny. Pára předá svoji kinetickou energii turbíně, která je spojena s generátorem vyrábějícím elektrický proud. Pára dále přechází do kondenzátoru, kde zkondenzuje. Kondenzát prochází přes systém ohříváků zpět do parogenerátoru.



## 5 Technický popis lineárního krokového pohonu LKP-M/3

Lineární krokový pohon LKP-M/3 vychází z dlouholetého konstrukčního vývoje pohonu LKP-S, který započal v 80. letech. Hlavním cílem modernizace bylo zvýšení životnosti a odolnosti v provozu. Postupným vývojem bylo dosaženo těchto inovací:

- Zpřesnění sledování polohy regulačního orgánu v aktivní zóně z původních  $350 \pm 30$  mm na  $20 \pm 10$  mm. To znamená, že je registrován novým ukazatelem polohy UP-3 každý krok pohonu po celé výšce zdvihu.
- Náhrada kuželového Ni těsnění v zátce tlakového pouzdra těsněním z expandovaného grafitu. Dosáhlo se tím podstatného zjednodušení manipulace se spojem mezi tlakovým pouzdem a zátkou pouzdra.
- Zvětšení pracovního zdvihu pohonu z 3500 mm na 3800 mm. Tato úprava je využitelná pouze u nových reaktorů, nikoliv u stávajících.
- Zvětšení maximální tažné síly z původních 490 N na 700 N použitím nových elektromagnetů EM-1/T/a a EM-2/T/a místo původních EM-1 a EM-2.
- Zvýšení provozní teploty elektromagnetů ze  $170^{\circ}\text{C}$  na  $300^{\circ}\text{C}$ .
- Prodloužení doby práce pohonu bez chlazení.
- Zvětšení hmotnosti závěsné tyče z 12,9 kg na 15,32 kg pro zkrácení doby pádu.
- Zvýšení životnosti pohonu na min. 40 let.

## 5.1 Konstrukce a funkce LKP-M/3

Lineární krokový pohon je umístěn na víku reaktoru pod hermetickou obálkou a je součástí horního bloku reaktoru. Zjišťuje pohyb regulačního orgánu (klastru) v aktivní zóně ve svislém směru a udržuje tím výkon reaktoru na zadané hladině. Tvoří základní část systému řízení a ochrany reaktoru. Podle signálů tohoto systému může LKP-M/3 pracovat v režimu regulace, kompenzace přebytečné reaktivity nebo havarijní ochrany. Pohon je s regulačním orgánem spojen bajonetem umístěným na konci závěsné tyče. Činnost pohonu je řízena skříní silového řízení typu ESE 470.1, která zajišťuje napájení cívek elektromagnetů pohonu. Při krokování pohonu vykonává všechny ostatní funkce tj. logické řízení, měření a zpětnou kontrolu proudů v cívkách elektromagnetů pohonu, vyhodnocování poruch atd. Kromě výše uvedeného slouží pro napájení cívek záchytného a přídržného magnetu pohonu a tím k udržení závěsné tyče v její poslední dosažené poloze v případě výpadku základního napájení. Svislý pohyb závěsné tyče umožňují válcové zápichy s roztečí 20 mm po celé délce pracovního zdvihu 3500 mm. Do těchto zápichů zapadají dva západkové uzly. Západky jsou ovládány tažným a záchytným elektromagnetem. Chlazení pohonu zajišťuje vzduch proudící mezerou mezi pouzdem pohonu a blokem elektromagnetů a dále z vnější strany kolem elektromagnetů. Aby docházelo k promíchávání vzduchu proudícího z vnější a vnitřní strany elektromagnetu jsou umístěny v bloku elektromagnetů otvory.

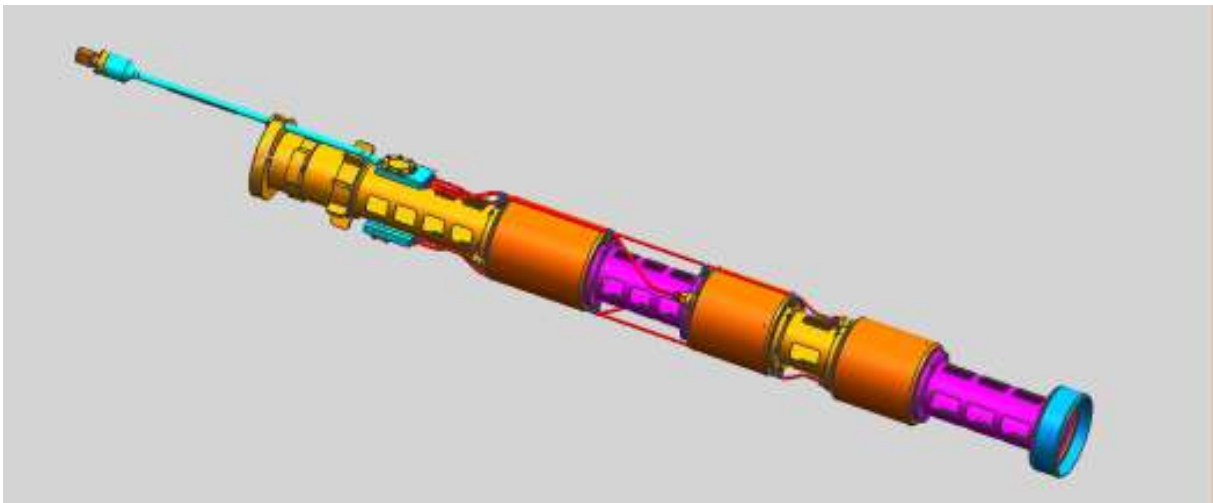
## 5.2 Pouzdro pohonu

Pouzdro pohonu je vyrobeno z oceli typu 08CH18N10T. Pouzdro pohonu tvoří tlakovou bariéru mezi primárním okruhem a prostorem nad víkem reaktoru, slouží pro umístění a upevnění vnějších a vnitřních částí pohonu a umožňuje činnost v podmínkách primárního okruhu. Ve spodní části má pouzdro pohonu přírubu, která je připojena šesti šrouby M27 k přírubě nátrubku víka reaktoru. Horní část je utěsněna zátkou bloku zdvihání a kuželovým grafitovým těsněním. V horní části pouzdra je zavěšen blok zdvihání, který je navlečen do pouzdra pohonu.

### 5.3 Blok elektromagnetů

Blok elektromagnetů je upevněn vně pouzdra pohonu. Skládá se z tažného, záchytného a přídržného elektromagnetu. Cívky elektromagnetů jsou hermeticky uloženy a propojeny vodiči v trubkách přes krabici a rozvodem kabelů do konektoru. Všechny cesty kabelů jsou udělány hermeticky. Cívky bloku elektromagnetů spolu s kotvami a protipóly bloku zdvihání tvoří jednotlivé typy elektromagnetů. Elektromagnety vyvozují tažnou sílu na kotvy bloku zdvihání, které zajišťují funkci bloku zdvihání a tím pohyb závěsné tyče. Blok elektromagnetů je spojen konektorem s řídicím blokem. Po montáži je provedeno vakuování a sušení cívek, po němž následuje zaplnění prostoru heliem.

Pro zvětšení maximální tažné síly z původních 490 N na 700 N byly použity nové elektromagnety EM-1/T a EM-2/T místo původních EM-1 a EM-2. Teplotní třída elektromagnetu typu EM/T je 300 °C a jeho životnost je 30 let, zatímco teplotní třída u elektromagnetu typu EM je pouze 180 °C a životnost jen 10 let.



Obr. č.3 Blok elektromagnetů

## 5.4 Blok zdvihání

Blok zdvihání je umístěn uvnitř pouzdra pohonu a spolu s blokem elektromagnetů zajišťuje svislý pohyb, havarijní pád a stání v libovolné poloze závěsné tyče. Další jeho funkcí je zajištění závěsné tyče proti nevyžádanému pohybu nahoru v případě porušení těsnosti pohonu nad přírubou pouzdra pohonu. Ovládání závěsné tyče spojené s regulačním orgánem je provedeno prostřednictvím tažného a přídržného bloku pomocí koordinovaného vybuzení a odbuzení elektromagnetů, které jsou vně pouzdra pohonu a působí svým magnetickým polem přes stěny pouzdra pohonu na kotvy bloku zdvihání. Kotvy přes trubková táhla ovládají nosiče západek a zavírací pouzdra západek. Postupným zavíráním, otevíráním a osovým pohybem systému západek se dosáhne krokového pohybu závěsné tyče nebo jejího havarijního pádu vlivem gravitace. Blok zdvihání je pružně zavěšen na pružinovém bloku, který tlumí rázy při chodu pohonu a brání nadměrnému rozkmitání. Na kotvách a protipólech bloku zdvihání jsou zavedeny kuželové plochy tak, aby bylo dosaženo optimálního průběhu tažné síly, tj. maximální tažná síla je na počátku pohybu kotvy a v průběhu zdvihání roste výrazně pomaleji než u kotev s kolmým čelem. Tím dochází ke snížení dynamických rázů na konci každého kroku.

## 5.5 Závěsná tyč

Závěsná tyč umožňuje pohyb regulačního orgánu pomocí tažného a přídržného systému. Závěsná tyč se skládá z horní části opatřené válcovými zápichy s roztečí 20 mm, což je samotná výška zdvihu, a ze spodní části s bajonetovým úchytem a čtyřhranným pojišťovacím trnem pro spojení s regulačním orgánem. Dále můžeme na závěsné tyči najít tlumič s pružinami pro tlumení rázů při chodu pohonu a při pádu tyče v režimu havarijní ochrany. Na horním konci závěsné tyče a na konci táhla jsou bajonetové drážky pro klíče na spojení a rozpojení závěsné tyče s regulačním orgánem. Uvnitř závěsné tyče je upevněn bočník o celkové délce 3680 mm, který spolu s ukazatelem polohy umožňuje určení polohy regulačního orgánu po jednotlivých krocích.

Konstrukce závěsné tyče umožňuje pootáčení ozubené části tyče v průběhu provozu, a tím dosažení rovnoměrného opotřebení povrchu, což zároveň snižuje ohýbání tyče v důsledku naklepávání povrchu západkami bloku zdvihání. Celková hmotnost závěsné tyče je 15,32 kg.

## 5.6 Ukazatel polohy

Ukazatel polohy slouží pro zjištění polohy regulačního orgánu po celé délce pracovního zdvihu 3500 mm a pro indikaci krajních poloh závěsné tyče spojené s regulačním orgánem. Čidlo dokáže určit polohu regulačního orgánu vždy po jednom kroku zdvihu závěsné tyče, tj. po 20 mm s přesností  $\pm 10$  mm. Ve vnitřním prostoru ukazatele polohy je umístěná nepohyblivá cívková souprava, která se skládá ze dvou soustav cívek, budící a měřící. Obě tyto soustavy jsou navinuty na společném magnetickém jádru. Celá soustava je umístěna v hermetickém nemagnetickém kanálu, kolem kterého se přesouvá bočník závěsné tyče. Bočník je trubka složená z jednotlivých úseků s různými délkami, které jsou střídavě z magnetické a nemagnetické oceli. Magnetických částí je 13 a nemagnetických 12. Napětí indukované v každé měřící cívce závisí na vodivosti magnetického obvodu cívky, tj. na tom, zda se v blízkosti cívky nachází magnetický nebo nemagnetický úsek bočnicku (změřené napětí se převádí na jeden ze dvou možných logických stavů I nebo 0, jejichž vzájemná kombinace je jedinečná pro každý krok zdvihu závěsné tyče). Signál z cívek je vyveden vně hermetického prostoru na konektor přes tlakovou průchodku, která tvoří těsnící bariéru proti tlaku primárního okruhu při poškození kanálu ukazatele polohy. Hermetický prostor cívek je po vakuování a sušení plněn heliem.

## 5.7 Podmínky provozu LKP-M/3

Většina součástí LKP-M/3 s výjimkou bloku elektromagnetů a ukazatele polohy jsou navrženy pro práci ve vodě primárního okruhu s těmito parametry:

1. Teplota 20 - 325 °C
2. Absolutní tlak 0,098 - 17,6 MPa

3. Absolutní tlak při hydraulických zkouškách: na pevnost 24,5 MPa po dobu 10 min; na těsnost 19,6 MPa po dobu nutnou k prohlídce.

Pohon pracuje v podmínkách působení ionizačního záření:

- 1) v zóně horní části pohonu a čidla ukazatele polohy (nad víkem reaktoru):

$$\varphi_n \sim 4,2 \cdot 10^8 \text{ neutronů}/(\text{s} \cdot \text{m}^2); sE_n \sim 1 \text{ MeV};$$

$$\varphi_\gamma \sim 1,4 \cdot 10^{11} \text{ gama-kvant}/(\text{s} \cdot \text{m}^2); (D_\gamma=1,0 \text{ Gy/hod}) sE_\gamma \sim 0-8 \text{ MeV}$$

- 2) v zóně dolního konce pohonu (v místě západek a spodních cívek ukazatele polohy)

$$\varphi_n \sim 4 \cdot 10^7 \text{ neutronů}/(\text{s} \cdot \text{m}^2); sE_n \geq 1 \text{ MeV};$$

$$\varphi_\gamma \sim 1,6 \cdot 10^{12} \text{ gama-kvant}/(\text{s} \cdot \text{m}^2); (D_\gamma=10,0 \text{ Gy/hod}) s E_\gamma \sim 0-10 \text{ MeV}$$

kde  $\varphi_n$  ..... hustota toku neutronů

$\varphi_\gamma$  ..... hustota toku záření gama

$D_\gamma$  ..... dávkový příkon záření gama

$E_n$  ..... energie neutronového záření

$E_\gamma$  ..... energie záření gama

## 5.8 Základní technická data LKP-M/3

| Název   | Jednotka | Hodnota      |
|---|----------|--------------|
| 1. Rychlost posuvu ZT   | mm/s     | 20±1,5       |
| 2. a) Doba havarijního pádu ZT spojené s RO WEC na reaktoru                                       | s        | Max.3,5±0,05 |
| b) Doba havarijního pádu ZT spojené s IRO ruské výroby na VS a na reaktoru při IHZ nebo s RO rus- | s        | 1,5-4±0,05   |

|   |    |   |
|---|----|---|
| ké výroby na reaktoru   |    |   |
| 3. Pracovní zdvih závěsné tyče od DKS do HKS  | mm | 3500±40   |
| 4. Rezerva tažné síly vzhledem ke hmotnosti IRO   | -  | ≥2  |
| 5. Krok chodu závěsné tyče  | mm | 20±0,1  |
| 6. Příkon pohonu<br>1) v režimu chodu<br>2) v režimu stání  | kW | ≤1,0<br>≤0,3  |
| 7. Příkon ukazatele polohy UP-3   | VA | ≤5  |
| 8. Přesnost indikace ukazatele polohy UP-3 na vstupním bloku<br>1) v průběhu zdvihu<br>2) v zónách koncových spínačů  | mm | ±10<br>±10  |
| 9. Rezerva chodu závěsné tyče od sepnutí DKS při chodu dolů na dolní doraz  | mm | 40-100  |
| 10. Izolační odpor elektrozařízení proti kostře a mezi sebou<br>- cívek BEM<br>1) při teplotě (20±10)°C<br>2) při pracovních podmínkách<br>- cívek UP-3<br>1) při teplotě (20±10)°C<br>2) při pracovních podmínkách | MΩ | ≥500<br>≥100<br>≥500<br>≥50                               |
| 11. Proudů v elektromagnetech<br>1) <u>přídržný</u> :<br>držení<br>2) <u>záchytný</u> :<br>držení<br>forsáž<br>3) <u>tažný</u> :<br>forsáž<br>držení<br>brždění   | A  | 9±0,45<br>5,5±0,3<br>10±0,5<br>14±0,7<br>9,5±0,5<br>6±0,3 |
| 12. Odpor vinutí cívek UP-3 při 20°C na konektoru<br>budicí cívka<br>4-9<br>měřicí cívky<br>13-1,2,5,6,7,10,11,14,15,16,17,18   | Ω  | 8,31±0,42<br>2,1±0,15                                     |
| 13. Kmitočet proudu napájení ukazatele polohy   | Hz | 300   |
| 14. Napájení ukazatele polohy UP-3  |    |   |

|   |                     |                                |
|---|---------------------|--------------------------------|
| - střídavá složka   | mA                  | 400                            |
| - stejnosměrná složka   | mA                  | 40                             |
| 15. Odpor vinutí cívek elektromagnetů při 20°C                              | $\Omega$            |                                |
| - tažný   |                     | 2,05±0,1                       |
| - záchytný  |                     | 1,58±0,1                       |
| - přídržný  |                     | 1,58±0,1                       |
| Indukčnost cívek elektromagnetů   | mH                  |                                |
| - tažný   |                     | ≥40                            |
| - záchytný  |                     | ≥30                            |
| - přídržný  |                     | ≥30                            |
| 16. Kmitočet proudu napájení panelů silového řízení a ukazatele polohy UP-3 | Hz                  | 50 <sub>-4</sub> <sup>+1</sup> |
| 17. Průtok chladicího vzduchu kolem elektromagnetů                          | m <sup>3</sup> /hod | 400 <sup>+50</sup>             |
| 18. Dovolené přerušení dodávky chlad. vzduchu                               | h                   | 4,5                            |
| 19. Projektovaná životnost  |                     |                                |
| - pohonu (mechanické části)   | roky                | 40                             |
| - elektromagnetů  |                     | 40                             |
| - ukazatele polohy UP-3   |                     | 40                             |
| 1) dvojitě chody na plný pracovní zdvih                                     | -                   | 6000                           |
| 2) počet kroků  | kroků               | 2,1 x 10 <sup>6</sup>          |
| 3) pády po signálu HO z plné výšky prac. zdvihu                             | -                   | 300                            |
| 4) stání pod napětím  | -                   | ostatní doba                   |
| 20. Doba nepřetržitě práce (bez nutnosti technické obsluhy)                 | hod                 | 10000                          |
| 21. Geometrické rozměry důležité pro obsluhu:                               | mm                  |                                |
| - pouzdro pohonu (spojení nátrubkem)<br>(spojení se zátkou BZ)              |                     | ø107e8/ø101d1<br>1             |
| - zátka BZ (spojení s PP)<br>(spojení s UP-3)                               |                     | ø103H8/ø97H8<br>ø103e8/ø97d11  |
| - ukazatel polohy UP-3  |                     | ø65d11 ø61e8                   |
| -průměr sevřených západek   |                     | ø65H8/ø61H8<br>≤27,5           |

## 5.9 Popis činnosti LKP-M3

Pohon je elektromagnetický výkonný mechanismus zajišťující vertikální krokový reverzní posuv, stání v libovolné poloze závěsné tyče spojené s regulačním orgánem, nebo její havarij-



ní pád. Režim posuvu se uskutečňuje spínáním proudových impulsů ve stanoveném pořadí, čase a velikosti do cívek elektromagnetů, čímž pohybující se kotvy spojené se západkami přemístí závěsnou tyč a přidržují ji mezi jednotlivými kroky. Režim stání se zajišťuje zapnutím proudu do záchytného elektromagnetu a zavěšením závěsné tyče na západkách. Tažný a přidržný elektromagnet jsou v tomto okamžiku vypnuty a jejich západky jsou rozevřeny. V režimu havarijní ochrany jsou všechny tři elektromagnety vypnuty, všechny západky jsou rozevřeny a závěsná tyč s regulačním orgánem volně padá vlivem gravitace.

Činnost pohonu při zvedání závěsné tyče:

- Zvýší se proud v záchytném elektromagnetu, vybudí se tažný elektromagnet a celý tažný systém se pomocí kotev zdvihne spolu se závěsnou tyčí o 20 mm vzhůru.
- Vybudí se přidržný elektromagnet, kotva se zdvihne o 12 mm (omezeno dorazy). Přidržené západky se sevřou po 9 mm zdvihu. Zdvih pokračuje o další 3 mm. Po 1,5 mm převezmou západky závěsnou tyč a po ukončení zdvihu je závěsná tyč nadlehčena o 1,5 mm nad západkami tažného systému, které se tím odlehčí.
- Odbudí se záchytný elektromagnet, kotva klesne o 9 mm a tažné západky se otevřou. Po odbuzení tažného elektromagnetu se celý tažný systém vrátí o 20 mm zpátky dolů do výchozí polohy.
- Vybudí se záchytný elektromagnet, tažné západky se opět sevřou v odlehčeném stavu. Odbudí se přidržný elektromagnet a závěsnou tyč po 1,5 mm poklesu převezmou tažné západky. V záchytném elektromagnetu je poté snížen proud na hodnotu při držení závěsné tyče a krok vzhůru je ukončen. Pohon se nachází ve výchozí poloze.

Činnost pohonu při spouštění závěsné tyče:

- Je vybuzen přidržný elektromagnet. Přidržené západky převezmou závěsnou tyč a nadlehčí ji o 1,5 mm nad sevřené tažné západky.

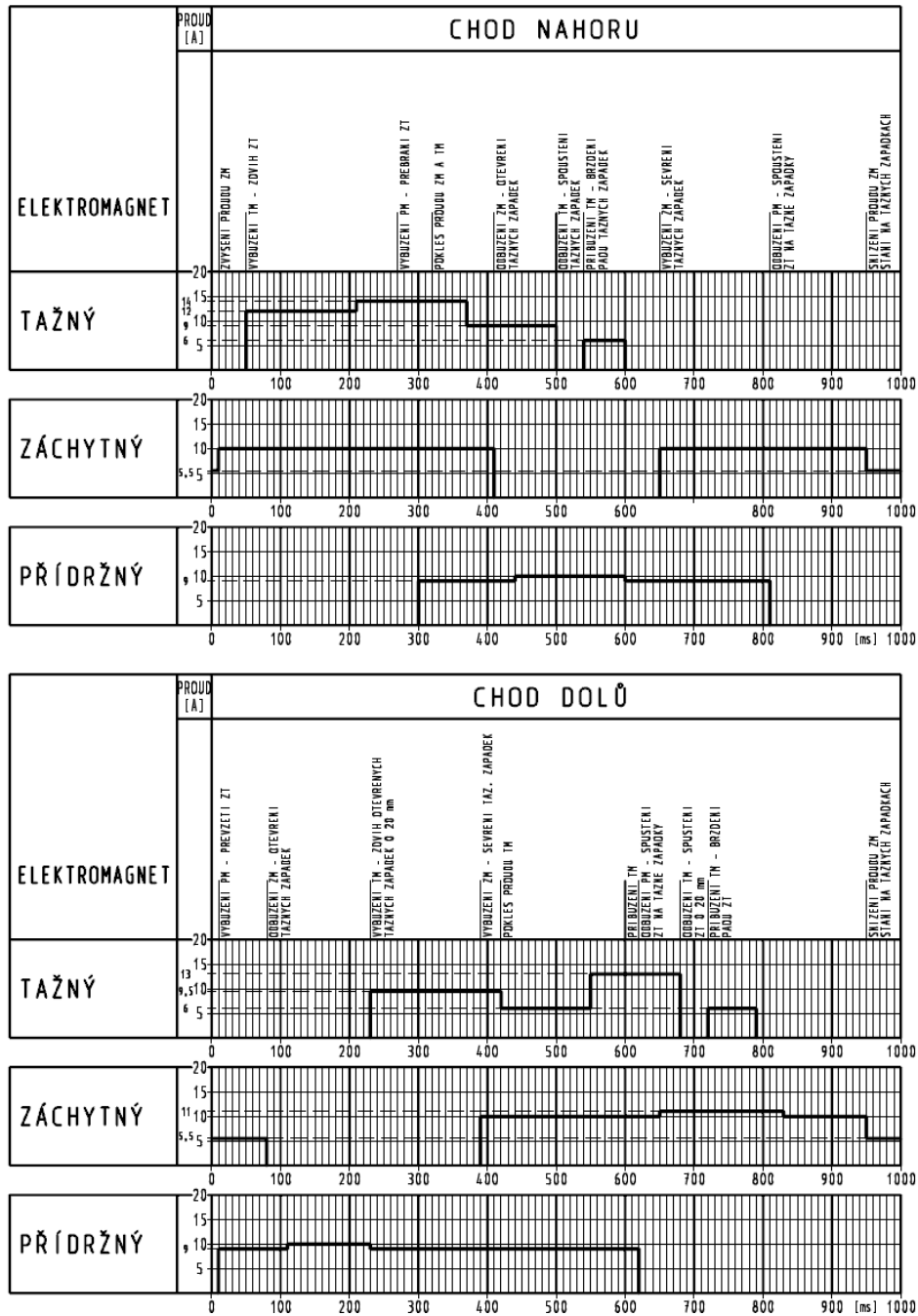
- Po odbuzení záchytného elektromagnetu se tažné západky otevřou. Je vybuzen tažný elektromagnet a celý tažný systém (s otevřenými tažnými západkami) je zdvižen o 20 mm vzhůru.
- Tažný systém je v horní poloze. Poté je vybuzen záchytný elektromagnet. Po odbuzení přídržného elektromagnetu převezmou závěsnou tyč tažné západky. Tažný elektromagnet je na krátkou dobu odbuzen a vzápětí krátce vybuzen. Působením gravitace se tažný systém spolu se závěsnou tyčí pohybuje směrem dolů a jeho pád přibrzděn krátkým vybuzením tažného elektromagnetu.

#### Činnost pohonu při záchytu:

V případě, že střídavý proud, kterým se napájí panel silového řízení, poklesne z libovolných důvodů pod dovolenou úroveň nebo zmizí, panel silového řízení se automaticky připojí k rezervní síti stejnosměrného napětí 110 V a dává proud 8,5 A na přídržný elektromagnet, který po 1 sekundě klesne do úrovně 7 A. Záchytný elektromagnet se napájí současně proudem 6 A. Tím jsou sevřeny oba systémy západek a nemůže dojít k propadnutí závěsné tyče. Odpojení probíhá obdobně při opětovném nastavení parametrů střídavého proudu v systému napájení panelu silového řízení.

#### Pád závěsné tyče:

Pád závěsné tyče spojené s regulačním orgánem po signálu havarijní ochrany se provádí vypnutím přívodu proudu do všech elektromagnetů. Vypnutím přívodu proudu dochází k uvolnění všech západek a závěsná tyč spolu s regulačním orgánem padá volným pádem.



Obr. č.4 Diagram proudů pohonu LKP-M/3 pro regulační orgán 17 kg

## 6 Porovnání technických parametrů LKP-M/3 a ŠEM3

Oba pohony vychází ze stejného konstrukčního návrhu pocházejícího z 80. let. Od té doby prošly řadou konstrukčních úprav, ale princip práce se nezměnil. Svislý pohyb závěsné tyče umožňují válcové zápichy s roztečí 20 mm po celé délce pracovního zdvihu 3500 mm. Do těchto zápichů zapadají dva západkové uzly. Tyto západky jsou ovládány pomocí dvou elektromagnetů.

Podstatným rozdílem v provedení bloku elektromagnetů je umístění elektromagnetu, který zajišťuje držení závěsné tyče s regulačním orgánem. U LKP-M/3 zajišťuje držení závěsné tyče s regulačním orgánem záchytný elektromagnet, který je umístěn mezi tažným a přídržným elektromagnetem. Kdežto u ŠEM3 zajišťuje držení elektromagnet přídržný, který je umístěn pod záchytným elektromagnetem. Dalším rozdílem je velikost záchytného elektromagnetu. U LKP-M/3 je jeho velikost shodná s velikostí přídržného elektromagnetu (délka 235 mm), kdežto u pohonu ŠEM3 je jeho velikost shodná s tažným elektromagnetem (délka 280 mm). S rozdílem v uspořádání elektromagnetů dochází i k rozdílům v metodice jejich pohybu.

Režim stání:

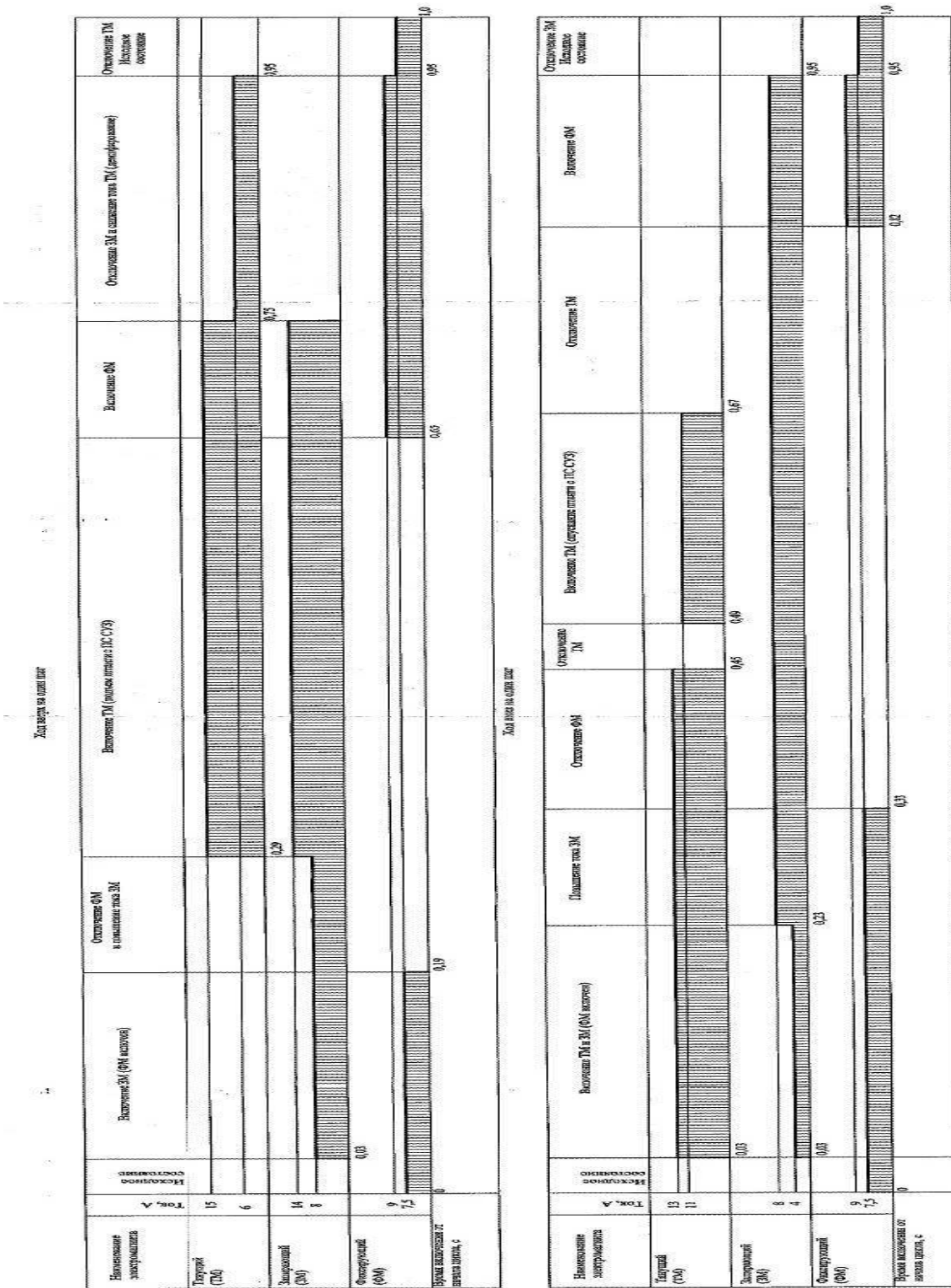
Režim stání pohonu zabezpečuje dodávka proudu na přídržný elektromagnet v důsledku čehož přídržná západka zabezpečuje držení tyče. Tažný a záchytný elektromagnet jsou bez napětí a tažná západka je uvolněná.

Činnost pohonu při zvedání závěsné tyče:

- Vybudí se záchytný elektromagnet, kotva se zdvihne o 9 mm a tažné západky sevrou závěsnou tyč.
- Odbudí se přídržný elektromagnet a kotva klesne o 12 mm. Tím se uvolní přídržné západky.
- Vybudí se tažný elektromagnet a celý tažný systém kotev se zvedne o 20 mm.

- Vybudí se přídržný elektromagnet, kotva se zvedne o 12 mm a tím se sevřou přídržné západky.
- Odbudí se závěsný elektromagnet, kotva klesne o 9 mm a tím se uvolní tažné západky.
- Odbudí se tažný elektromagnet a celý tažný systém klesne o 20 mm dolů. Tím se blok zdvihání dostane do výchozí polohy.

Dalším rozdílem v konstrukčním provedení bloku elektromagnetů je vnější průměr elektromagnetů. U LKP-M/3 je jejich průměr 226 mm a u ŠEM3 jen 225 mm. Tímto zvětšením průměru byla zvětšena tažná síla elektromagnetu a tím vznikla možnost snížit velikost napájecího proudu. Rozdíly v elektromagnetech jsou i na jejich vnitřním průměru, kdy u LKP-M/3 je průměr 124 mm a u ŠEM3 je vnitřní průměr 127 mm. Dalším rozdílem jsou průduchy v mezikusech spojujících jednotlivé elektromagnety, které slouží pro přívod chladicího vzduchu k pouzdru pohonu. Pohon ŠEM3 využívá menšího počtu větších průduchů oproti pohonu LKP-M3, který využívá větší počet menších průduchů.



Obr. č.5 Diagram proudů pohonu ŠEM3

Další rozdíly obou pohonů jsou v následující tabulce, kde lze vidět porovnání vybraných technických parametrů obou pohonů. Tyto hodnoty byly převzaty z [3] a [6]

| Název   | Jednotka | LKP-M/3<br>Hodnota  | ŠEM3<br>Hodnota   |
|---|----------|---|---|
| 1. Rychlost posuvu ZT   | mm/s     | 20±1,5  | 20±1,5  |
| 2. Doba havarijního pádu ZT s RO SOŘ po signálu HO, v rozmezí   | s        | 1,5-4   | 1,2-4   |
| 3. Pracovní zdvih závěsné tyče od DKS do HKS  | mm       | 3500  | 3500  |
| 4. Rezerva tažné síly vzhledem ke hmotnosti IRO   | -        | ≥2  | ≥1,2  |
| 5. Krok chodu závěsné tyče  | mm       | 20±0,1  | 20±0,1  |
| 6. Hmotnost pohonu  | kg       | 517   | 440   |
| 7. Příkon pohonu<br>1) v režimu chodu<br>2) v režimu stání  | kW       | ≤1,0<br>≤0,3  | ≤1,0<br>≤0,2  |
| 8. Počet kontrolovaných poloh<br>1) maximální<br>2) pracovní  | -        | 191<br>178 - 181  | 191<br>176 - 183  |
| 9. Přesnost indikace ukazatele polohy UP-3(UP-ŠEM3) na vstupním bloku<br>1) v průběhu zdvihu<br>2) v zónách koncových spínačů                                     | mm       | ±10<br>±10  | ±10<br>20   |
| 10. Rezerva chodu závěsné tyče od sepnutí DKS při chodu dolů na dolní doraz   | mm       | 40-100  | 40-100  |
| 11. Povolená teplota chladicího vzduchu na vstupu   | [°C]     | 60  | 60  |
| 12. Max. dovolené přerušení dodávky chladicího vzduchu  | [hod]    | 4,5   | 2   |
| 13. Proudění v elektromagnetech<br>1) <u>přídržný</u> :<br>držení<br>2) <u>záchytný</u> :<br>držení<br>forsáž<br>3) <u>tažný</u> :<br>forsáž<br>držení<br>brždění | A        | 9±0,45<br>5,5±0,3<br>10±0,5<br>14±0,7<br>9,5±0,5<br>6±0,3 | 7,5±0,45<br>8±0,40<br>13±0,65<br>14±0,7<br>11±0,5<br>5,5±0,28 |

|   |                              |  |                               |
|---|------------------------------|--|-------------------------------|
| 14. Odpor vinutí cívek UP-3(UP ŠEM3) při 20°C na konektoru<br>budicí cívka<br>4-9<br>měřicí cívky<br>13-1,2,5,6,7,10,11,14,15,16,17,18  | $\Omega$                     | 8,31±0,42<br>2,1±0,15  | 2,15±0,30<br>1,65±0,20        |
| 15. Kmitočet proudu napájení panelů silového řízení a ukazatele polohy UP-3   | Hz                           | 50 <sub>-4</sub> <sup>+1</sup>   | 50                            |
| 16. Doba skladovatelnosti v obalu   | roky                         | 5  | 3                             |
| 17. Projektovaná životnost<br>- pohonu (mechanické části)<br>- elektromagnetů<br>- ukazatele polohy<br>1) dvojitě chody na plný pracovní zdvih<br>2) počet kroků<br>3) pády po signálu HO z plné výšky prac. zdvihu<br>4) stání pod napětím | roky<br>-<br>kroků<br>-<br>- | 40<br>40<br>40<br>6000<br>2,1 x 10 <sup>6</sup><br>300<br>ostatní doba | 40<br>30<br>30<br>6000<br>500 |
| 18. Hmotnost závěsné tyče   | kg                           | 15,32  | 16,7                          |
| 19. Vnější rozměry<br>- délka<br>- průměr elektromagnetů  | mm                           | 11060<br>226   | 10825<br>225                  |



## **7 Teplotechnický výpočet bloku elektromagnetů**

### **7.1 Výpočetní model LKP-M/3**

Výpočetní model byl navržen v programu Ansys 12.1. Program slouží pro vytváření geometrie, generování výpočtové sítě a následné analýzy. Vytvořená síť slouží k popsání řešených rovnic v prostoru metodou konečných prvků.

#### **7.1.1 Návrh modelu**

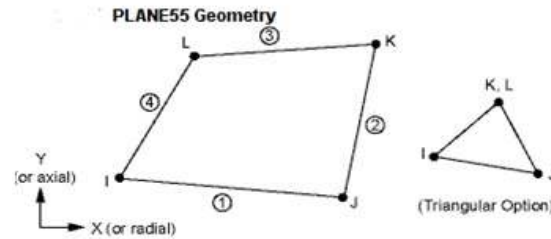
Model je vytvořen jako axisymetrický zjednodušený model elektromagnetu. Při návrhu jsem vyšel ze známé geometrie ze známých okrajových podmínek: teploty vody uvnitř pouzdra pohonu, teploty chladícího vzduchu, koeficienty emise a koeficientů přestupu a vedení tepla.

#### **7.1.2 Geometrie**

Geometrie výpočtového modelu je část bloku elektromagnetů, který obsahuje jednotlivě všechny tři elektromagnety: záchytný, přídržný a tažný. Modely byly zjednodušeny vynecháním přívodu elektřiny k elektromagnetu a šroubů spojujících blok elektromagnetů a pouzdro elektromagnetu. Toto zjednodušení bylo provedeno z důvodu zanedbatelného ovlivnění výpočtu. Výpočetní model je vidět na obrázku č.7

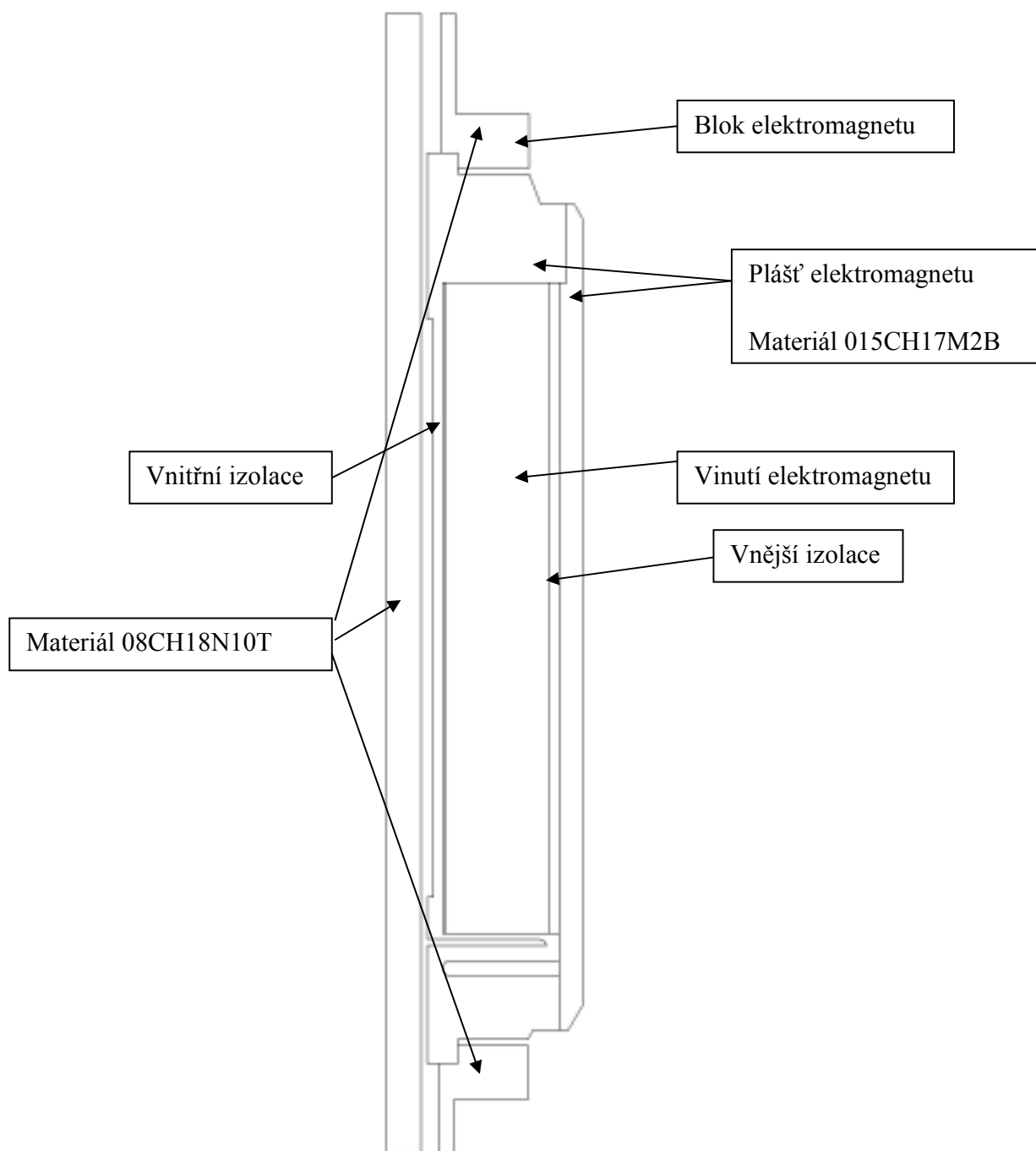
#### **7.1.3 Nastavení výpočetního modelu**

Prvním krokem pro nadefinování výpočtu bylo zvolení vhodného typu výpočtové buňky. Pro celý model byl zvolen typ výpočtových buněk Plane55 (obr. č.6 ). Tento typ buněk je vhodný pro řešení vedení tepla v osově symetrickém modelu. Každý element má 4 body a jeden stupeň volnosti (teplota) v každém bodu. Tyto elementy jsou vhodné pro řešení nejen stacionárních úloh, ale i pro řešení úloh nestacionárních.

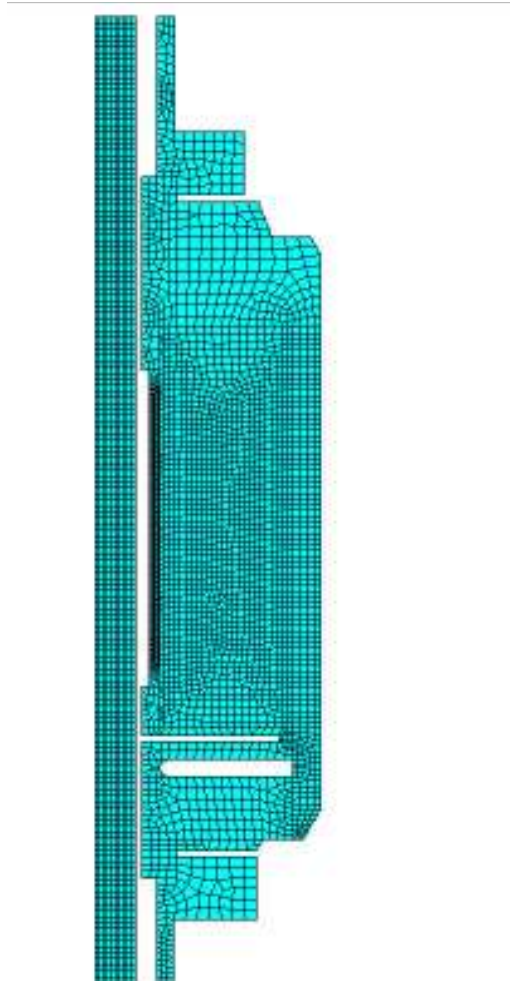


Obr. č.6 Geometrie elementu Plane55

Dalším krokem bylo vygenerování sítě. Na celém modelu byla použita metoda generování sítě Free, která respektuje předem nadefinované počty buněk na jednotlivých hranách. Počty buněk na hranách byly voleny tak, aby jednotlivé buňky v síti byly přibližně stejně veliké, čímž je možné dosáhnout optimálních výsledků při výpočtu. Modely obsahují 4100 až 4600 výpočetních bodů. Struktura sítě je vidět na obrázku č.8



Obr. č.7 Popis výpočetního modelu LKP-M/3



**Obr. č.8 Rozložení elementů na modelu LKP-M/3**

Třetím krokem bylo nastavení materiálových konstant pro použité materiály: materiál tepelné izolace, materiál vinutí elektromagnetu, pro kovové nemagnetické části materiál s označením 08CH18N10T a pro kovové magneticky vodivé části 015CH17M2B. Materiálové konstanty jsou uvedeny v následující tabulce. Konstanty byly převzaty z [4] a [5]

|            | Hustota<br>$\rho[\text{kg/m}^3]$ | Měrná tepelná kapacita<br>$c[\text{J/kgK}]$ | Součinitel teplotní vodivosti<br>$\lambda[\text{W/mK}]$ |
|------------|----------------------------------|---|---|
| 08CH18N10T | 7900                             | 461   | 15,07   |
| 015CH17M2B | 7900                             | 461   | 15,07   |
| Vinutí     | 8900                             | 400   | 1   |
| Izolace    | 1000                             | 800   | 0,151   |

#### 7.1.4 Definování vstupních veličin pro výpočet nominálního režimu

Prvním úkolem bylo provedení stacionárního výpočtu rozložení teplot za nominálních provozních podmínek. Elektromagnety jsou chlazeny vzduchem, který proudí skrz bloky elektromagnetů. Za provozu je teplota proudícího vzduchu 60°C. Další vstupní veličinou je teplo generované z výkonu elektromagnetu. Toto teplo lze vypočítat ze vztahu:

$$q = \frac{P}{V},$$

kde: P je výkon elektromagnetu

V je objem vinutí

Výkon lze vypočítat ze vztahu:

$$P = RI^2$$

Objem vinutí znám z geometrie elektromagnetu. Po úpravě dostávám konečný vztah pro výpočet tepla

$$q = \frac{RI^2}{V}$$

Po dosazení do rovnice pro výpočet tepla dostávám požadovaný výsledek. Použité hodnoty pro výpočet a požadovaný výsledek lze přehledně vidět v následující tabulce.

|          | R [ $\Omega$ ] | I [A] | V [ $m^3$ ]             | q [W/ $m^3$ ] |
|----------|----------------|-------|-------------------------|---------------|
| Přídržný | 1,58           | 9     | $2,1374 \times 10^{-3}$ | 59876,4854    |
| Záchytný | 1,58           | 5,5   | $2,1374 \times 10^{-3}$ | 22361,2800    |
| Tažný    | 2,05           | 9,5   | $3,0666 \times 10^{-3}$ | 60331,4746    |

Toto vypočtené teplo zadám jako vnitřní zdroj tepla (Heat generation). Na vnitřním a na vnějším povrchu elektromagnetu je potřeba zadat součinitel přestupu tepla z okolí do elektromagnetu. Na vnitřním povrchu zadám součinitel přestupu tepla  $\alpha_1 = 15W / m^2 K$  a na vnějším povrchu  $\alpha_2 = 35W / m^2 K$ . Dále je třeba zadat koeficient sálání  $\epsilon = 0,7$  mezi vnitřním povrchem elektromagnetu a vnější stěnou pouzdra pohonu. Dále zadám teplotu na vnitřní straně pouzdra pohonu  $t = 320^\circ C$  a součinitel přestupu tepla  $\alpha_1 = 1500W / m^2 K$ . Tyto hodnoty byly zjištěny na základě měření na zkušebním stendu. [4] a [5]

### 7.1.5 Definování vstupních veličin pro výpočet havarijního režimu

Druhým úkolem bylo provedení nestacionárního vývinu tepla při havarijním režimu výpadku chlazení bloku elektromagnetů. První vstupní veličinou je teplo generované prací elektromagnetu. Výpočet tohoto tepla je uveden v kapitole 7.1.4. Okrajová podmínka na vnějším povrchu:  $T_2 = 60^\circ C$  a  $\alpha_2 = 2W / m^2 K$ . Okrajovou podmínku pro vnitřní povrch elektromagnetu a vnější povrch pouzdra pohonu vypustím z důvodu výpadku chlazení. Koeficient sálání zůstává stejný jako při výpočtu stacionárního režimu. Dále zadám teplotu na vnitřní straně pouzdra

pohonu  $t = 320^\circ C$  a součinitel přestupu tepla  $\alpha_1 = 1500 W / m^2 K$ . Tyto hodnoty byly zjištěny na základě měření na zkušebním standu. [4] a [5]. Jako počáteční rozložení teplot pro nestacionární výpočet bylo použito výsledné rozložení teplot ze stacionárního výpočtu pro nominální režim.

## 7.2 Výpočetní model ŠEM3

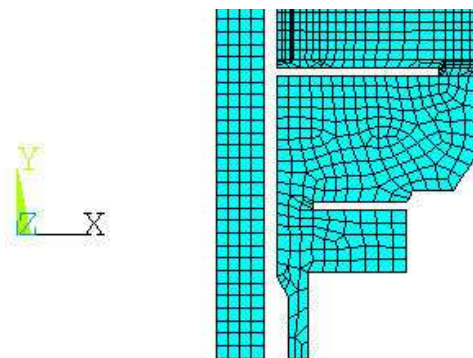
Postup tvorby výpočetního modelu byl stejný jako u předchozího modelu. Jediným rozdílem je různá geometrie.

### 7.2.1 Geometrie

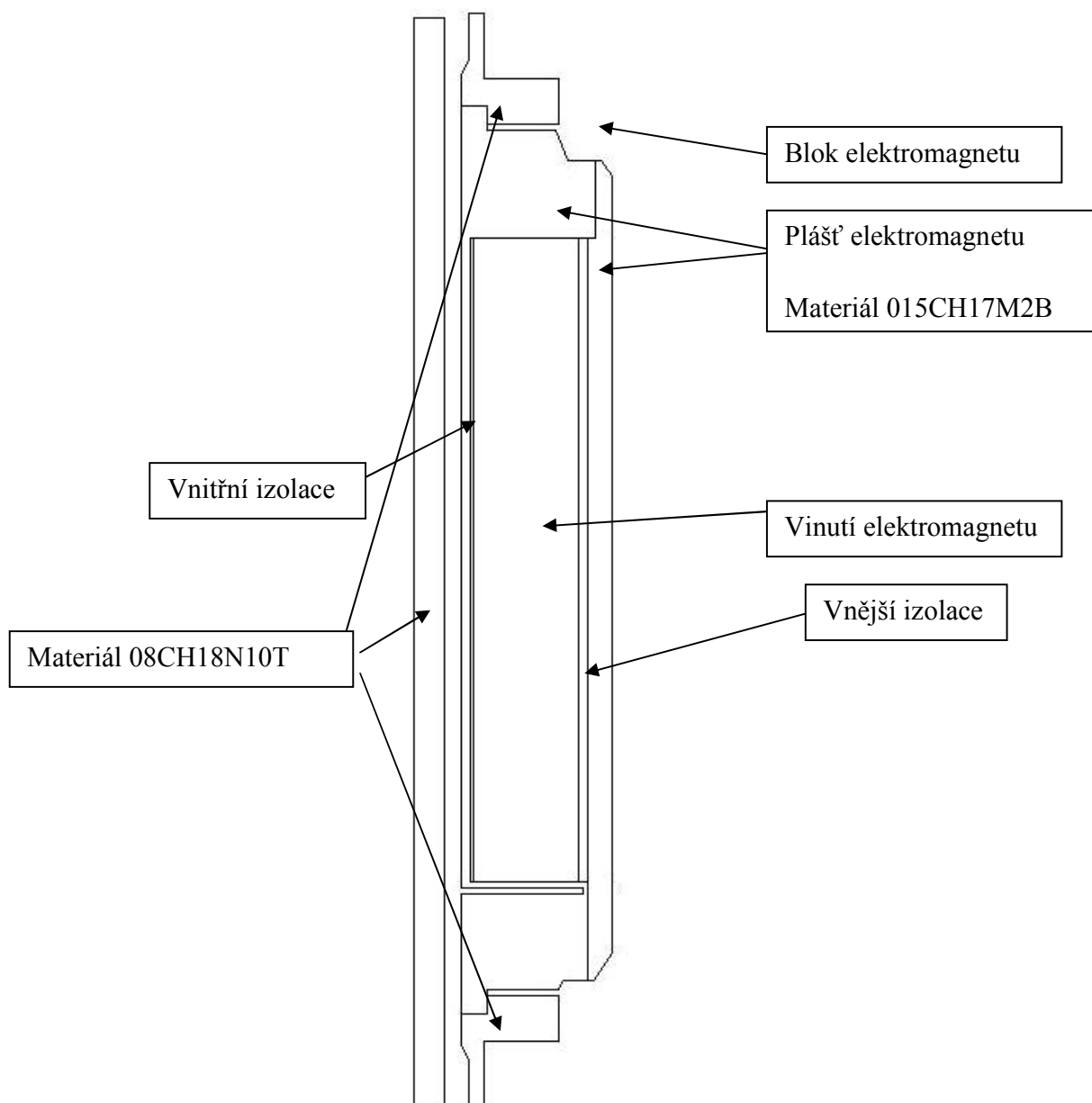
Geometrie výpočtového modelu je část bloku elektromagnetů, který obsahuje jednotlivě všechny tři elektromagnety: záchytný, přídržný a tažný. Modely byly zjednodušeny vynecháním přívodu elektřiny k elektromagnetu a šroubů spojujících blok elektromagnetů a pouzdro elektromagnetu. Toto zjednodušení bylo provedeno z důvodu zanedbatelného ovlivnění výpočtu. Výpočetní model je vidět na obrázku č.10

### 7.2.2 Nastavení výpočetního modelu

Pro tento model byl použit stejný typ elementů uvedený v kapitole 7.1.3. a byl zde použit stejný postup generování sítě jako při modelování v předchozím případě. Výsledný počet výpočtových bodů se pohybuje v rozmezí 4100 – 4600. Ukázka sítě je vidět na obrázku č.9



Obr. č.9 Rozložení elementů v modelu ŠEM3



Obr. č.10 Výpočetní model ŠEM3



### 7.2.3 Definování vstupních veličin pro výpočet nominálního režimu

Protože oba bloky elektromagnetů jsou provozovány na stejných typech reaktorů, jsou i vnější podmínky, které na ně působí, shodné. Tedy za nominálních provozních podmínek jsou elektromagnety chlazeny vzduchem o teplotě 60°C, který proudí skrz bloky elektromagnetů. Teplo generované z výkonu elektromagnetu se z důvodu rozdílných rozměrů a pracovních parametrů elektromagnetu liší. Toto teplo lze spočítat ze vztahů uvedených v kapitole 7.1.4. Použité hodnoty pro výpočet a požadovaný výsledek lze přehledně vidět v následující tabulce.

|          | R [ $\Omega$ ] | I [A] | V [ $m^3$ ]             | q [W/ $m^3$ ] |
|----------|----------------|-------|-------------------------|---------------|
| Přídržný | 1,65           | 7,5   | $2,8882 \times 10^{-3}$ | 32135,0668    |
| Záchytný | 2,15           | 8     | $3,7908 \times 10^{-3}$ | 36298,0792    |
| Tažný    | 2,15           | 11    | $3,7908 \times 10^{-3}$ | 68626,056     |

Toto teplo zadám jako vnitřní zdroj tepla (Heat generation). Na vnitřním a na vnějším povrchu elektromagnetu je potřeba zadat součinitel přestupu tepla z okolí do elektromagnetu. Na vnitřním povrchu zadám součinitel přestupu tepla  $\alpha_1 = 15W / m^2 K$  a na vnějším povrchu  $\alpha_2 = 35W / m^2 K$ . Dále je třeba zadat koeficient sálání  $\varepsilon = 0,7$  mezi vnitřním povrchem elektromagnetu a vnější stěnou pouzdra pohonu. Dále zadám teplotu na vnitřní straně pouzdra pohonu  $t = 320^\circ C$  a součinitel přestupu tepla  $\alpha_1 = 1500W / m^2 K$ . Vzhledem k tomu, že měření ze kterého vzešly koeficienty použité při výpočtu pohonu LKP-M/3 nebylo provedeno i pro pohon ŠEM3, byly použity stejné součinitele jako v případě LKP-M/3.

### 7.2.4 Definování vstupních podmínek pro výpočet havarijního režimu

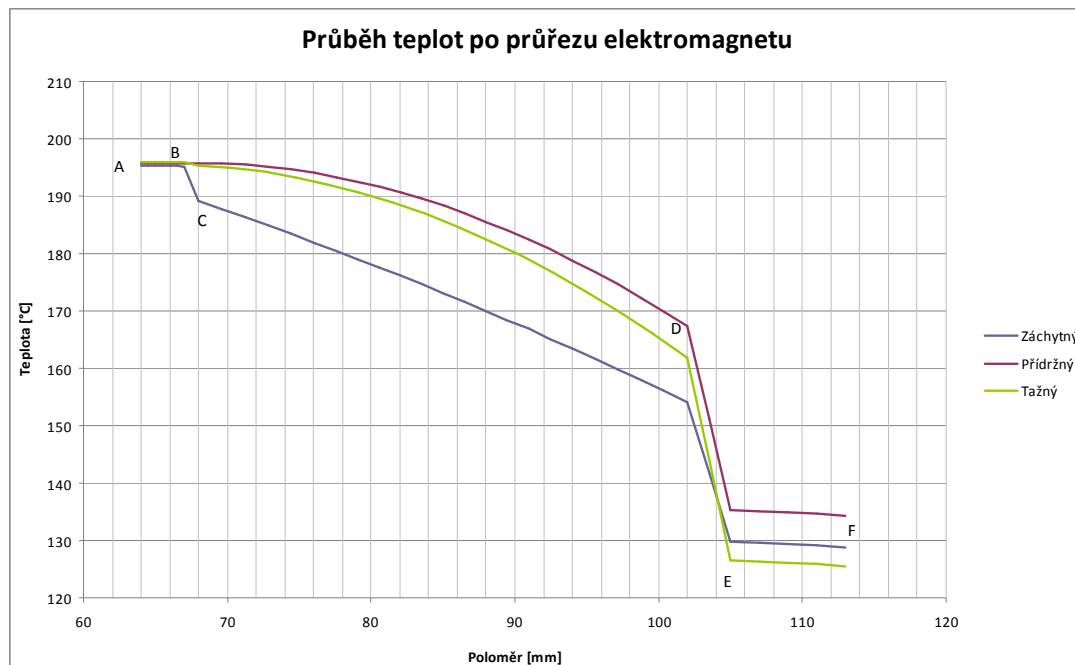
Pro provedení nestacionárního vývinu tepla při havarijním režimu výpadku chlazení bloku elektromagnetů používám stejné vstupní veličiny jako při výpočtu provedeném pro pohon LKP-M/3. I zde byly použity stejné součinitele jako v případě LKP-M/3. Jako počáteční rozlo-

žení teplot pro nestacionární výpočet bylo použito výsledné rozložení teplot z výpočtu stacionárního pro nominální režim.

## 8 Výsledky výpočtu

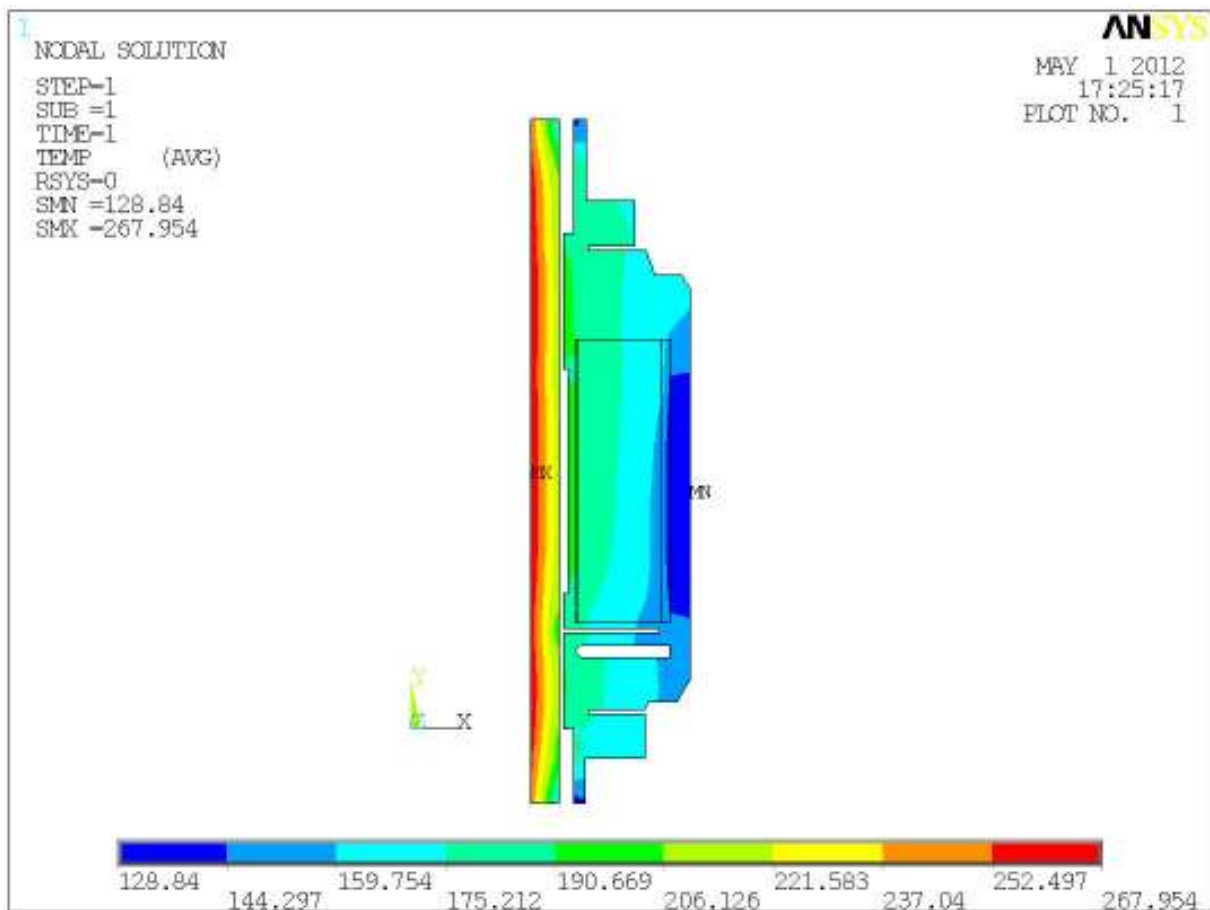
### 8.1 Provozní režim LKP-M/3

V následujícím grafu je vidět průběh teplot v závislosti na poloměru elektromagnetu u všech tří elektromagnetů. Je zde patrný velký skok v teplotě mezi vnější a vnitřní stranou tepelné izolace (body B-C, E-D). Z grafu dále vyplývá, že v oblasti z vnějších stran izolací je teplota téměř konstantní (body A-B, F-E). Na grafu můžeme vidět velký rozdíl mezi křivkou záchytného elektromagnetu a přídržného s tažným elektromagnetem. U záchytného elektromagnetu je křivka mezi body C -D téměř lineární, kdežto u zbývajících elektromagnetů není. To je dáno velikostí tepla generovaného elektromagnetem. Teplo generované záchytným elektromagnetem je tak malé, že se v křivce téměř neprojeví. Teplo generované v tažném a přídržném elektromagnetu je naopak velké a tím v křivce zmizí skok mezi body B-C.

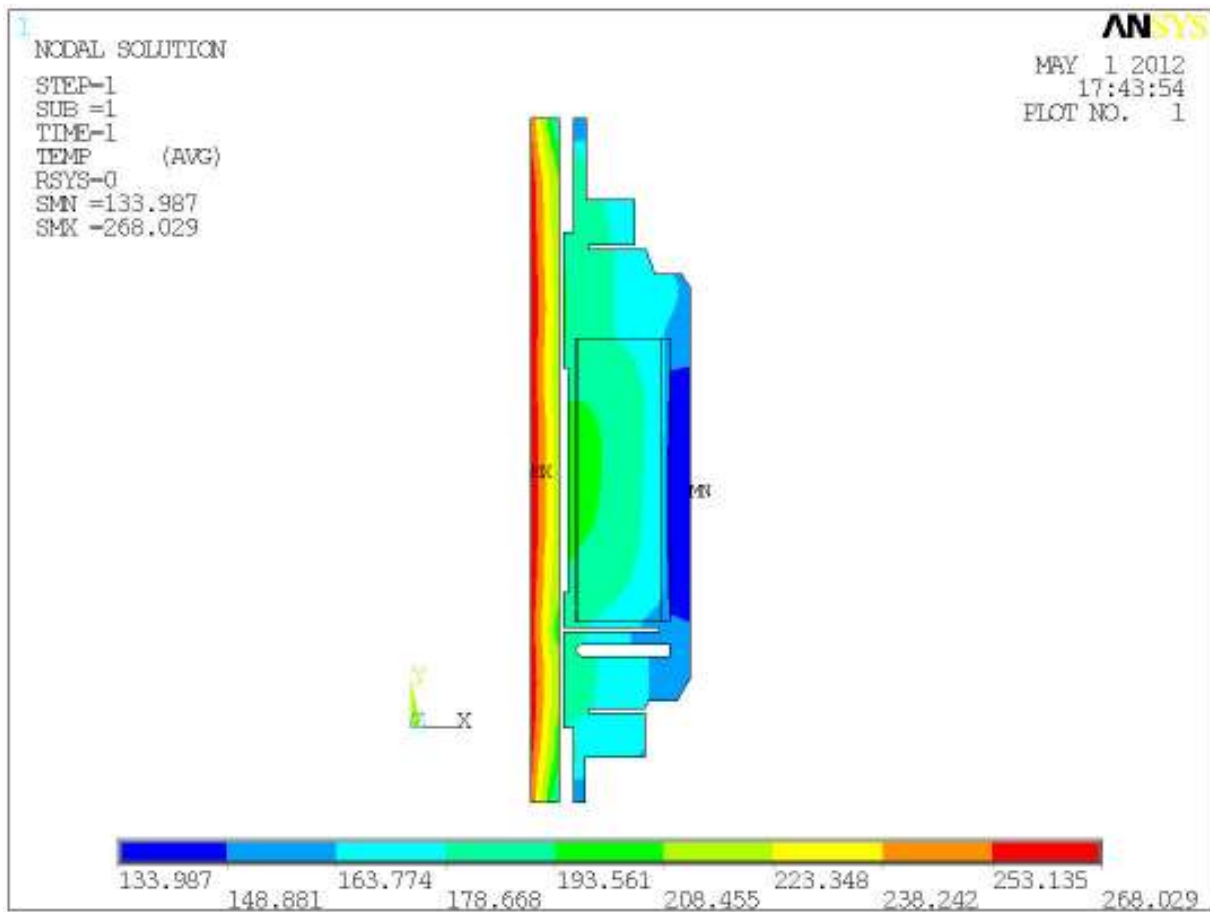


Obr. č.11 Graf průběhu teploty po průřezu elektromagnetu u LKP-M/3

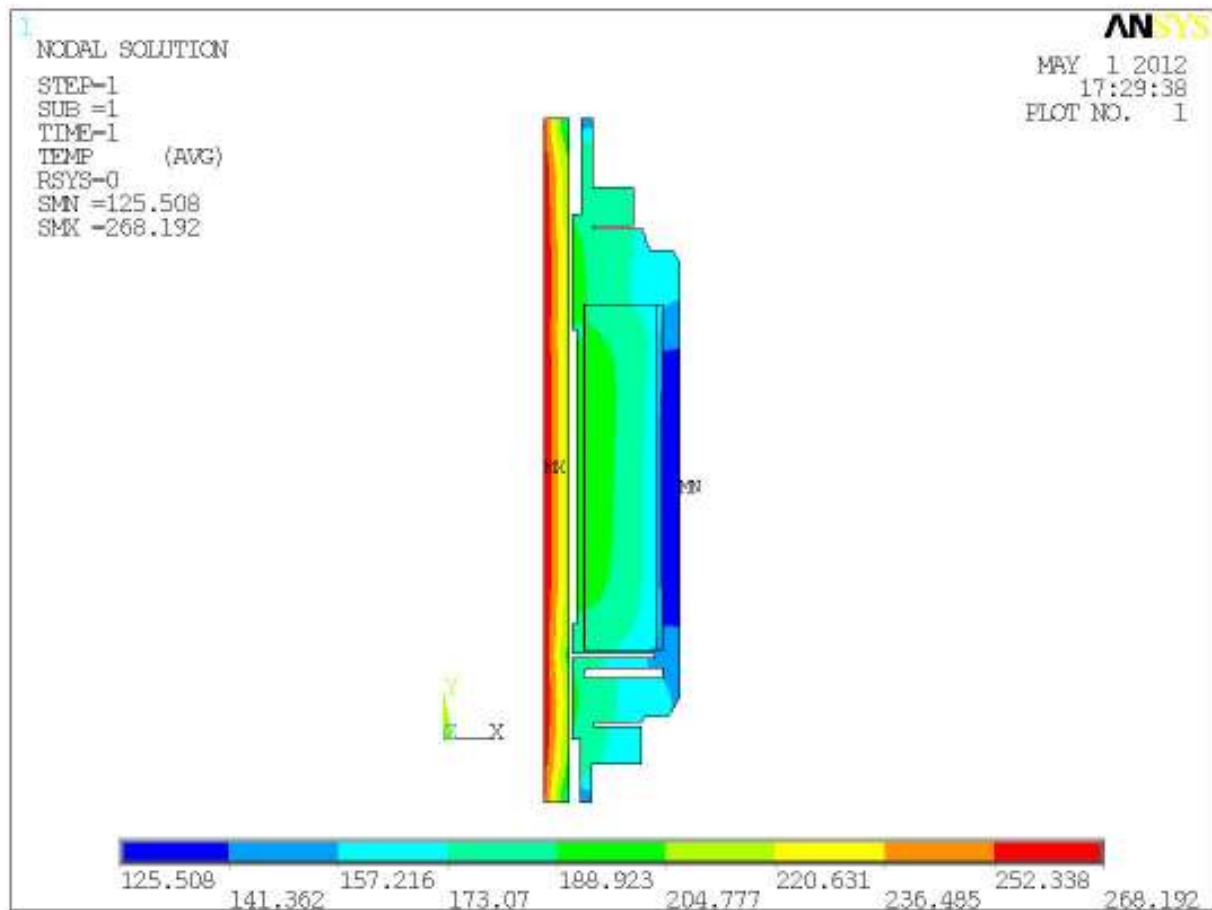
Na obrázcích č.12 až č.14 lze vidět rozložení teplot na elektromagnetech. Je zde dobře směr odvodu tepla. Z obrázků můžeme také vidět již výše zmíněný jev. Kdy u záchytného elektromagnetu je skokový rozdíl teploty mezi vnější a vnitřní stranou vnitřní izolace a u tažného a přídržného nikoliv. Dále je patrné, že ačkoliv maximální teploty jsou téměř shodné u všech elektromagnetů, tak teplota vinutí tažného a přídržného elektromagnetu je přibližně o 10°C větší než u elektromagnetu záchytného.



Obr. č.12 Teplotní pole záchytného elektromagnetu při nominálním režimu



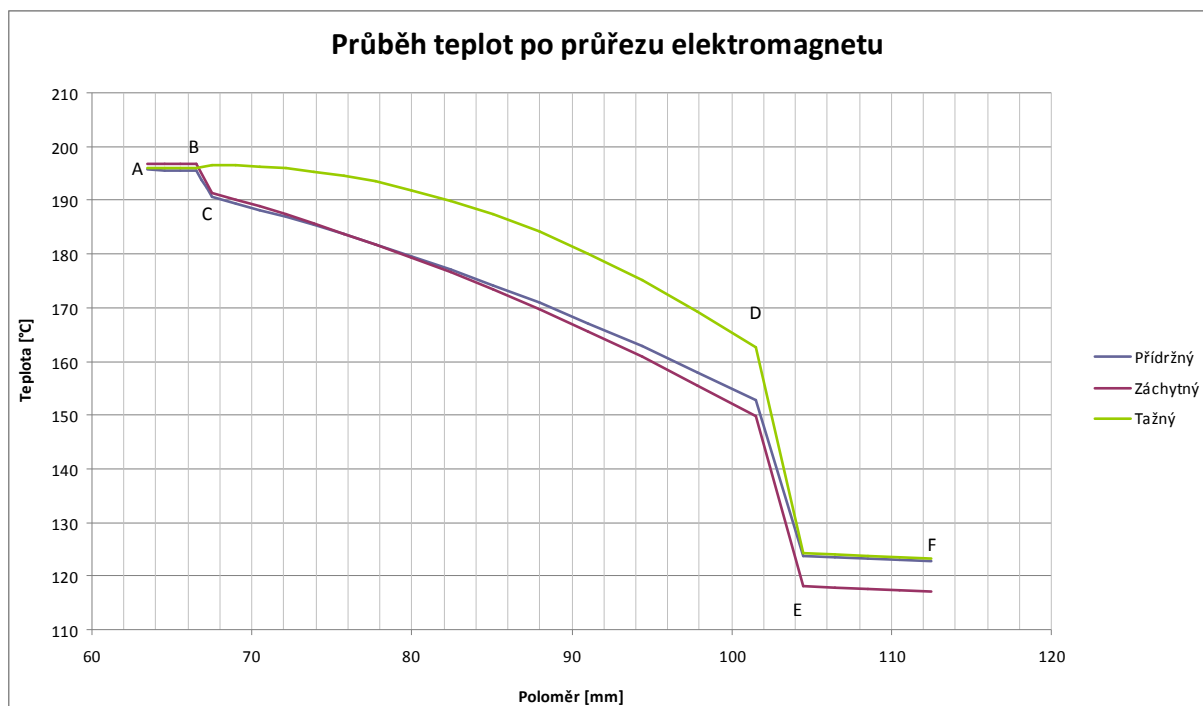
Obr. č.13 Teplotní pole záchytného elektromagnetu při nominálním režimu



Obr. č.14 Teplotní pole záchytného elektromagnetu při nominálním režimu

## 8.2 Provozní režim ŠEM3

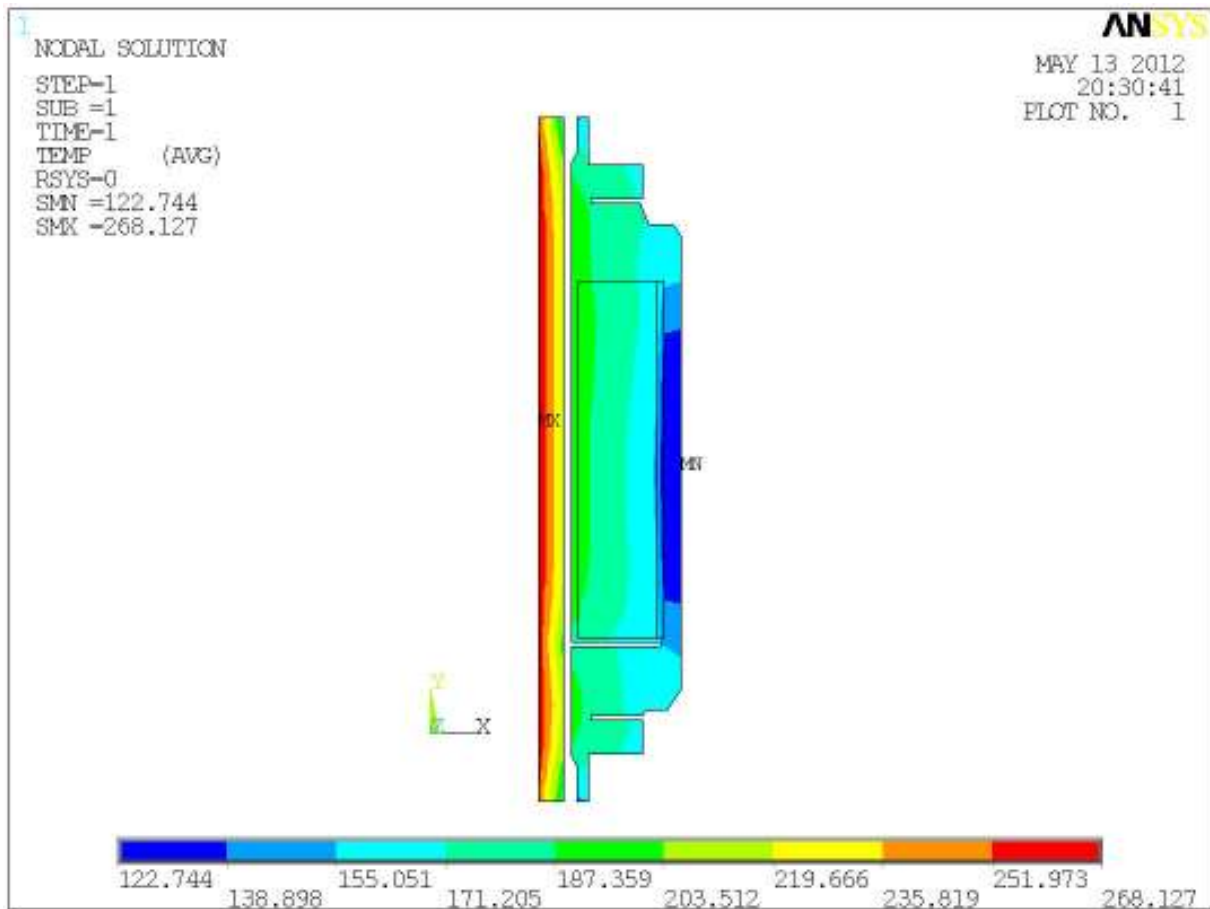
Jako v předchozím případě, i zde je patrný velký skok v teplotě mezi vnější a vnitřní stranou tepelné izolace (body B-C, E-D). Z grafu dále vyplývá, že v oblasti z vnějších stran izolací je teplota téměř konstantní (body A-B, F-E). Na grafu můžeme vidět velký rozdíl mezi křivkou záchytného s přídržným elektromagnetem a tažným elektromagnetem. U záchytného a přídržného elektromagnetu je křivka mezi body C -D téměř lineární, kdežto u zbývajícího elektromagnetu není. To je dáno velikostí tepla generovaného elektromagnetem. Teplo generované záchytným a přídržným elektromagnetem je tak malé, že se v křivce téměř neprojeví. Teplo generované v tažném elektromagnetu je naopak velké a tím v křivce zmizí skok mezi body B-C.



Obr. č.15 Graf průběhu teploty po průřezu elektromagnetu u ŠEM3

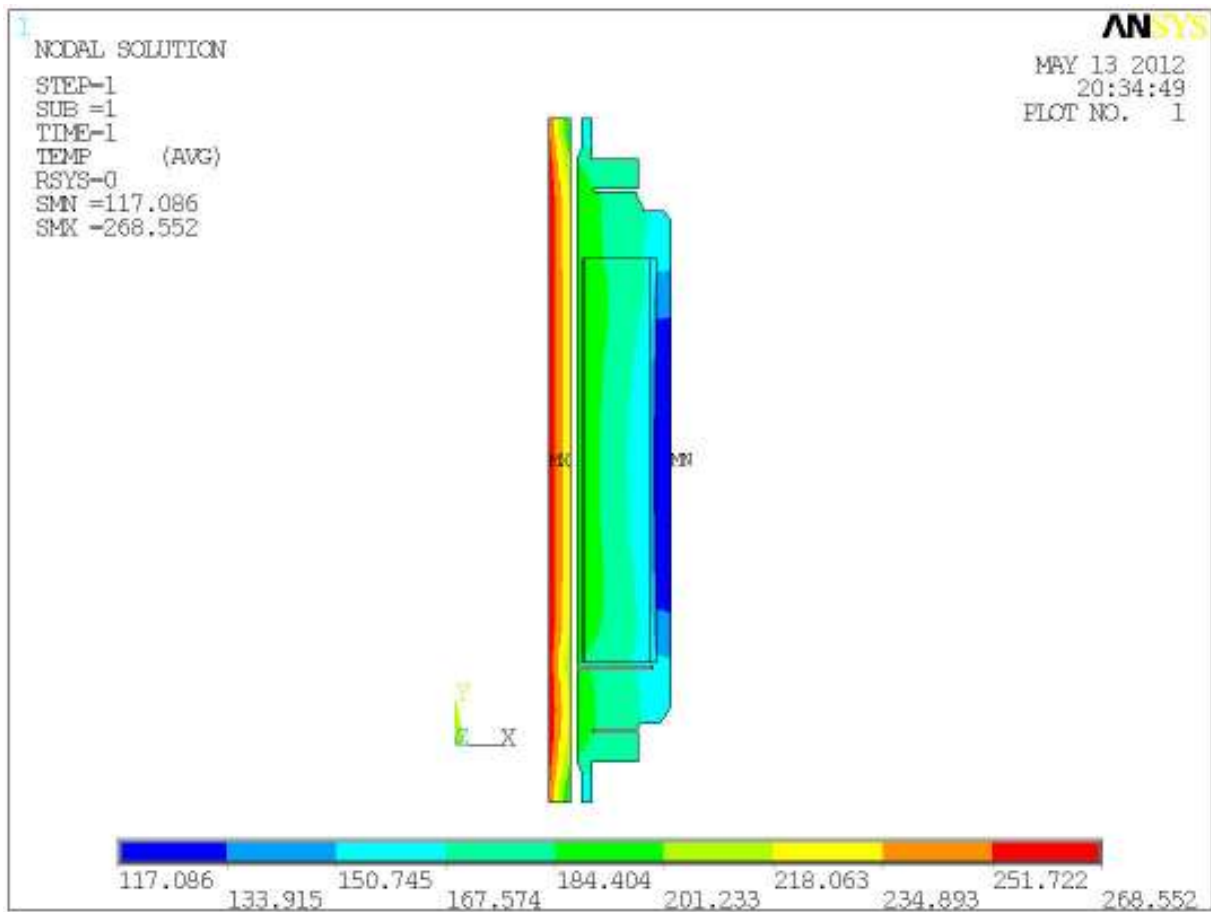
Na obrázcích č.16 až č.18 lze vidět rozložení teplot na elektromagnetech. Je zde dobře směr odvodu tepla. Z obrázků můžeme také vidět již výše zmíněný jev. Kdy u záchytného a

přídržného elektromagnetu je skokový rozdíl teploty mezi vnější a vnitřní stranou vnitřní izolace a u tažného nikoliv. Dále je patrné, že maximální teploty jsou téměř shodné u všech elektromagnetů. Teplota vinutí tažného elektromagnetu je přibližně o 10°C větší než u elektromagnetu záchytného a přídržného.

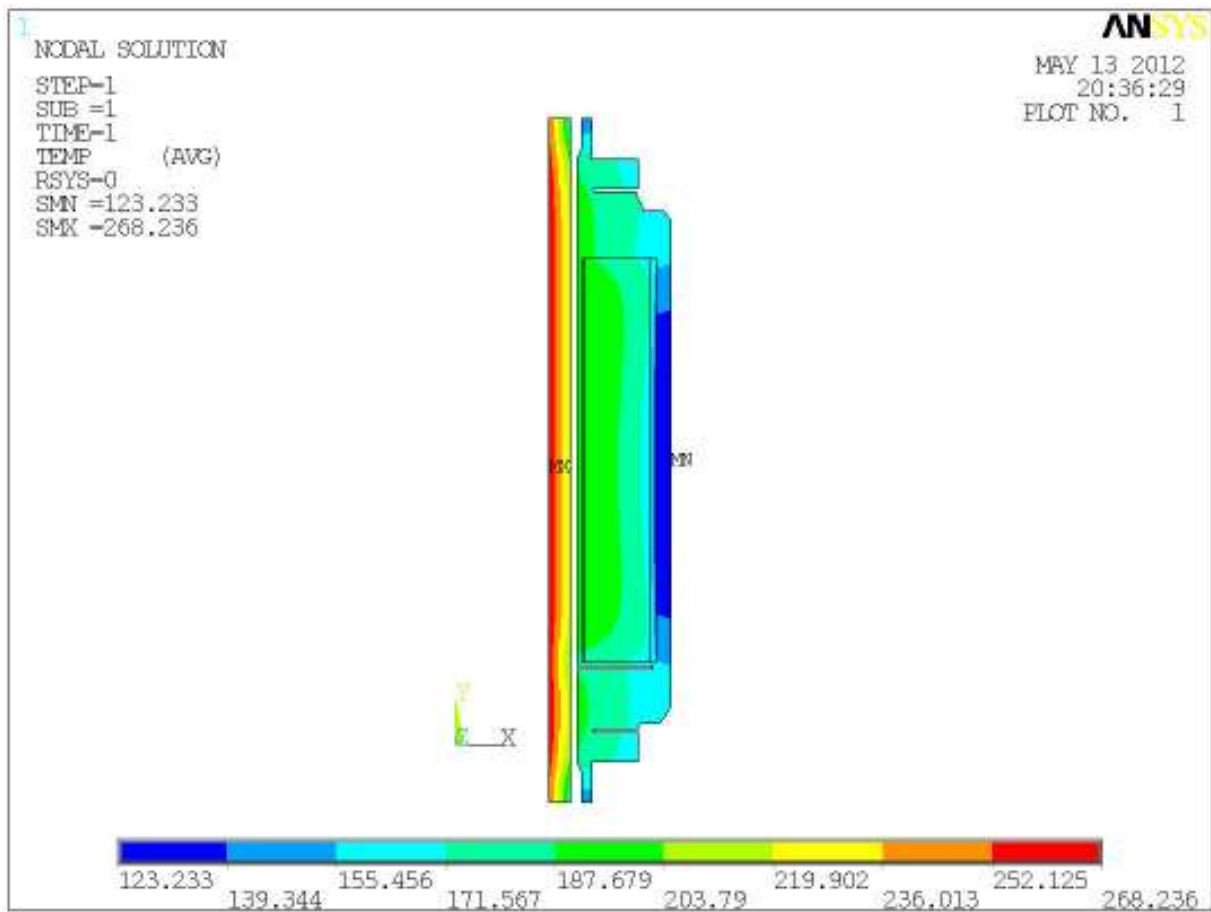


Obr. č.16 Teplotní pole přídržného elektromagnetu při nominálním režimu





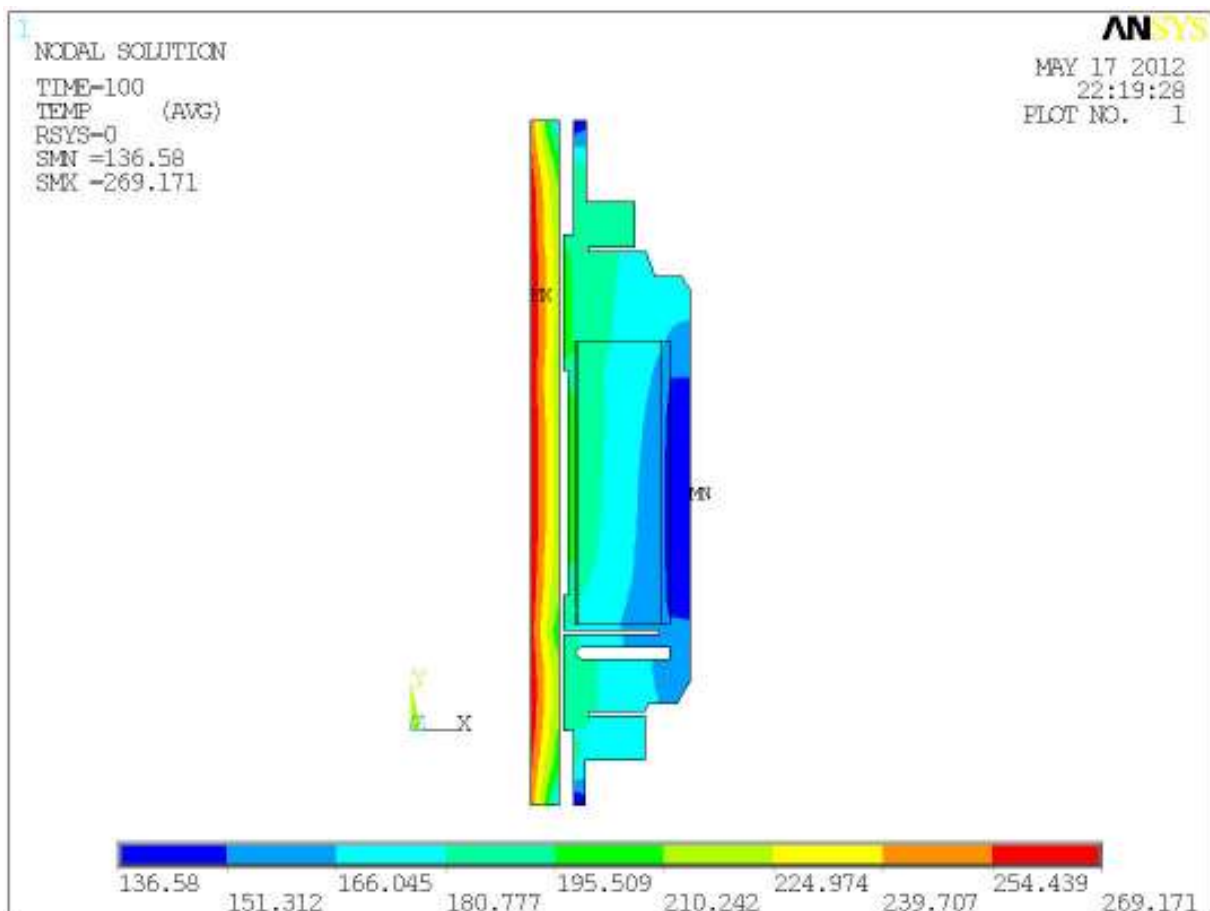
Obr. č.17 Teplotní pole záchytného elektromagnetu při nominálním režimu



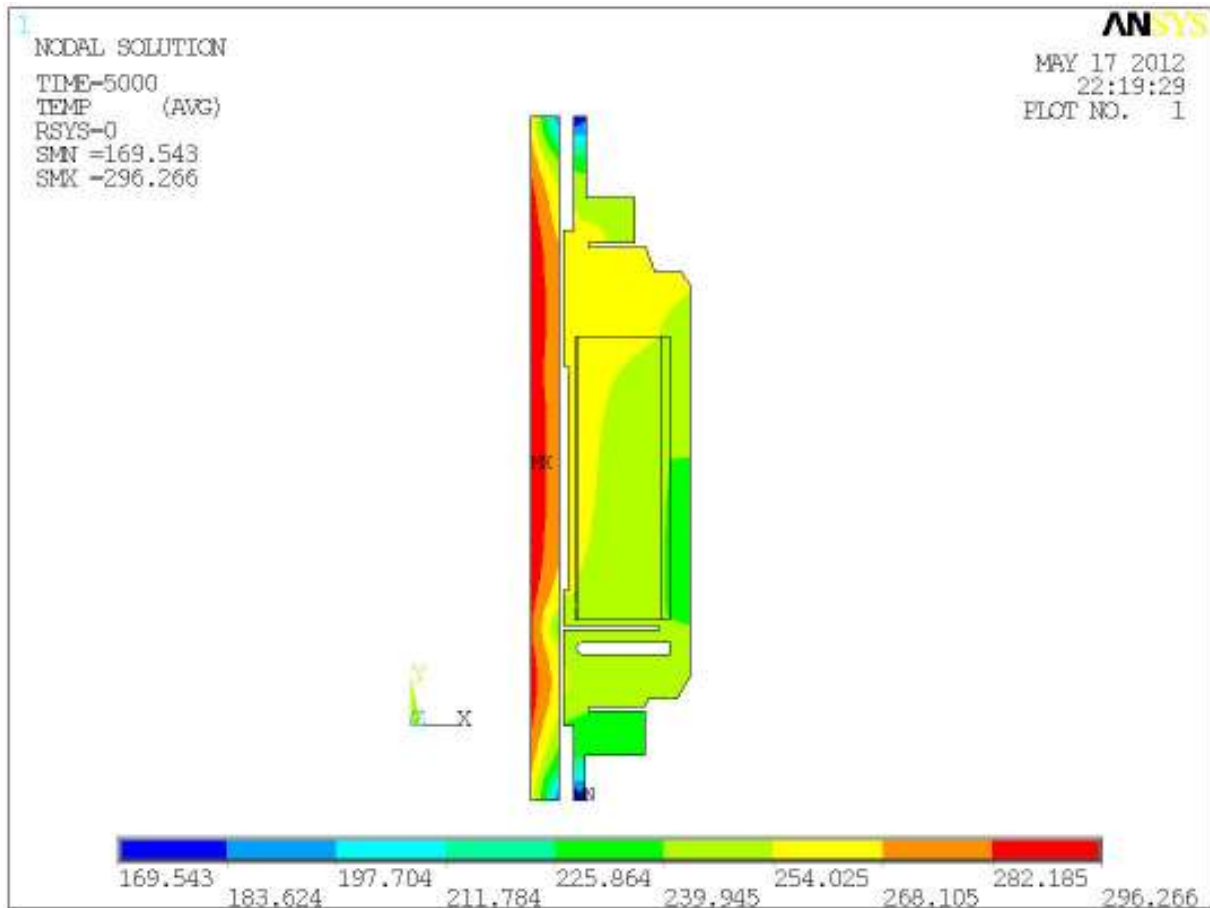
Obr. č.18 Teplotní pole tažného elektromagnetu při nominálním režimu

### 8.3 Havarijní režim LKP-M/3

Při výpadku vzduchového chlazení dochází k prudkému nárůstu teplot. Hlavním úkolem této práce bylo zjištění časového průběhu ohřevu vinutí elektromagnetů a času, kdy elektromagnet dosáhne teploty 300 °C. Na následujících obrázcích lze pozorovat postupný ohřev elektromagnetu v čase od 0 s do 40000 s.

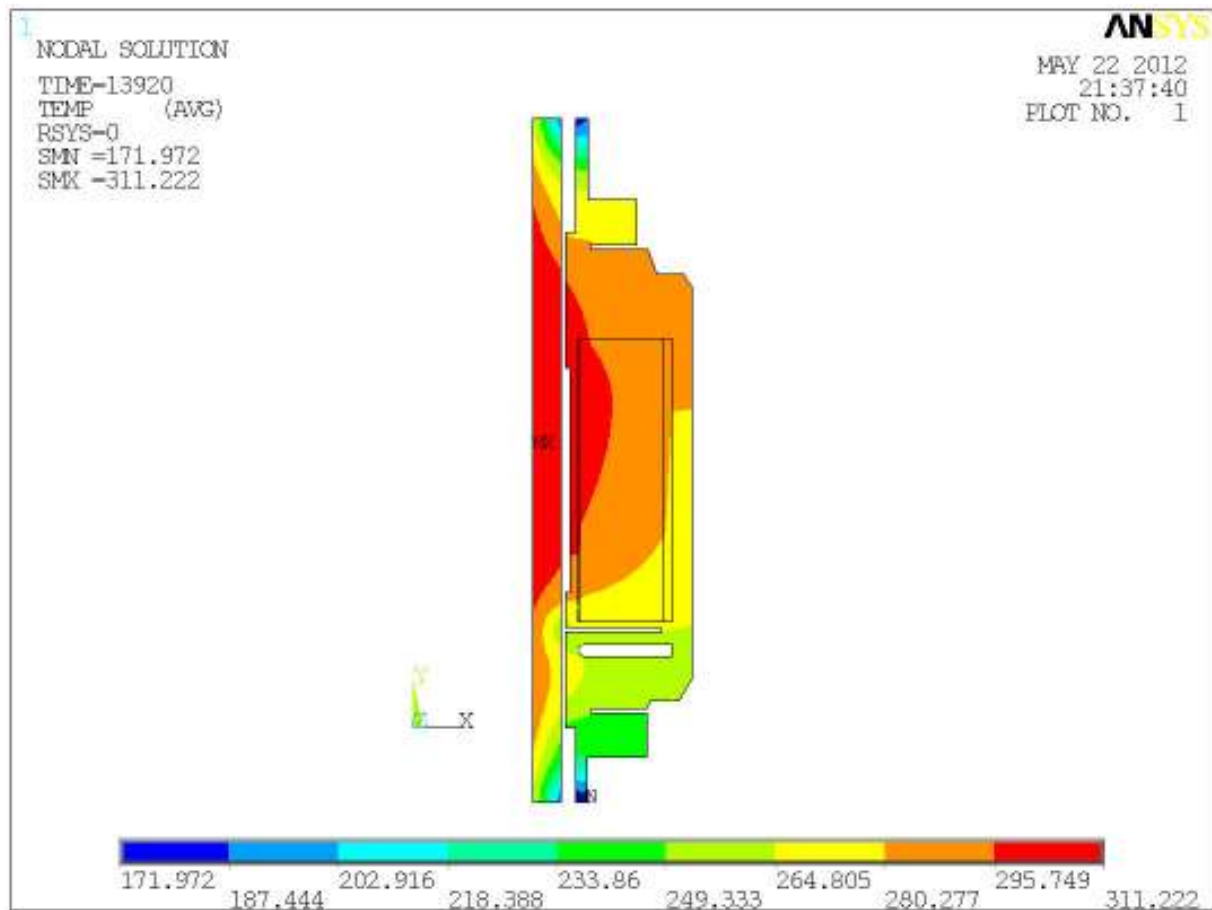


Obr. č.19 Teplotní pole záchytného elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=100$  s

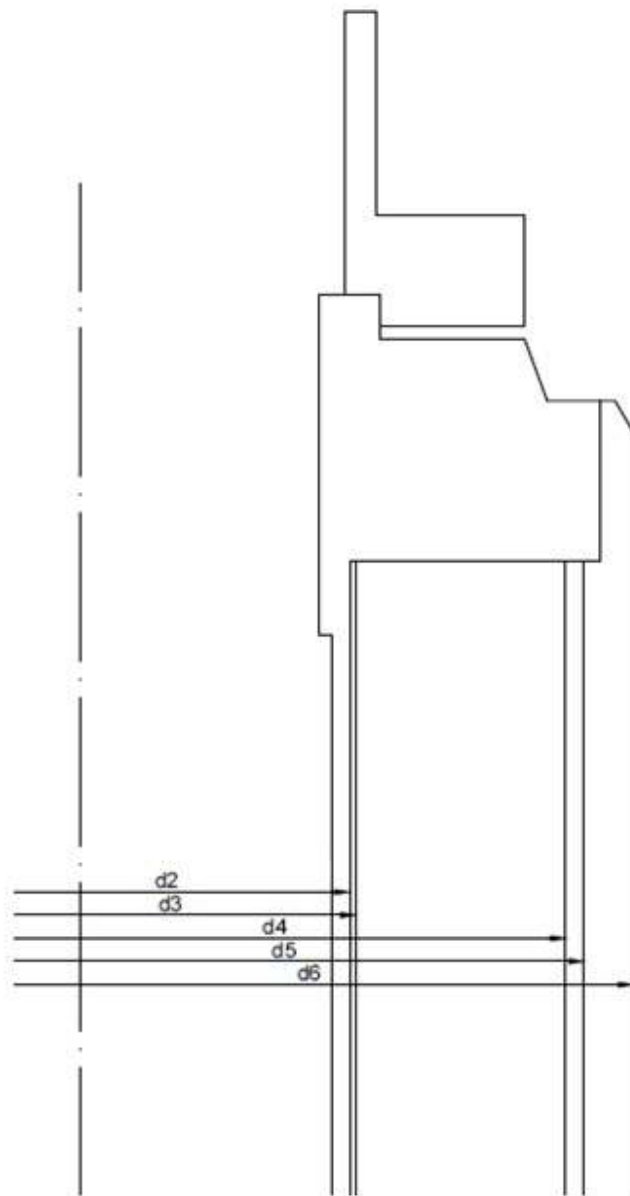


Obr. č.20 Teplotní pole záchytného elektromagnetu pro havarijný režim v čase  $t=5000$  s

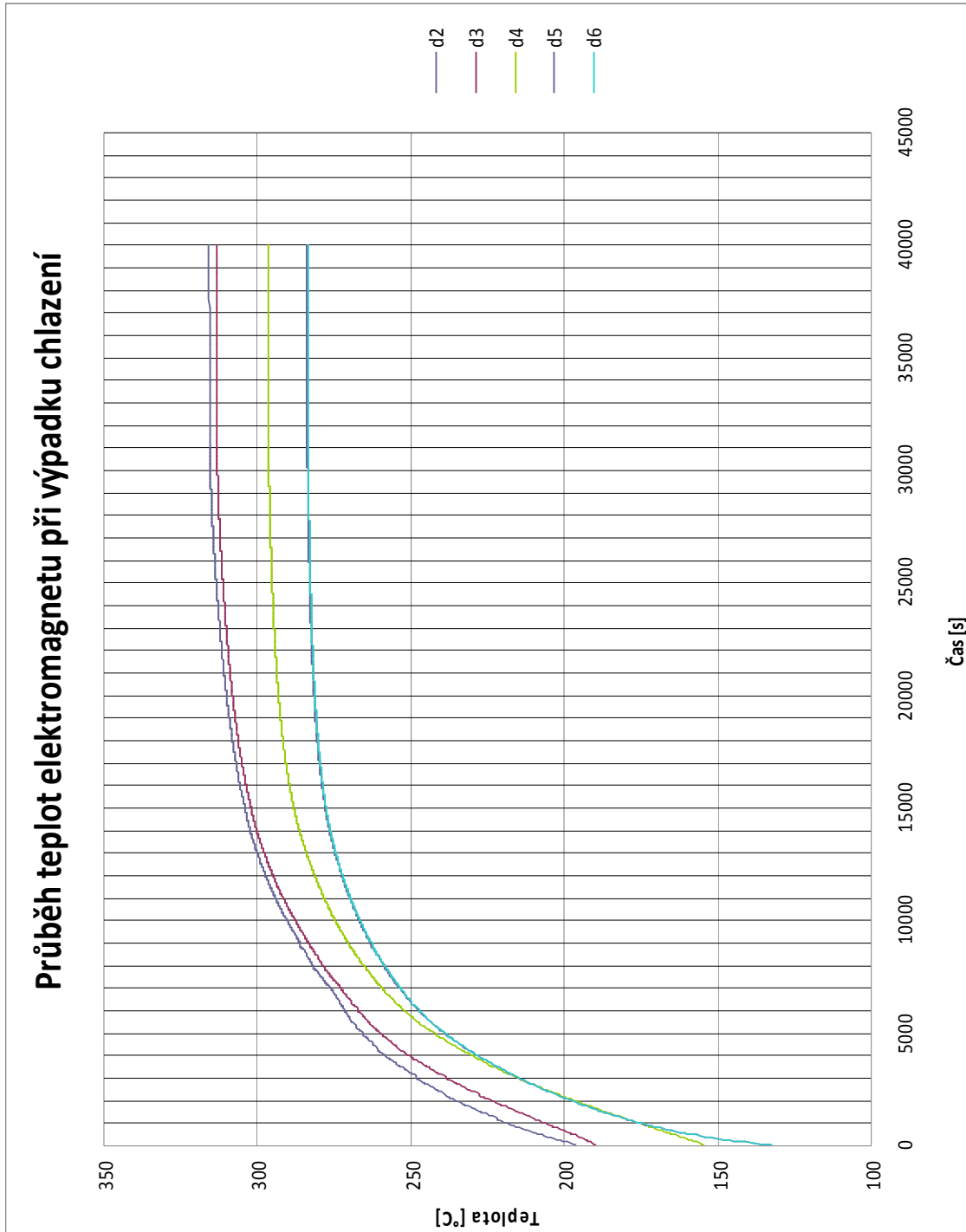
Na obrázku č.21 je vidět rozložení teplot v čase  $t=13920$  s. Graf na obrázku č.23 ukazuje rozložení teplot v závislosti na době od výpadku chlazení. Z grafu bylo odečteno, že v čase  $t=13920$  s dochází k dosažení teploty  $300$  °C v elektromagnetu. Hodnoty teplot byly odečteny v jedné polovině výšky elektromagnetu, aby byly hodnoty brány ve stejném místě ve všech elektromagnetech. Průměry elektromagnetu, na kterých byly sledovány teploty, jsou vidět na obrázku č.22. V grafu je též vidět, že od času  $t=30000$  s se teplota elektromagnetu dále téměř nemění.



Obr. č.21 Teplotní pole záchytného elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=13920$  s

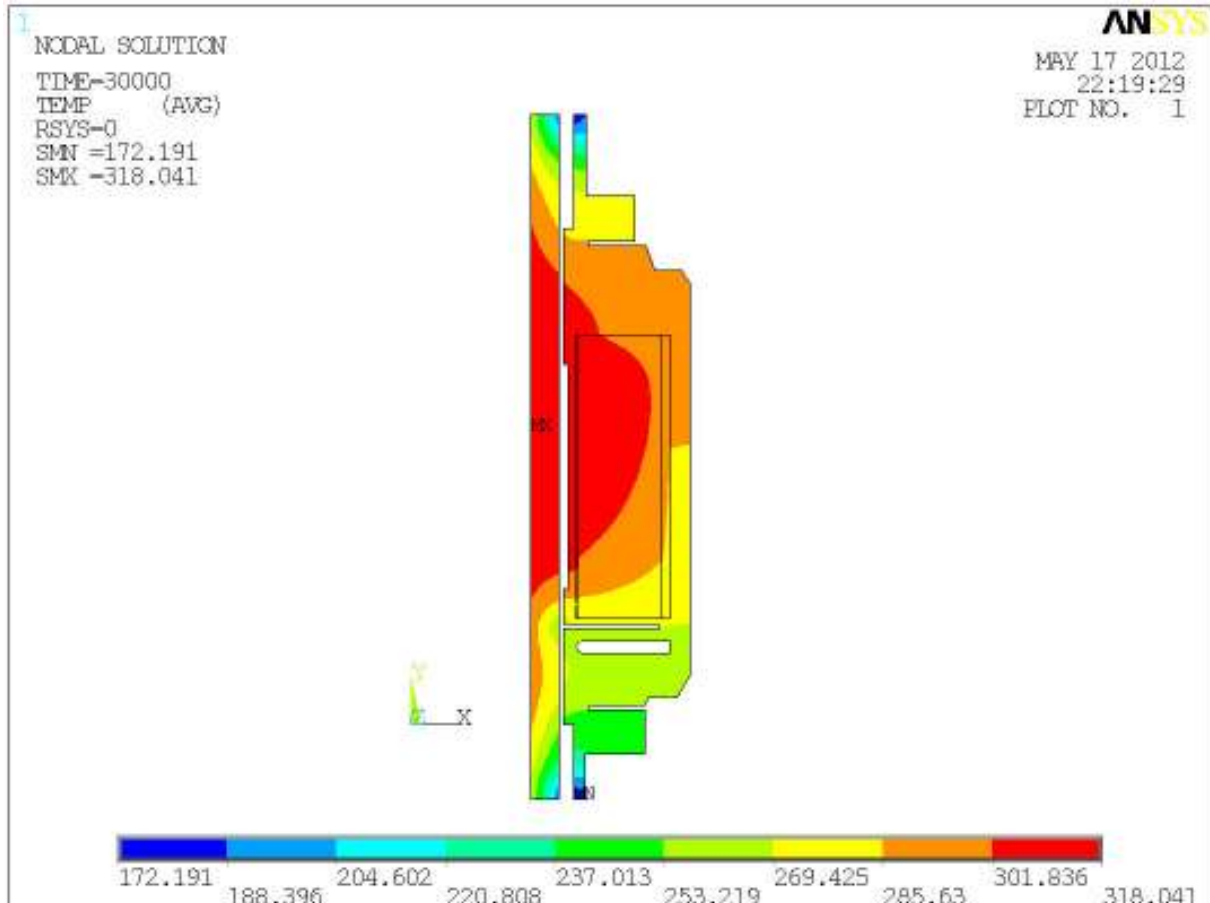


Obr. č.22 Průměry, pro sledování teplot



Obr. č. 23 Graf rozložení teplot u záchytného elektromagnetu v čase u LKP-M/3

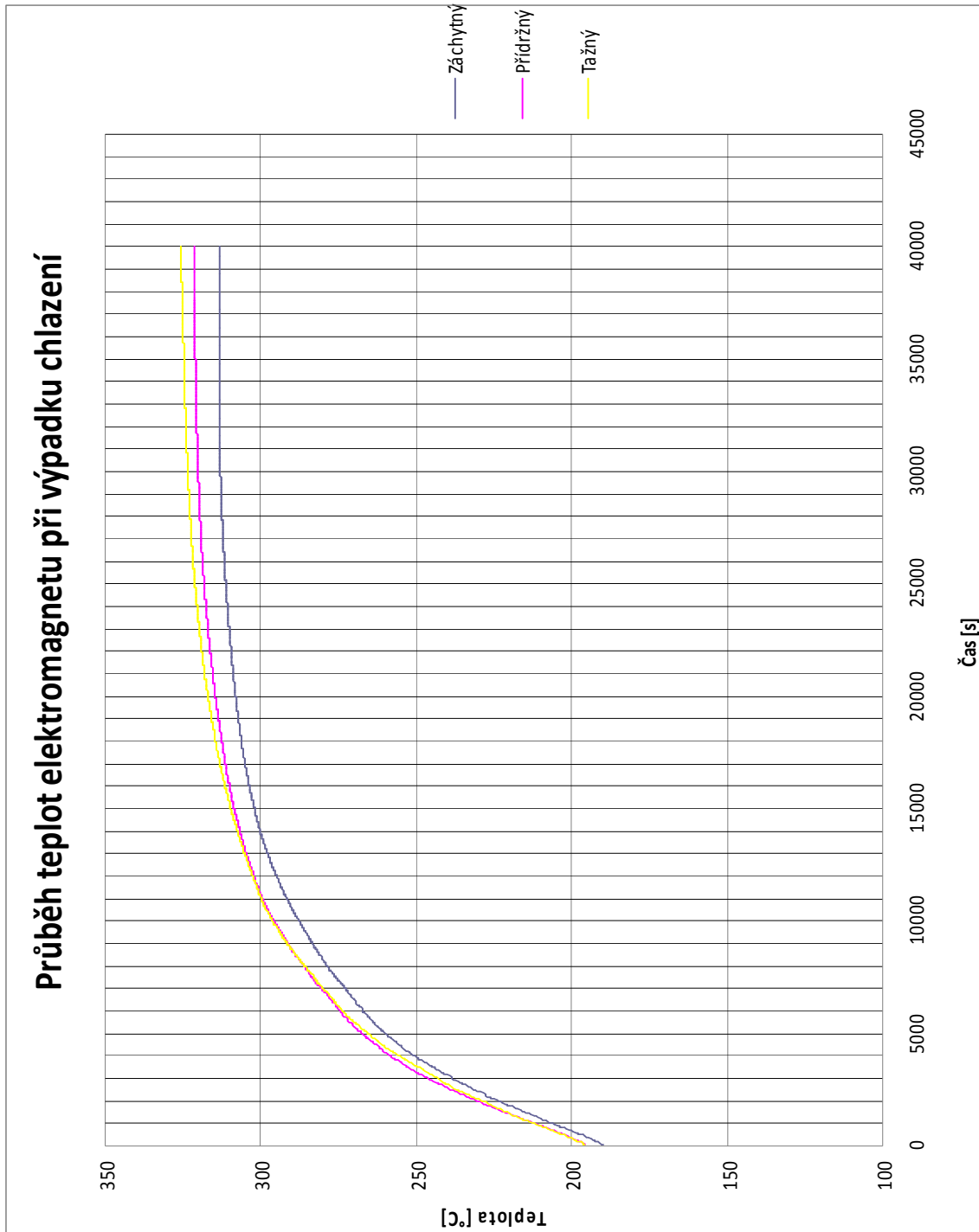
Na obrázku č.24 je vidět teplotní pole v čase  $t=30000$  s. Toto teplotní pole se s rostoucím časem již téměř nemění.



Obr. č.24 Teplotní pole elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=30000$  s

V grafu na obrázku č.25 můžeme vidět pro porovnání křivky ohřevu jednotlivých elektromagnetů na průměru  $d_3$ . Kde tažný a přídržný elektromagnet mají rychlejší ohřev než záchytný a to z důvodu více než dvojnásobných hodnot vývinu tepla vinutí. Grafy s křivkami ohřevu u tažného a přídržného elektromagnetu na všech průměrech jsou v příloze.

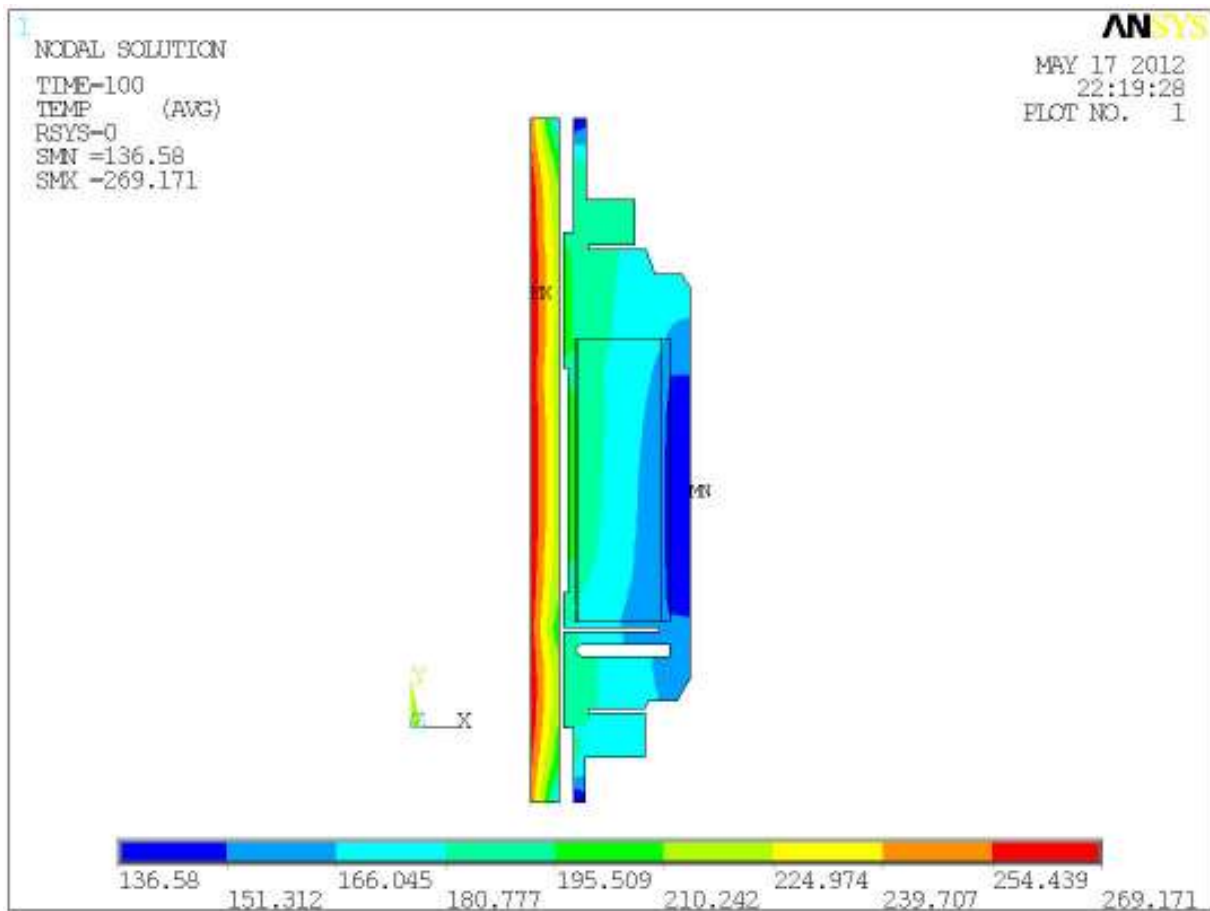




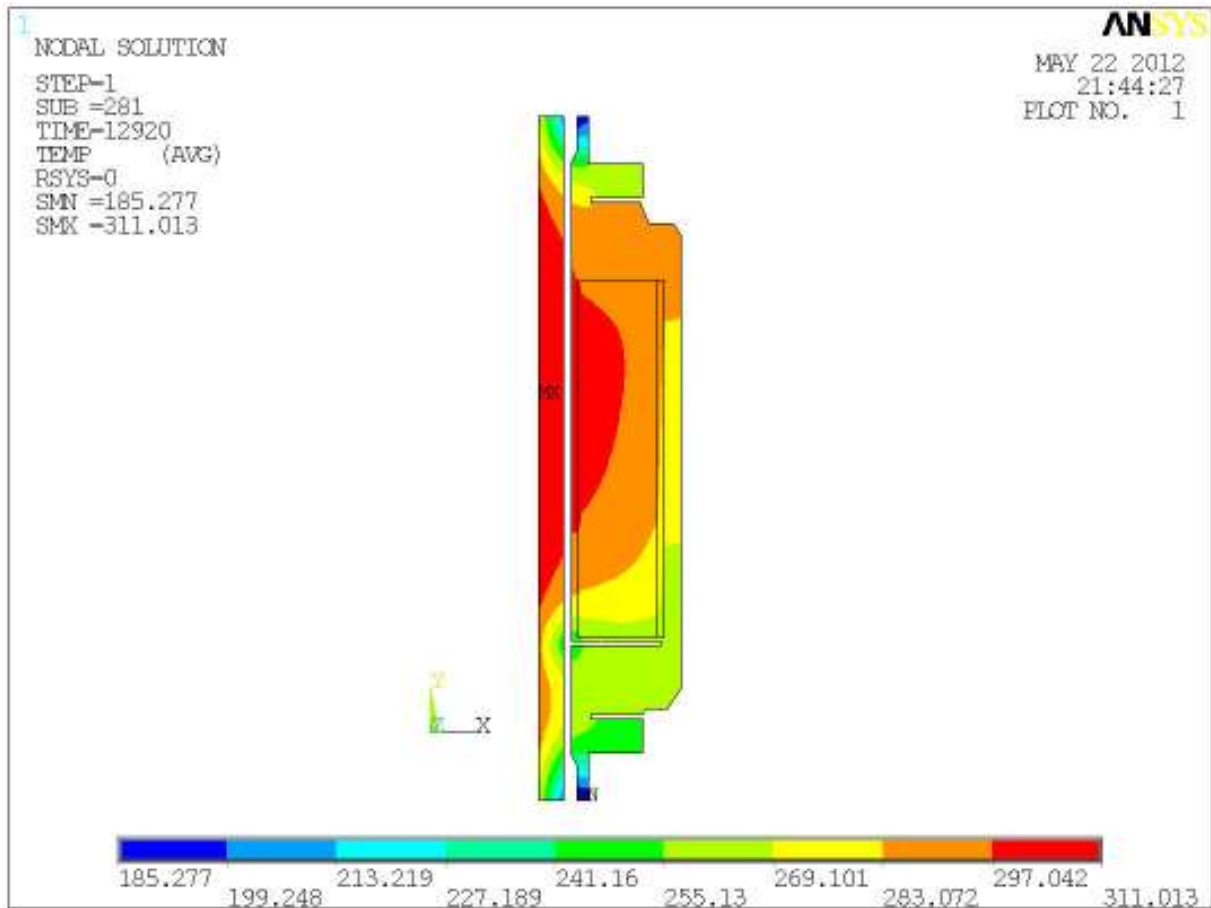
Obr. č. 25 Graf porovnání rychlosti ohřevu elektromagnetů u LKP-M/3

## 8.4 Havarijní režim ŠEM3

Stejně jako v předchozím výpočtu, lze i nyní sledovat nárůst teplot v čase při výpadku chlazení bloku elektromagnetů. Na obrázku č.26 je vidět rozložení teplot v čase 100 s.

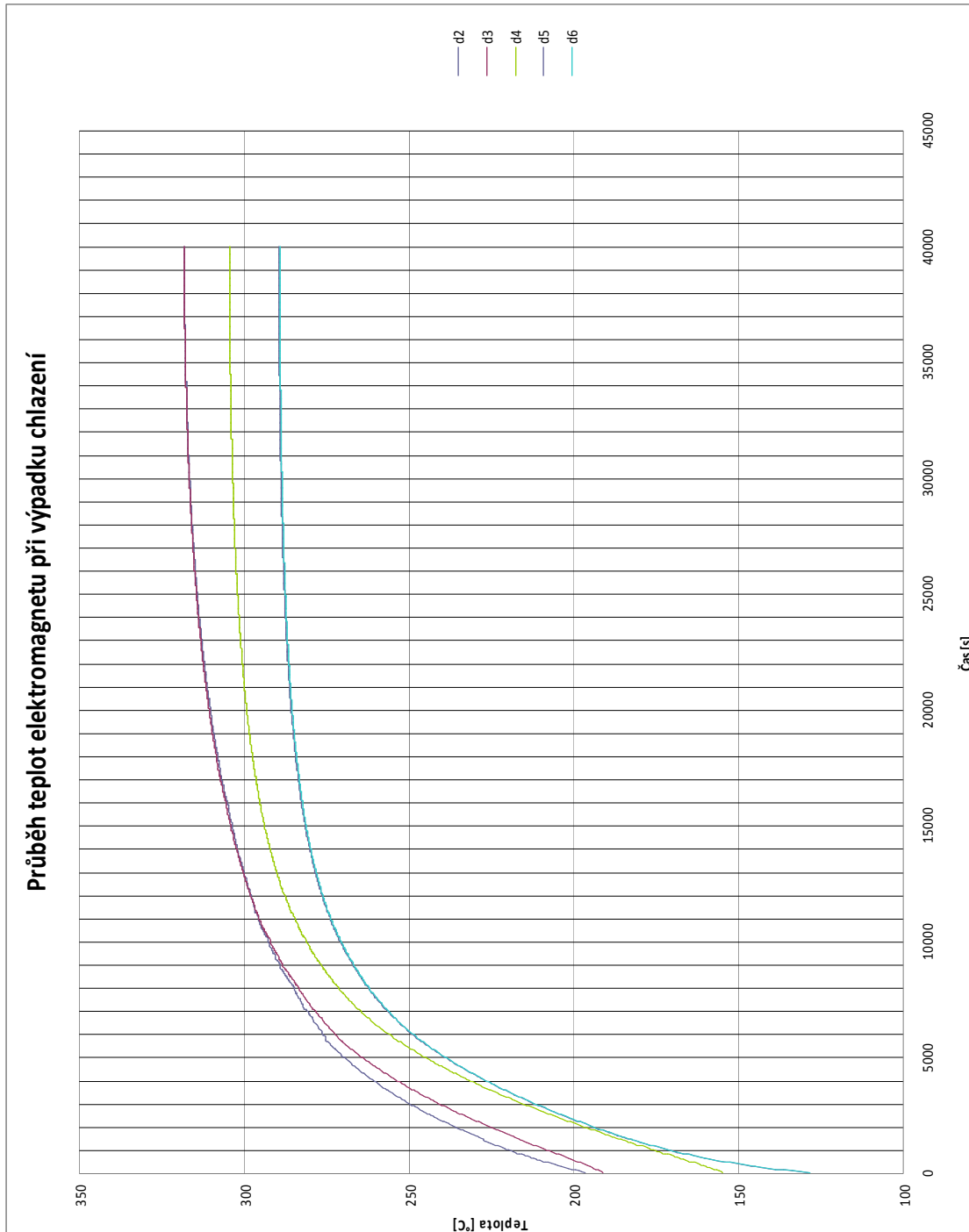


Obr. č.26 Teplotní pole přídržného elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=100$  s



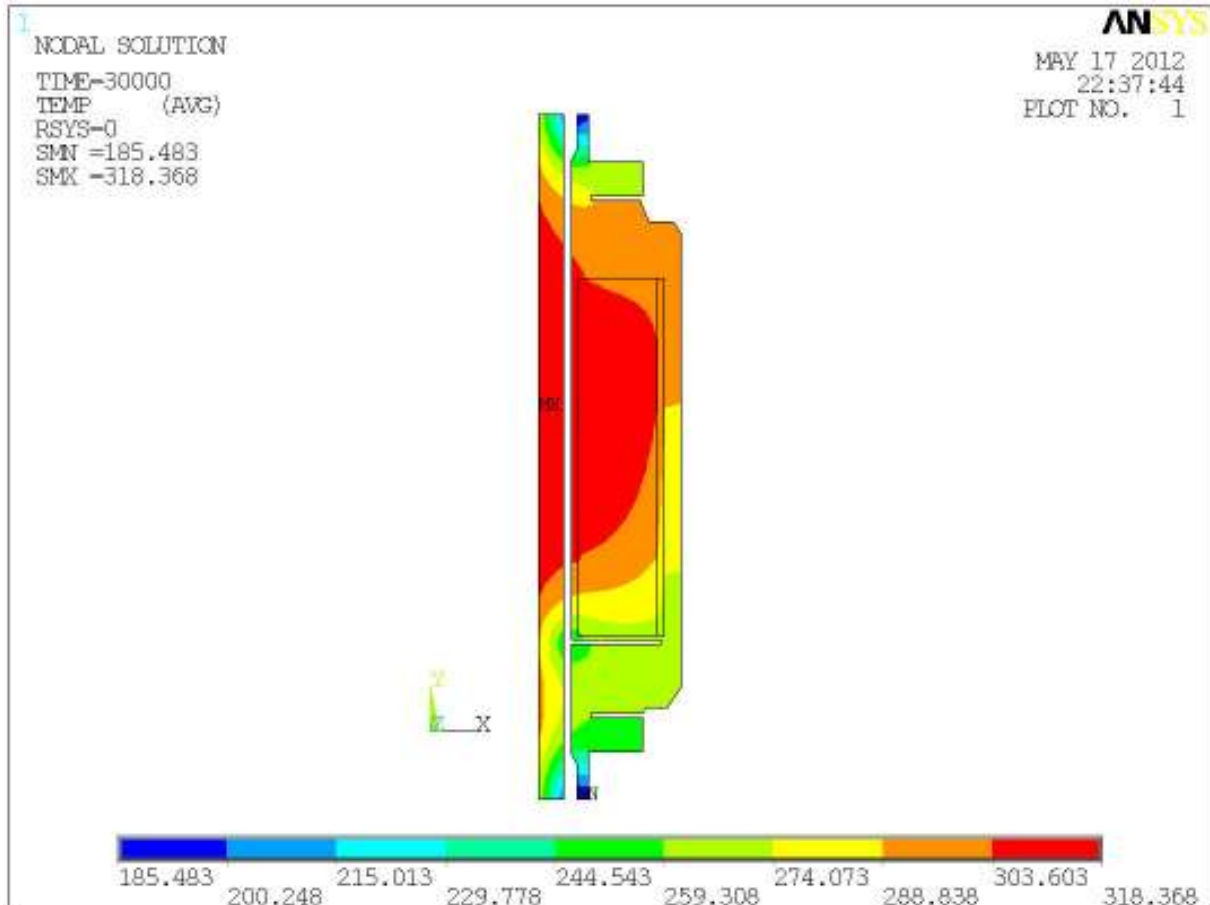
Obr. č.27 Teplotní pole přídržného elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=12920$  s

Na obrázku č.27 je vidět rozložení teplot v elektromagnetu v čase  $t=12920$  s. V tomto čase dochází k dosažení teploty vinutí  $300$  °C. To je dobře patrné z následujícího grafu.



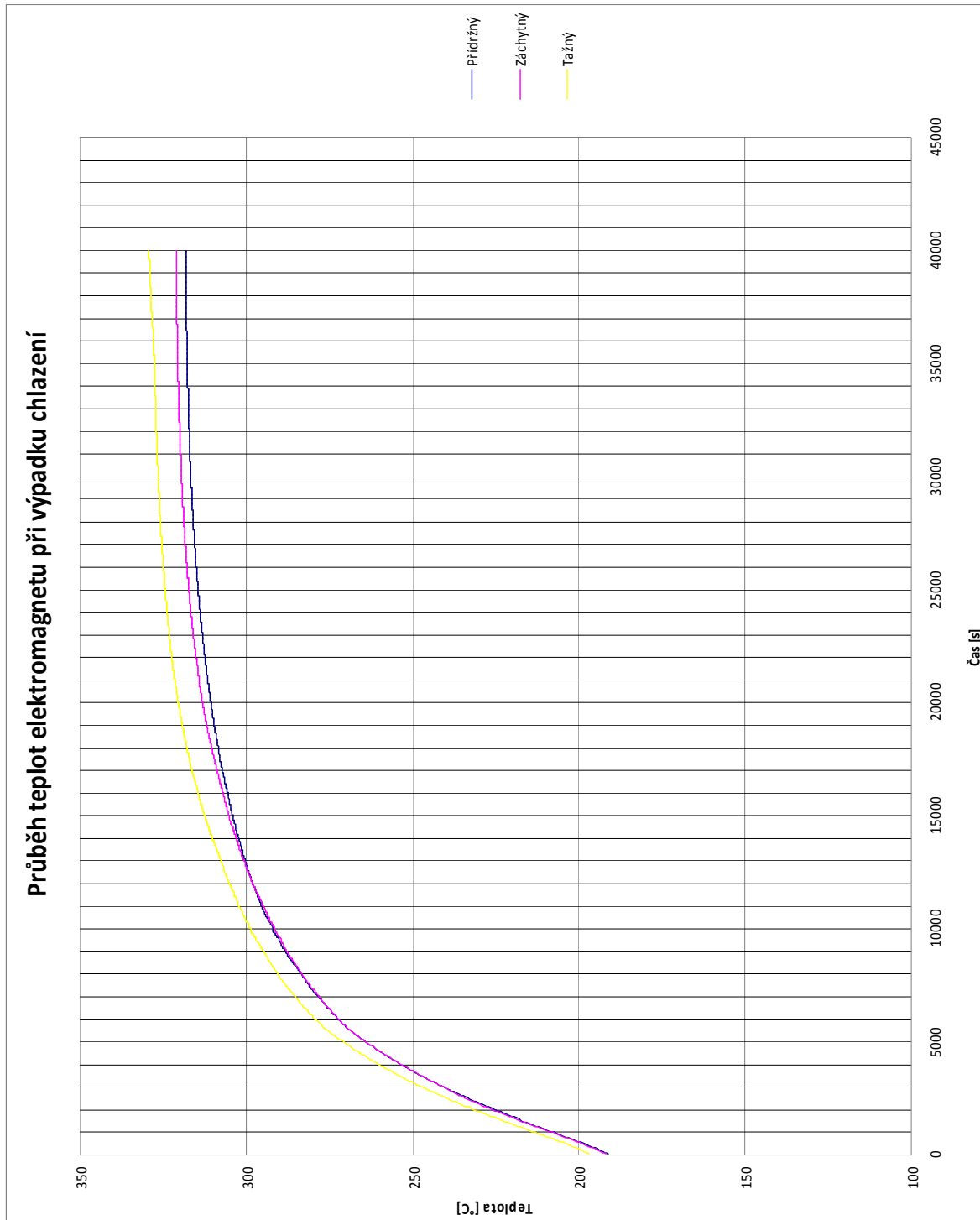
Obr. č. 28 Graf rozložení teplot u záchytného elektromagnetu u ŠEM3

Na obrázku č.29 je vidět teplotní pole v čase  $t=30000$  s. Toto teplotní pole se s rostoucím časem již téměř nemění.



**Obr. č.29** Teplotní pole záchytného elektromagnetu pro havarijní režim v čase  $t=30000$  s

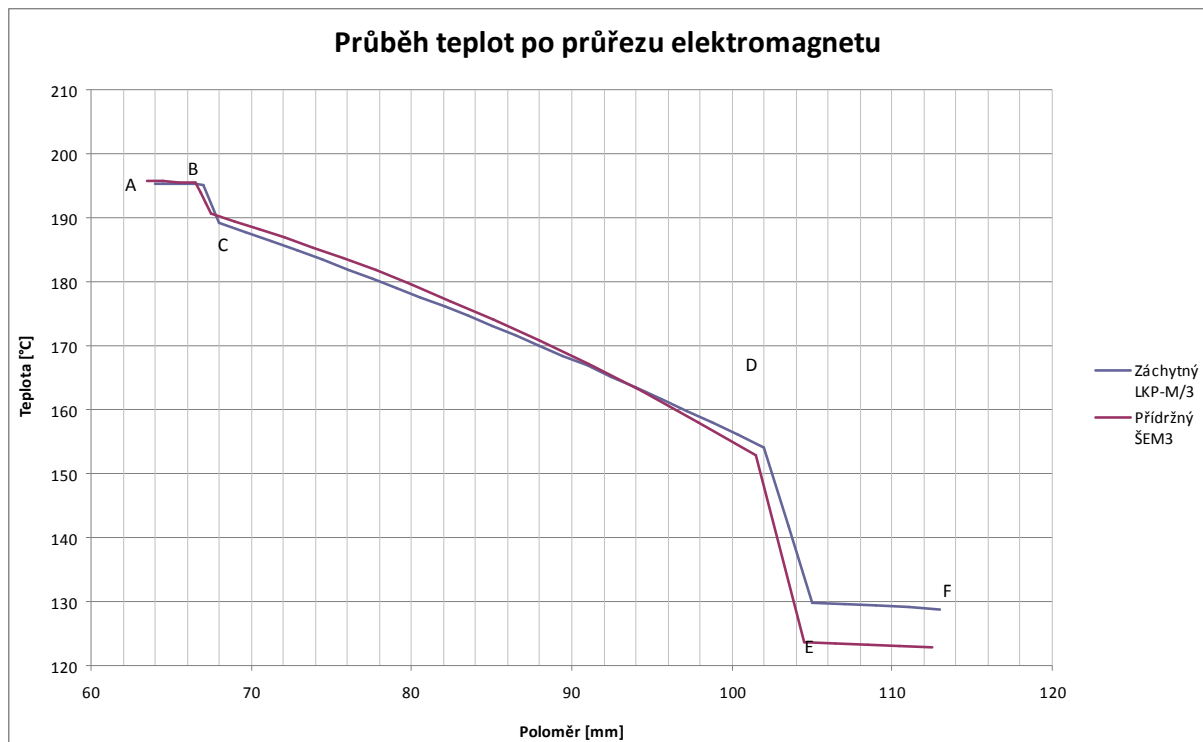
V grafu na obrázku č.30 můžeme vidět pro porovnání křivky ohřevu jednotlivých elektromagnetů na průměru  $d_3$ . Kde tažný elektromagnet má rychlejší ohřev než záchytný a přídržný a to z důvodu více než dvojnásobných hodnot vývinu tepla vinutí. Grafy s křivkami ohřevu u tažného a záchytného elektromagnetu na všech průměrech jsou v příloze.



Obr. č. 30 Graf porovnání rychlosti ohřevu elektromagnetů u ŠEM3

## 9 Závěr

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že za provozních podmínek je teplota elektromagnetů pod maximální provozní teplotou vinutí elektromagnetů  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která vyplynula z konstrukčního návrhu. Výsledné rozložení teplot pro nominální režim se u obou pohonů příliš neliší. Nejvíce nás zajímá rozdíl u záchytného elektromagnetu u LKP-M/3 a přídržného elektromagnetu u ŠEM3, z důvodu toho, že na těchto elektromagnetech je v průběhu stání pohonu zavěšen celý regulační orgán (klastr). Z grafu na obr.č. 31 můžeme vidět že přídržný elektromagnet má přibližně o  $2^{\circ}\text{C}$  vyšší teplotu uvnitř vinutí, kdežto teplota na vnějším povrchu elektromagnetu je o přibližně  $6^{\circ}\text{C}$  nižší.



Obr. č.31 Graf průběhu teplot po průřezu elektromagnetů u LKP-M/3 a u ŠEM3

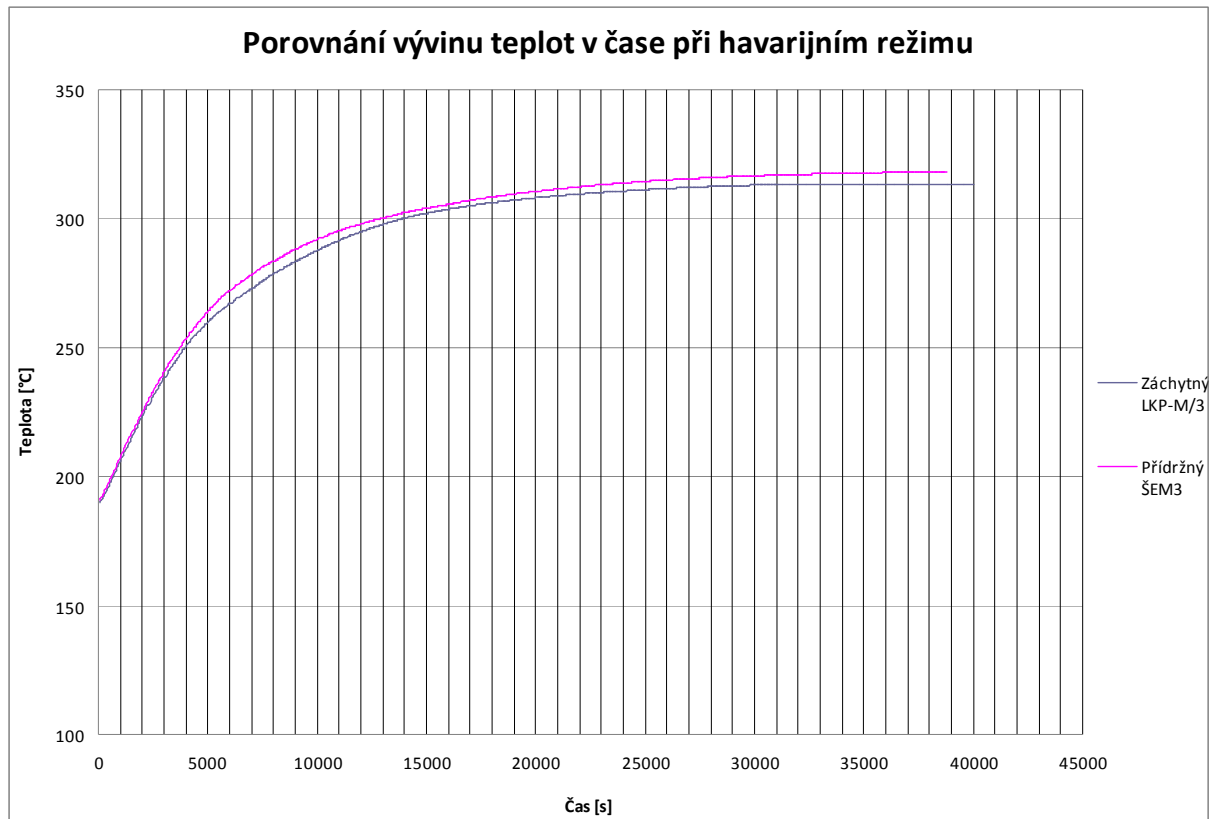
Tento rozdíl je dán vyšším vstupním proudem do přídržného elektromagnetu pohonu ŠEM3. Vyšší proud je zde z toho důvodu, aby byla dosažena dostatečná síla pro držení závěsné tyče s regulačním orgánem. U pohonu LKP-M/3 je tato síla zvětšena v důsledku zvětšení průměru pláště elektromagnetu na 226 mm namísto 225 mm u pohonu ŠEM3. Nižší teplota vnějšího povrchu u ŠEM3 je dána větší ochlazovanou plochou.

V havarijním režimu při výpadku chlazení dochází k prudkému nárůstu teploty celého bloku. I v tomto režimu se zaměříme na již výše zmíněné dva elektromagnety. Maximální provozní teplota vinutí cívky elektromagnetu je  $t=300$  °C. Této kritické teploty je dosahováno u pohonu LKP-M/3 za 13920 s, u pohonu ŠEM3 za 12920 s. Tento časový rozdíl může pomoci při odstraňování poruchy chlazení. Pokud se do výše uvedených časů podaří obnovit chlazení bloku elektromagnetů, pak se teplota vrátí na úroveň provozních parametrů. Pokud se obnova chlazení bloku elektromagnetů nepodaří, je nutno pohony odpojit a odstavit reaktor. Rozdílné průběhy ohřevu elektromagnetu jsou vidět na obrázku č.32, kde je graf srovnávající průběhy u obou pohonů.

Z technického hlediska jsou tedy konstrukční rozdíly mezi pohonem LKP-M/3 a pohonem ŠEM3 výhodnější pro pohon LKP-M/3. Nejvýznamějším přínosem je snížení pracovních proudů u pohonu LKP-M/3, čímž se sníží vnitřní vývin tepla ve vinutí elektromagnetů. Dalším přínosem je i uspořádání elektromagnetů. U pohonu LKP-M/3 je umístěn elektromagnet držící závěsnou tyč mezi tažným a přídržným elektromagnetem.

Všechny výše uvedené konstrukční rozdíly vedou i k rozdílům v čerpání životnosti bloku elektromagnetů mezi oběma modely pohonů. U pohonu ŠEM3 je životnost bloku elektromagnetů 30 let. O 10 let delší životnost bloku elektromagnetů u pohonu LKP-M/3 je z ekonomického hlediska velkým přínosem, hlavně pro konečného odběratele a přináší značnou konkurenční výhodu pro jeho výrobce.





**Obr. č.32 Graf průběhu ohřevu při výpadku chlazení u pohonů LKP-M/3 a ŠEM3**

## 10 Literatura

- [1] <http://pris.iaea.org/Public/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>, 2012/05/18
- [2] ZDEBOR, J., *Podklady k přednáškám z předmětu Primární okruh jaderných elektráren*, 2010
- [3] MÜLLER, V., *Lineární krokový pohon modernizovaný LKP-M/3 pro reaktory VVER 1000/320 JE Temelín, Ae 11323/Dok*, 2005
- [4] ŽÍŽEK, F., WALTER, J., *Tepelné a ventilační výpočty magnetů krokových pohonů pro provozní teplotu 300°C.*, VÚET 8530, 1995
- [5] VLČEK, J., *Experimentální výzkum teplotních polí a jejich změn včetně teplotních fluktuací, v LKP-M regulačního orgánu reaktoru VVER 1000, Ae 6972/Dok*, 1989
- [6] MARTINEC, I., *Pohon LKP-M/3 s UP-2 Technický popis a návod na obsluhu, Ae 11417/Dok*, 2010
- [7] С.Б. РБЮКОВ, *ПРИВОД СУЗ ШЭМ-3, Пояснительная записка, 466Б.06.10 ПЗ*, 2007
- [8] Uživatelský manuál programu ANSYS