



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Optimalizace návrhu distribučního transformátoru

Distribution Transformer Optimization

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Jan Štěpánek

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpánek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **393939**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace návrhu distribučního transformátoru

Název diplomové práce anglicky:

Distribution Transformer Optimization

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte současné možnosti optimalizace provedení distribučních transformátorů
- 2) Navrhněte DT transformátor 250 kVA, 22 / 0,4 kV, AN, důraz položte na minimum ztrát
- 3) Seznamte se s možností tepelné kontroly v prostředí multifyzikálního systému ANSYS
- 4) Pro tepelnou kontrolu stroje aplikujte modul ANSYS Thermal
- 5) Proveďte simulace funkce stroje v ANSYS Electronic ver. 17
- 6) Analyzujte vypočtená data.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Jezierski E., Gogolewski Z., Transformátory, Academia 1985
- [2] Nosek K., Hapl J., Stavba transformátorů, ČVUT v Praze, 1971
- [3] Manuály ANSYS Thermal, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017
- [4] Jarošek J., Návrh ekonomického transformátoru, Sborník BEZ, 1967

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Buhr CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh suchého distribučního transformátoru se sníženými ztrátami. V práci jsou zkoumány možnosti optimalizace návrhu aktivních částí transformátoru a možnosti jeho provedení. Dále na základě získaných informací je proveden elektromagnetický návrh stroje a jeho simulace. Hlavní důraz je kladen na ověření možnosti detailní tepelné kontroly navrženého stroje v programu Ansys Transient-Thermal.

Klíčová slova

Distribuční transformátor, amorfní fólie, Steinmetzův vztah, AutoCAD, Ansys, Transient-Thermal, Maxwell 3D

Annotation

This diploma thesis is focused on design of a dry distribution transformer with reduced losses. In the work I research optimization possibilities of the design of active parts of the transformer and the possibilities for implementation. Furthermore, based on the obtained information, I propose an electromagnetic draft of the machine and its simulations. Main focus is aimed for the verification of the detail heat control of the proposed machine in the program Ansys Transient-Thermal.

Key words

Distribution transformer, amorphous foil, Steimentz's equation, AutoCAD, Ansys, Transient-Thermal, Maxwell 3D

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 10. 5. 2017

.....
Jméno a příjmení

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	1
2	Možnosti provedení distribučních transformátorů.....	2
2.1	Magnetický obvod.....	2
2.1.1	Materiál magnetického obvodu	2
2.1.2	Výroba amorfních fólií	4
2.1.3	Tvar magnetického obvodu	5
2.2	Vinutí distribučního transformátoru.....	9
2.2.1	Vinutí nízkého napětí.....	10
2.2.2	Vinutí vysokého napětí	10
3	Tepelný obvod transformátoru	12
3.1	Způsob odvádění tepla	14
3.1.1	Konvekce	14
3.1.2	Kondukce	16
3.1.3	Radiace.....	18
3.2	Součinitel přestupu tepla.....	19
3.3	Stanovení součinitele přestupu tepla.....	20
3.4	Oteplení magnetického obvodu.....	22
3.5	Oteplení vinutí s plynným dielektrikem.....	23
4	Elektromagnetický návrh.....	25
4.1	Ztráty v transformátoru	25
4.1.1	Ztráty naprázdno	25
4.1.2	Ztráty nakrátko.....	27
4.2	Elektromagnetický návrh	27
4.3	Steinmetzův vztah – Maxwell 3D.....	31
5	AutoCAD.....	33
6	Ansys	36
6.1	Workbench	36
6.2	Transient-thermal – varianta 1 – rozdělené vinutí vysokého a nízkého napětí.....	37
6.2.1	První simulace.....	39
6.2.2	Druhá simulace	45
6.2.3	Třetí simulace	48
6.2.4	Čtvrtá simulace	50
6.2.5	Analýza dat prvního modelu.....	53
6.3	Transient-thermal – varianta 2 – rozdělené vinutí vysokého napětí na dvě vrstvy 54	
6.3.1	První simulace.....	54
6.3.2	Druhá simulace	57
6.3.3	Analýza dat druhého modelu	59
6.4	Transient-thermal – varianta 3 – vinutí vysokého napětí a vinutí nízkého napětí v jedné vrstvě	59
6.4.1	První simulace.....	60
6.4.2	Druhá simulace	62
6.4.3	Analýza dat třetího modelu.....	64
7	Simulace funkce stroje v SW prostředí Maxwell 3D	65
7.1	Zadání výpočtu – B-H křivka.....	66
7.2	Zadání výpočtu – Dokončení návrhu	69

7.3	Analýza vypočtených dat.....	69
8	Závěr	72
9	Seznam literatury a informačních zdrojů	74
10	Přílohy.....	76

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Historická tabulka materiálů, z nichž se skládal magnetický obvod transformátoru [1].	3
Obrázek 2.2: Porovnání B-H křivek CRGO plechu a $Fe_{80}B_{11}Si_9$ [2]	4
Obrázek 2.3: Výroba amorfních fólií [3]	5
Obrázek 2.4: Skládání plechů a) přeplátováním, b) natupo [7]	6
Obrázek 2.5: Magnetický tok uvnitř přeplátovaného jádra [8]	6
Obrázek 2.6: Magnetický tok uvnitř step-lap jádra [8]	7
Obrázek 2.7: Magnetický tok uvnitř přeplátovaného jádra [8]	8
Obrázek 2.8: Magnetický tok uvnitř step-lap jádra [8]	8
Obrázek 2.9: Popis NSL a CSL struktur amorfního jádra [9]	9
Obrázek 2.10: Uspořádání vinutí	10
Obrázek 2.11: Skupinové polohové vinutí	11
Obrázek 3.1: Rozložení tepelných spádů a rychlosti ochlazovacího činitele poblíž teplého tělesa při laminárním proudění [13]	14
Obrázek 3.2: Označení pro vzorec (8) [13]	17
Obrázek 3.3: Rozložení oteplení v tělese tvořícím tepelný zdroj [13]	17
Obrázek 3.4: Závislost součinitele přestupu tepla sáláním: křivka 1 (13) a křivka 2 (14), v obou případech pro teplotu okolí 20 °C [13].	19
Obrázek 3.5: Znázornění oteplení jednotky délky magnetického obvodu [12].	22
Obrázek 3.6: Příčný řez oteplení jednotlivých míst ve vinutí [12]	23
Obrázek 3.7: Střední šířka chladicího kanálku v závislosti na výšce vinutí	24
Obrázek 4.1: Vířivé Proudění uvnitř magnetického obvodu [15]	26
Obrázek 4.2: B-H křivka CRGO plechu	27
Obrázek 4.3: Průběhy ztrátových charakteristik magnetického obvodu	32
Obrázek 5.1: Vzdálenosti uvnitř transformátoru	34
Obrázek 5.2: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého a nízkého napětí	35
Obrázek 5.3: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého a nízkého napětí	35
Obrázek 6.1: Workbench	36
Obrázek 6.2: Transient-Thermal – Engineering data	37
Obrázek 6.3: Transient-Thermal – Model	38
Obrázek 6.4: Konvekce na nezakrytých plochách – varianta 1.1	40
Obrázek 6.5: Internal heat generation v magnetickém obvodu – varianta 1.1	40
Obrázek 6.6: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.1	41
Obrázek 6.7: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.1	42
Obrázek 6.8: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.1	42
Obrázek 6.9: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.1	43
Obrázek 6.10: Průběh teploty jádra – varianta 1.1	44
Obrázek 6.11: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 1.1	44
Obrázek 6.12: Internal heat generation v transformátoru – varianta 1.2	46
Obrázek 6.13: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.2	47
Obrázek 6.14: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.2	47
Obrázek 6.15: Konvekce – varianta 1.3	49
Obrázek 6.16: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.3	49
Obrázek 6.17: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.3	50
Obrázek 6.18: Konvekce – varianta 1.4	51

Obrázek 6.19: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.4	52
Obrázek 6.20: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.4.....	52
Obrázek 6.21: Internal heat generation v transformátoru – varianta 2.1.....	55
Obrázek 6.22: Rozložení teploty transformátoru – varianta 2.1	56
Obrázek 6.23: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 2.1.....	56
Obrázek 6.24: Konvekce – varianta 2.2	57
Obrázek 6.25: Rozložení teploty transformátoru – varianta 2.2	58
Obrázek 6.26: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 2.2.....	58
Obrázek 6.27: Rozložení teploty transformátoru – varianta 3.1	61
Obrázek 6.28: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 3.1.....	61
Obrázek 6.29: Rozložení teploty transformátoru – varianta 3.2	63
Obrázek 6.30: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 3.2.....	63
Obrázek 7.1: Model transformátoru v Maxwell 3D.....	65
Obrázek 7.2: Vlastnosti materiálu 2605SA1	67
Obrázek 7.3: Magnetizační charakteristika 2605SA1	68
Obrázek 7.4: Ztrátová charakteristika 2605SA1	68
Obrázek 7.5: Průběh ztrát simulace chodu naprázdno	70
Obrázek 7.6: Rozložení magnetické indukce na jádru transformátoru	71
Obrázek 10.1: Součinitel přestupu na částečně zakrytých plochách.....	78
Obrázek 10.2: Součinitel přestupu na zakrytých plochách	78
Obrázek 10.3: Internal heat generation ve vinutí nízkého napětí.....	79
Obrázek 10.4: Internal heat generation ve vinutí vysokého napětí	79
Obrázek 10.5: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.1	80
Obrázek 10.6: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.1	80
Obrázek 10.7: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.1	81
Obrázek 10.8: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.1	81
Obrázek 10.9: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.1.....	82
Obrázek 10.10: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.1.....	82
Obrázek 10.11: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.2.....	83
Obrázek 10.12: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.2	84
Obrázek 10.13: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.2.....	84
Obrázek 10.14: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.2.....	84
Obrázek 10.15: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.2.....	85
Obrázek 10.16: Průběh teploty jádra – varianta 1.2.....	85
Obrázek 10.17: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.2	85
Obrázek 10.18: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.2.....	86
Obrázek 10.19: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.2.....	86
Obrázek 10.20: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.2.....	87
Obrázek 10.21: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.3	87
Obrázek 10.22: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.3	88

Obrázek 10.23: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.3.....	89
Obrázek 10.24: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.3.....	89
Obrázek 10.25: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.3.....	90
Obrázek 10.26: Průběh teploty jádra – varianta 1.3	90
Obrázek 10.27: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.3	90
Obrázek 10.28: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.3	91
Obrázek 10.29: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.3	91
Obrázek 10.30: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.3	92
Obrázek 10.31: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.4.....	92
Obrázek 10.32: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.4.....	93
Obrázek 10.33: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.4.....	93
Obrázek 10.34: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.4	94
Obrázek 10.35: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.4.....	94
Obrázek 10.36: Průběh teploty jádra – varianta 1.4	95
Obrázek 10.37: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.4	95
Obrázek 10.38: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.4.....	96
Obrázek 10.39: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.4.....	96
Obrázek 10.40: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.4	97
Obrázek 10.41: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 2.1	97
Obrázek 10.42: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 2.1	98
Obrázek 10.43: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.1.....	98
Obrázek 10.44: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.1.....	99
Obrázek 10.45: Průběh teploty jádra – varianta 2.1	99
Obrázek 10.46: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 2.1	100
Obrázek 10.47: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 2.1	100
Obrázek 10.48: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 2.1	101
Obrázek 10.49: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 2.2	101
Obrázek 10.50: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 2.2 ...	102
Obrázek 10.51: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.2.....	102
Obrázek 10.52: Rozložení teploty vinutí vnějšího vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.2.....	103
Obrázek 10.53: Průběh teploty jádra – varianta 2.2	103
Obrázek 10.54: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 2.2.....	104
Obrázek 10.55: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 2.2	104
Obrázek 10.56: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 2.2	105

Obrázek 10.57: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 3.1	105
Obrázek 10.58: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 3.1 ..	106
Obrázek 10.59: Rozložení teploty vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 3.1	106
Obrázek 10.60: Průběh teploty jádra – varianta 3.1	107
Obrázek 10.61: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 3.1	107
Obrázek 10.62: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 3.1	108
Obrázek 10.63: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 3.2	108
Obrázek 10.64: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 3.2 ..	109
Obrázek 10.65: Rozložení teploty vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 3.2	109
Obrázek 10.66: Průběh teploty jádra – varianta 3.2	110
Obrázek 10.67: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 3.2	110
Obrázek 10.68: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 3.2	111
Obrázek 10.69: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého napětí	113
Obrázek 10.70: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého napětí	113
Obrázek 10.71: Model 250 kVA bez rozdělení vinutí	114
Obrázek 10.72: Model 250 kVA bez rozdělení vinutí	114
Obrázek 10.73: 2605SA1 ztrátová charakteristika [20]	115
Obrázek 10.74: 2605SA1 magnetizační charakteristika [20]	116

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Srovnání charakteristik amorfních fólií a CRGO plechu [2].....	3
Tabulka 3.1: Odhadnuté hodnoty součinitele přestupu	22
Tabulka 4.1: Základní údaje návrhu	28
Tabulka 4.2: Počet závitů.....	28
Tabulka 4.3: Parametry magnetického obvodu	29
Tabulka 4.4: Parametry vinutí nízkého napětí	29
Tabulka 4.5: Parametry vinutí vysokého napětí – pokračování 4.4.....	30
Tabulka 4.6: Výsledné hodnoty elektromagnetického návrhu	30
Tabulka 4.7: Přepočtené ztráty na poměrné hodnoty	31
Tabulka 5.1: Rozměry magnetického obvodu	33
Tabulka 5.2: Rozměry vinutí a bariéry	33
Tabulka 5.3: Předepsané vzdálenosti uvnitř transformátoru	34
Tabulka 6.1: Odhadnuté hodnoty součinitele přestupu	39
Tabulka 6.2: Měrné ztráty v transformátoru – varianta 1.1	40
Tabulka 6.3: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.1	45
Tabulka 6.4: Vypočtené hodnoty součinitele přestupu – varianta 1.2.....	45
Tabulka 6.5: Výpočet ztrát s činitelem plnění – varianta 1.2	46
Tabulka 6.6: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.2	48
Tabulka 6.7: Úprava součinitelů přestupu – varianta 1.3	48
Tabulka 6.8: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.3	50
Tabulka 6.9: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 1.4.....	51
Tabulka 6.10: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.4	53
Tabulka 6.11: Výsledné hodnoty první varianty	53
Tabulka 6.12: Měrné ztráty transformátoru – varianta 2.1	54
Tabulka 6.13: Součinitel přestupu tepla první simulace – varianta 2.1	55
Tabulka 6.14: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 2.1	57
Tabulka 6.15: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 2.2.....	57
Tabulka 6.16: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 2.1	59
Tabulka 6.17: Výsledné hodnoty první a druhé varianty.....	59
Tabulka 6.18: Měrné ztráty transformátoru – varianta 3.1	60
Tabulka 6.19: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 2.2.....	60
Tabulka 6.20: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 3.1	62
Tabulka 6.21: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 3.2.....	62
Tabulka 6.22: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 3.2	64
Tabulka 6.23: Porovnání výsledků všech variant provedení vinutí.....	64
Tabulka 7.1: Hodnoty magnetizační a ztrátové charakteristiky Metglas 2605SA1	66
Tabulka 10.1: Parametry vinutí nízkého napětí varianty 2.....	76
Tabulka 10.2: Parametry vinutí vysokého napětí varianty 2	76
Tabulka 10.3: Parametry vinutí nízkého napětí varianty 3	77
Tabulka 10.4: Parametry vinutí vysokého napětí varianty 3	77
Tabulka 10.5: Ztráty naprázdno P_0 a hladiny hluku L_{wa} pro distribuční transformátory s nominálním napětím $U_n \leq 24$ kV podle ČSN EN 50464-1	111
Tabulka 10.6: Ztráty nakrátko P_k a hladiny pro distribuční transformátory s nominálním napětím $U_n \leq 24$ kV podle ČSN EN 50464-1	112
Tabulka 10.7: Meze oteplení vinutí podle ČSN EN 60076-11	112

Seznam použitých symbolů

a	[-]	konstanta měnící se s frekvencí pro výpočet Steimetzova vztahu
B	[T]	magnetická indukce
B_{sat}	[T]	saturační hodnota magnetické indukce
B	[T]	magnetická indukce
c	[-]	konstanta měnící se s frekvencí pro výpočet Steimetzova vztahu (kapitola 4)
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita chladiva
f	[Hz]	frekvence
g	[m·s ⁻²]	gravitační zrychlení
H	[m]	výška chlazené roviny
H	[A/m]	intenzita magnetického pole (kapitola 4)
h	[m]	nadmořská výška
k_d	[W·kg ⁻¹]	koeficient dodatečných ztrát pro Steimnetzův vztah
k_h	[W·kg ⁻¹]	koeficient hysterezních ztrát pro Steimnetzův vztah
k_v	[W·kg ⁻¹]	koeficient ztrát vířivými proudy pro Steimnetzův vztah
K	[-]	konstanta pro sálání
l	[m]	délka cesty tepelného toku
P	[W]	množství tepla za jednotku času (Kapitola 3)
P_1	[W]	výkon upraveného transformátoru
P_2	[W]	výkon původního transformátoru
p	[-]	jednotka objemu
p_{Fe}	[W·kg ⁻¹]	ztráty v železe
p_h	[W·kg ⁻¹]	hysterezní ztráty
p_v	[W·kg ⁻¹]	ztráty vířivými proudy
p_d	[W·kg ⁻¹]	dodatečné ztráty
q	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelný tok
q_k	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrné odevzdané teplo
q_{pr}	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	výkon odevzdaný za jednotku času
S	[m ²]	průřez tělesa
S_{ch1}	[m ²]	plocha upraveného transformátoru
S_{ch2}	[m ²]	plocha původního transformátoru
t_{ao}	[K]	absolutní teplota okolí
t_{a1}	[K]	absolutní teplota teplého tělesa
t_{a2}	[K]	absolutní teplota okolí
t_o	[K]	teplota okolí
U_1	[V]	napětí první fáze
U_2	[V]	napětí druhé fáze
U_3	[V]	napětí třetí fáze
U_m	[V]	vrcholová hodnota napětí
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu

α_k	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu pro konvekci
α_{pr}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu pro radiaci
α_{vp}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu pro konvekci s kondukcí
β	[-]	činitel objemové roztažnosti
ΔP	[W]	celkové ztráty
ΔP_0	[W]	ztráty naprázdno
ΔP_k	[W]	ztráty nakrátko
ΔP_1	[W]	ztráty vinutí
ΔP_2	[W]	ztráty vstupního vinutí
$\Delta\delta$	[K]	teplotní rozdíl
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost
λ_q	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	příčná tepelná vodivost
ν	[-]	poměrný činitel sálání
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost

1 Úvod

Transformátory byly vynalezeny za účelem přeměny elektrické energie již na počátku 20. století. Ačkoli fyzikální zákony, kterými se transformátory řídí, se od doby vytvoření prvního transformátoru nezměnily, struktura transformátoru prošla značným vývojem.

Vhledem k tomu, že transformátory jsou v současné době nezbytnou součástí v podstatě každého elektrického obvodu, tak je kladen důraz na jejich neustálý vývoj. Vývoj struktury transformátoru je určen několika faktory. Hlavním z nich je ekonomičnost provozu. Transformátor, jako jakýkoli jiný zdroj přeměny energie, není dokonalý elektrický stroj a vyznačuje se určitou účinností. Zvyšováním účinnosti, především u přenosu a distribuce elektrické energie, se dosahuje významného zvýšení finančního obnosu z provozu elektrické sítě. Mezi další faktory vývoje transformátoru patří například snižování hmotnosti a velikosti transformátoru, což je nezbytné pro technologický pokrok v určitých moderních aplikacích. Nakonec je vývoj transformátoru v současné době vyžadován i ekologickými a bezpečnostními požadavky jako je hluk při jeho provozu nebo typ chlazení.

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh optimalizovaného suchého distribučního transformátoru. Práce bude soustředěna na možnosti optimalizovaných provedení distribučních transformátorů, návrh optimalizovaného distribučního transformátoru a následně bude chod a oteplení tohoto transformátoru zkoumán v simulačních programech.

2 Možnosti provedení distribučních transformátorů

2.1 Magnetický obvod

2.1.1 Materiál magnetického obvodu

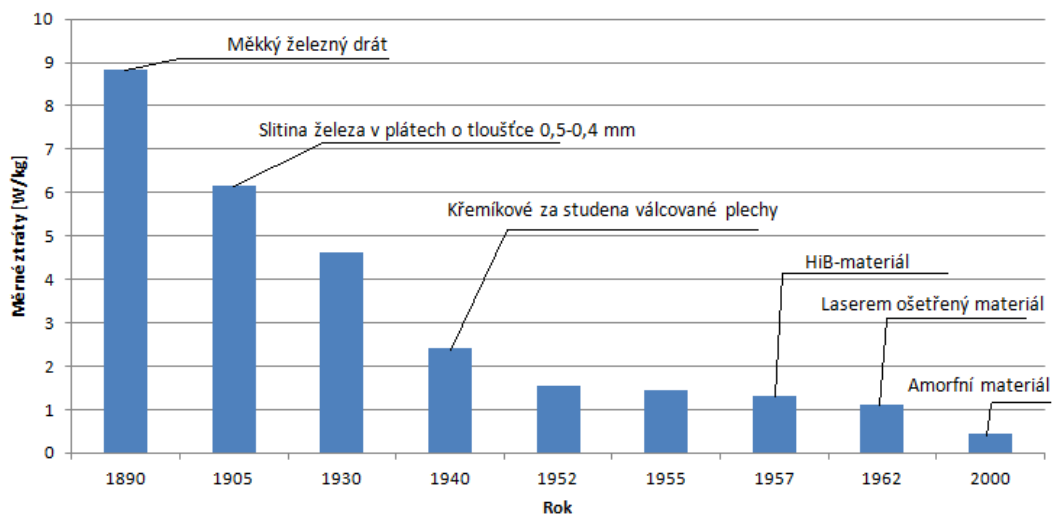
Nejdůležitějším krokem při tvorbě transformátoru je následně po zvolení jeho funkce a typových parametrů volba materiálů, z kterých bude tvořen jeho magnetický obvod a vinutí.

První transformátory se ve velmi jednoduchém provedení objevily už na konci 19. století v základním tvaru stočeného železa do smyčky. Od té doby prošly značným vývojem, jak ve tvaru provedení, tak v materiálu, z kterého jsou vyráběny. Zatím největší průlom ve výrobě transformátorů přišel s vynalezením zastudena válcovaných orientovaných plechů, které snížily ztráty v transformátoru oproti původním plechům o téměř 50%. Orientované plechy se používají od jejich vynalezení v 50. letech minulého století až dodnes. Během této doby docházelo k zlepšování jejich vlastností, především díky pokroku technologie, jako je ošetření plechu laserem, nicméně k dalšímu přelomovému snížení ztrát u orientovaných křemíkových plechů již nedošlo. Došlo ovšem k zásadnímu objevu, a to k objevu amorfního materiálu [1]. Plechy z amorfního materiálu byly poprvé vytvořeny v 60. letech 20. století. První amorfní fólie, z kterých bylo možno komerčně vyrábět transformátory, byla vynalezena firmou Metglas na bázi Fe-Ni-P-B a vyznačovala se tím, že se skládá z dobře získatelných surovin, dále že proces výroby byl levný a nakonec dobrými mechanickými vlastnostmi. V následujících letech byly amorfní fólie podrobeny výzkumu, který se soustředil na zlepšení hlavních vlastností materiálu – cena jednotlivých surovin (Fe-P-C), zvýšení hladiny přesycení (Fe-B-C) a zvýšení termální stability (Fe-B-Si) – přičemž byl požadavek na zachování Fe podstaty pro možnost komerčního využití. Jako nejdůležitější z těchto parametrů se ukázala termální stabilita, která limituje možnost výroby těchto plechů a jejich použití. Moderní amorfní fólie se tedy vyrábí na bázi Fe-B-Si, například $\text{Fe}_{80}\text{B}_{11}\text{Si}_9$. Srovnání amorfních fólií a zastudena válcovaného orientovaného Si plechu (CRGO) ukazuje tabulka 2.1. [2]

Tabulka 2.1: Srovnání charakteristik amorfních fólií a CRGO plechu [2]

Klíčové charakteristiky křemíkových plechů a amorfních fólií			
	B_{sat} [T]	Curierova teplota [K]	Měrné ztráty naprázdno [W/kg]
CRGO 3,2% Si	2,1	1019	0,7
$\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$	1,4	587	–
$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	1,6	647	0,3
$\text{Fe}_{80}\text{B}_8\text{C}_6$	1,75	< 600	0,4
$\text{Fe}_{80}\text{B}_{11}\text{Si}_9$	1,59	665	0,2

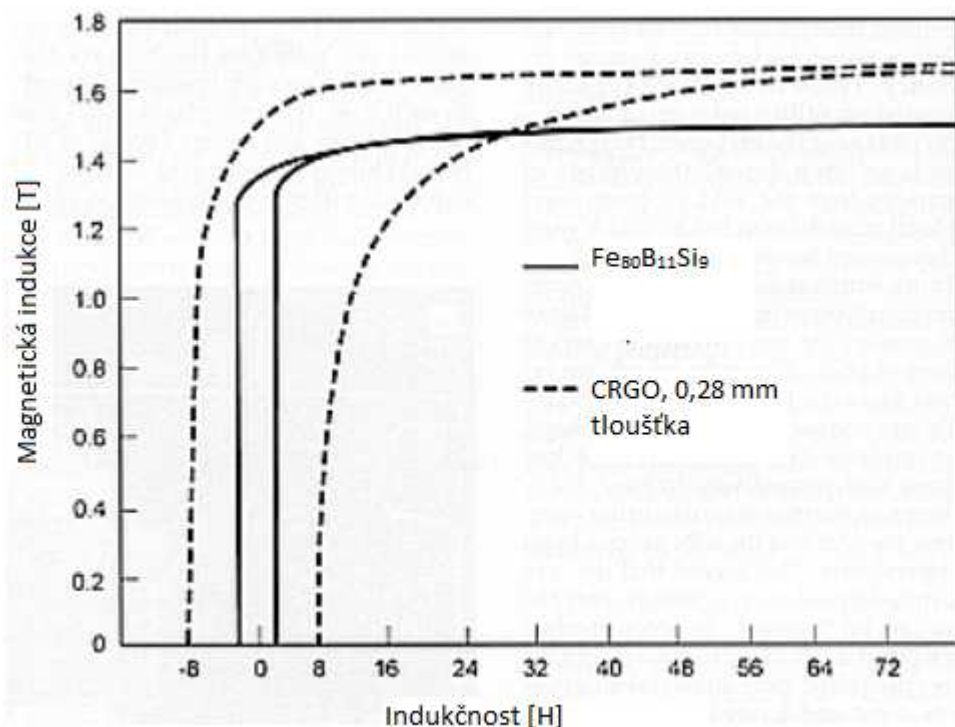
Historie materiálů pro magnetický obvod transformátoru je znázorněn na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Historická tabulka materiálů, z nichž se skládal magnetický obvod transformátoru [1].

První transformátor, složený z amorfních fólií, byl vyroben na přelomu tisíciletí. Hlavní výhoda amorfního materiálu je značné snížení ztrát a snížení magnetostrikce oproti klasickým křemíkovým plechům. To je způsobeno jedinečnou strukturou amorfního materiálu, v němž je neuspořádané rozložení jeho molekul. Tímto rozložením se dosáhne snadné magnetizace a demagnetizace fólií a dochází tedy ke snížení ztrát naprázdno. Obtížnost magnetizace jakéhokoli materiálu je reflektována vztahem magnetické indukce B a indukčnosti H . Na obrázku 2.2 jsou vyneseny B - H

křivky křemíkového orientovaného plechu a amorfního plechu. Z tvaru a obsahu těchto křivek je patrná snadnější magnetizace amorfního materiálu.



Obrázek 2.2: Porovnání B-H křivek CRGO plechu a $\text{Fe}_{80}\text{B}_{11}\text{Si}_9$ [2]

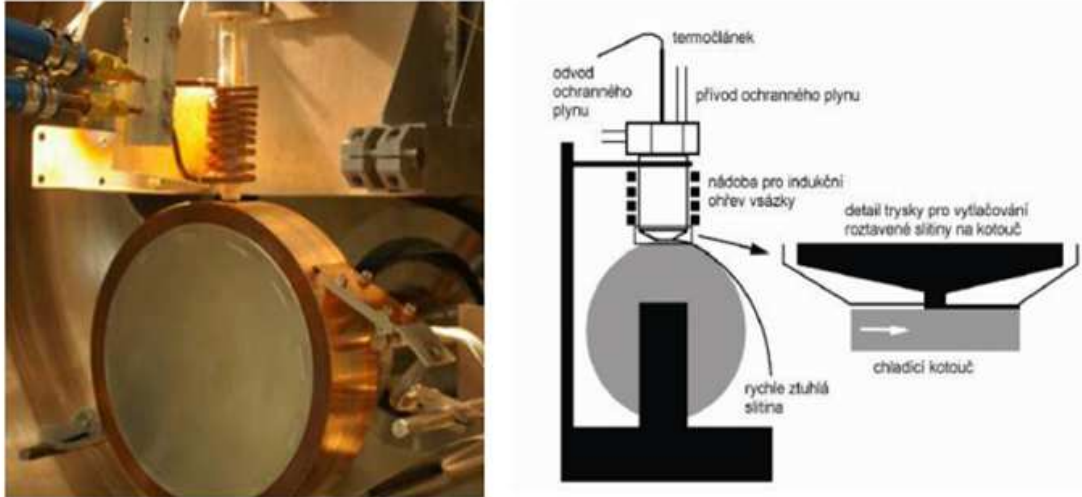
Hlavní nevýhodou amorfních transformátorů je jejich nízký bod saturace, který se nachází v okolí 1,65 Tesla. Z tohoto důvodu se amorfní fólie používají pro výrobu malých transformátorů a pro distribuční transformátory.

Z výše uvedených poznatků je tedy patrné, že pro moji práci je vhodné použít magnetický obvod, který je složen z amorfních fólií.

2.1.2 Výroba amorfních fólií

Amorfní transformátor se skládá z amorfních fólií, které jsou velmi tenké – až 0,025 mm, což je až dvanáctkrát méně, než orientované plechy. Tyto fólie lze vyrábět několika způsoby, ovšem jejich podstata je podobná – taveninu, z níž je výrobek vytvořen, je potřeba dostatečně rychle schladit, aby nedošlo k vytvoření krystalické mřížky. Nejrozšířenější metoda je metoda rovinného lití (PFC – planar flow casting). Princip této metody spočívá ve vytlačení taveniny za pomoci plynu na kotouč, který se velmi rychle otáčí (až 28 m/s) a na kterém se ochladí. U této metody jsou kladeny vysoké nároky na chladicí kotouč, protože se tavenina musí ochladit v přesném

časovém úseku. Kotouč musí mít dobrou vodivost a vysokou mechanickou pevnost. Materiál, který tyto požadavky splňuje, je například nízkolegovaná slitina mědi. Na obrázku 2.3 je znázorněn princip metody rovinného lití. [3][4]

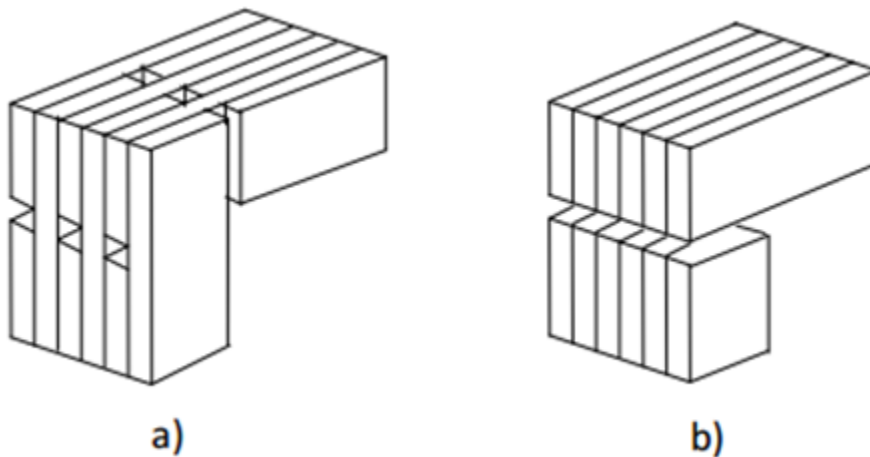


Obrázek 2.3: Výroba amorfních fólií [3]

2.1.3 Tvar magnetického obvodu

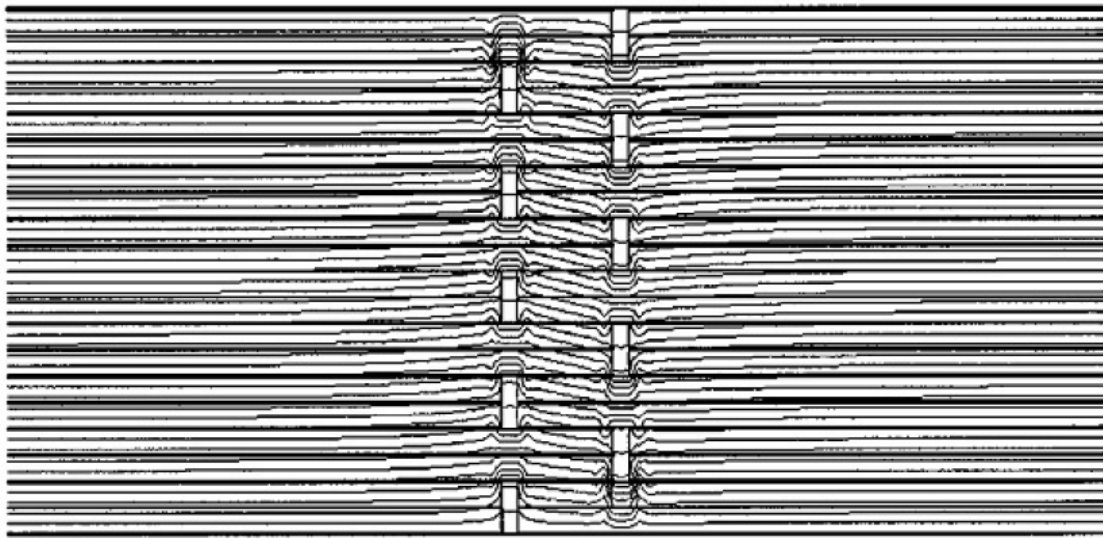
Vzhledem k tomu, že amorfní transformátor je tvořen z fólií, tak hlavní způsob tvorby magnetického obvodu je pomocí technologie vinutí. Fólie, které se z výroby dostávají ve velkých kotoučích, se nejprve nastříhají na požadovanou délku a poskládají se na hromady tak, aby se z nich dalo jádro složit. Jednotlivé fólie se následně skládají do C-tvaru magnetického obvodu, který používá strukturu step-lap. [5]

Všechny transformátory obsahují v určité části magnetického obvodu vzduchové mezery, což má příznivý vliv na chod transformátoru při zatížení – sníží se strmost B/H křivky, sníží se permeabilita a indukance a tím se zvýší magnetizační proud v primárním vinutí [6]. Prvotně byla vzduchová mezera vytvořena skládáním plechů metodou natupo. Pro tento způsob je charakteristické skládání plechů tak, že vzduchová mezera je rovnoměrně rozložena po celém obsahu sloupku. Metoda skládání plechů natupo se ovšem v moderních magnetických obvodech nepoužívá, jelikož výhodnější vlastnosti má technologie přeplátování – střídání vzduchových mezer okolo osy průřezu jádra. Metody natupo a přeplátování jsou znázorněny na obrázku 2.4.

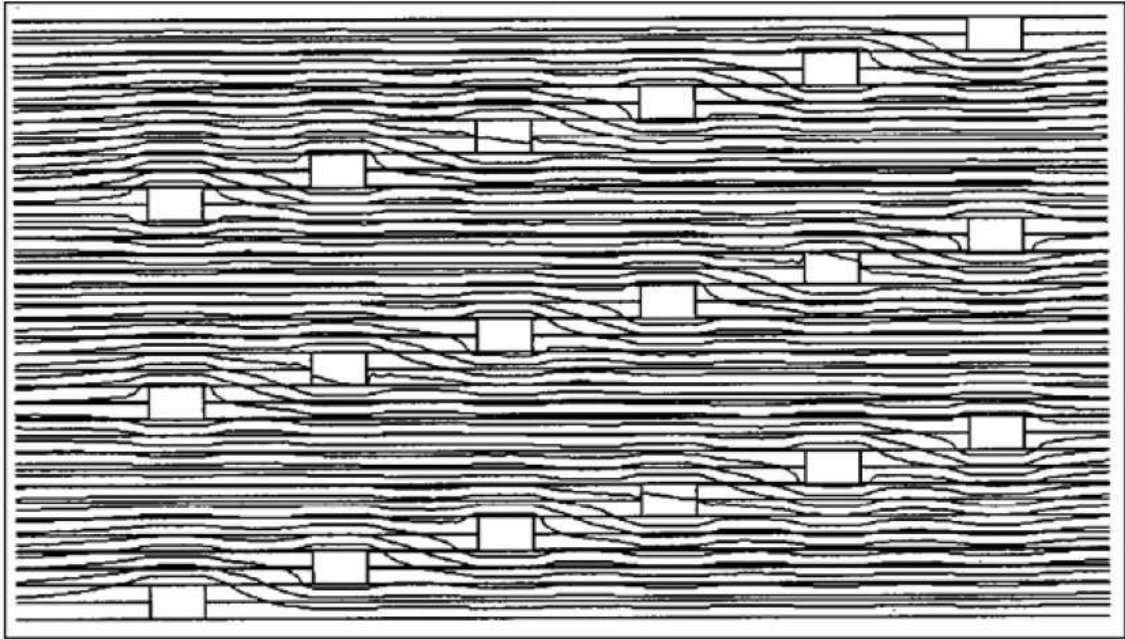


Obrázek 2.4: Skládání plechů a) přepletováním, b) natupo [7]

Technologie přepletování se postupem času zdokonalovala a v současné době má nejvýhodnější vlastnosti provedení přepletováním – Step-lap. Pohled z boku na sloupek magnetického obvodu, jenž používá metodu klasického přepletování, je znázorněn na obrázku 2.5. Metoda step-lap je vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.5: Magnetický tok uvnitř přepletovaného jádra [8]

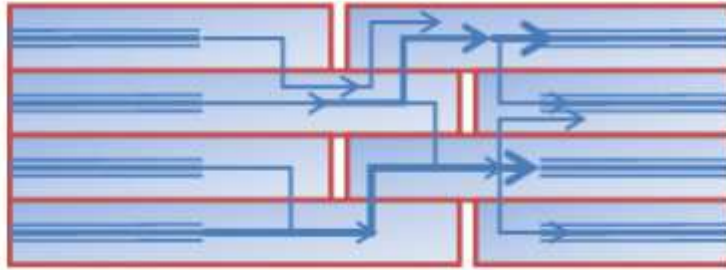


Obrázek 2.6: Magnetický tok uvnitř step-lap jádra [8]

Na obrázku 2.5 je znázorněno chování magnetického toku uvnitř klasicky přeplátovaného jádra. Spoje tohoto typu jsou většinou střídané po dvou vrstvách ve vzdálenosti zhruba 10 mm od sebe.

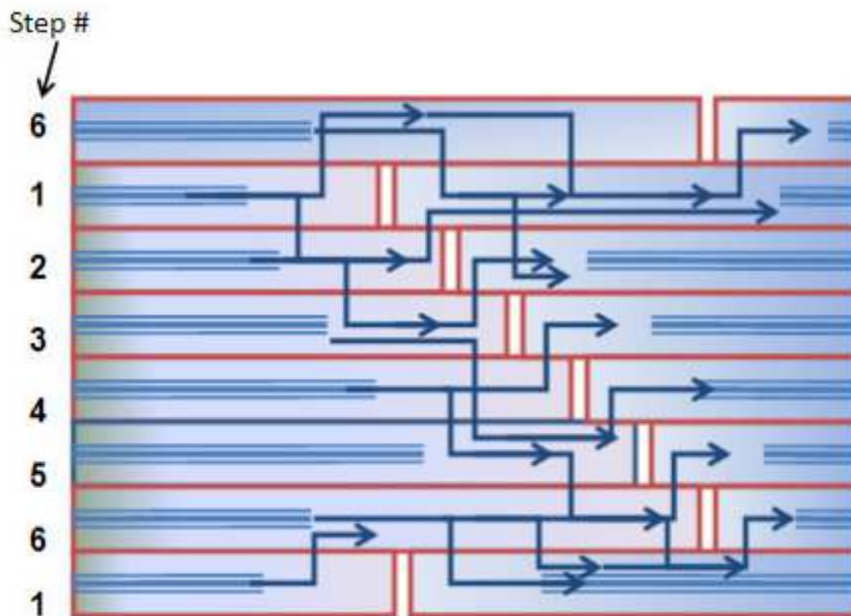
Na obrázku 2.6 je vidět chování magnetického obvodu uvnitř step-lap jádra se šesti kroky. Je patrné, že zde jsou spoje rozděleny po třech okolo osy spoje jádra.

Magnetický tok teče v jádru transformátoru cestou nejmenšího magnetického odporu, kterému odpovídá největší magnetická permeabilita. Magnetický tok, který se dostane ke vzduchové mezeře má dvě možnosti – projít přes vzduchovou mezeru nebo projít přes izolaci mezi jednotlivými fóliemi do sousedních fólií, kde je magnetický odpor o několik řádů nižší. Z výše uvedených znalostí je patrné, že magnetický tok přeskočí izolaci fólií. Překročením celého magnetického toku by ovšem došlo k přesycení jádra a část toku tedy musí přeskočit přes vzduchovou mezeru, čímž přispívá ke ztrátě magnetického toku, a je nutné ho kompenzovat vyšším zatížením. Blíže tuto situaci objasňuje obrázek 2.7 pro klasicky přeplátovaný magnetický obvod.



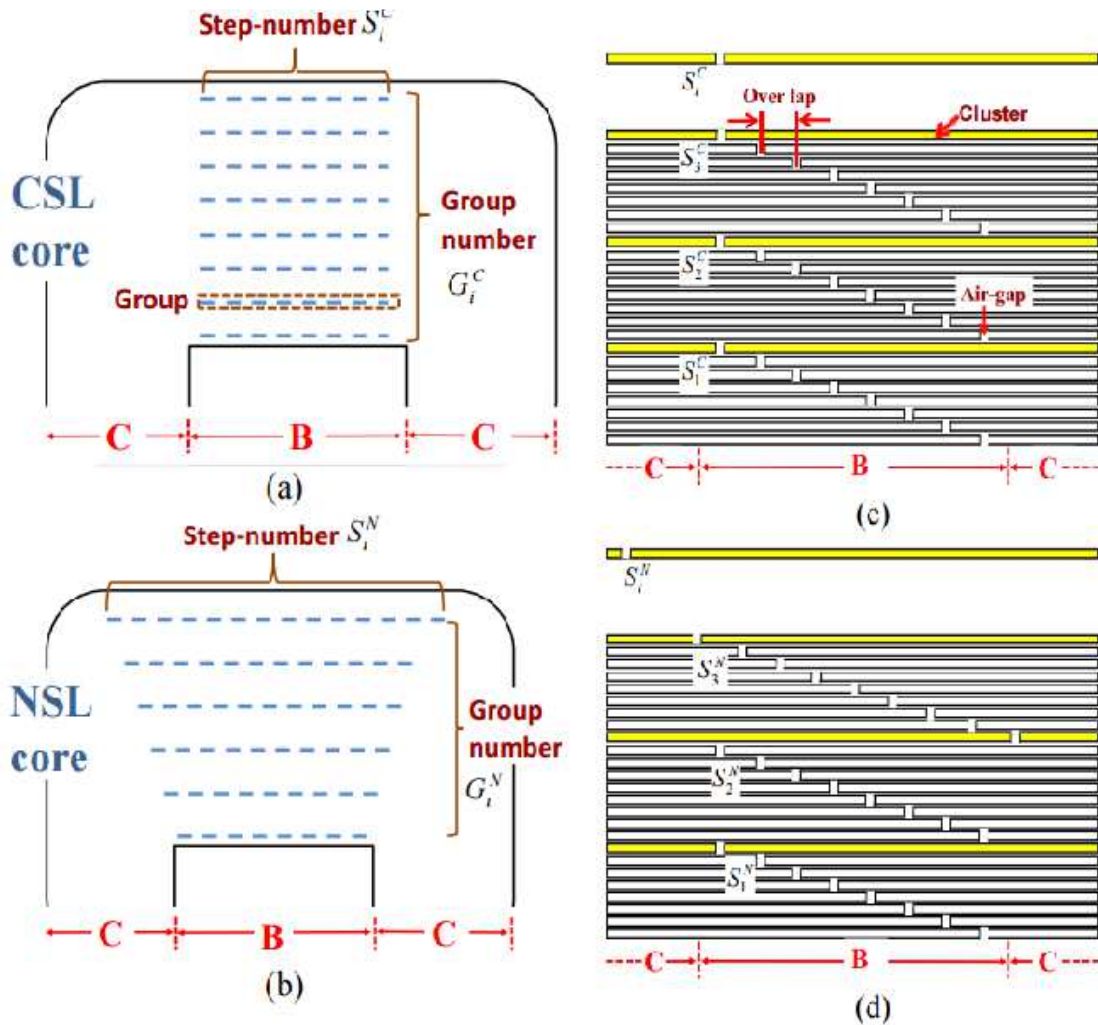
Obrázek 2.7: Magnetický tok uvnitř přeplátovaného jádra [8]

Magnetický tok, který se dostane ke vzduchové mezeře v magnetickém obvodu, který je vytvořen technologií step-lap, má ovšem mnohem víc možností, kudy přeskočit přes pásmo se vzduchovými mezerami a proto dochází k rovnoměrnějšímu rozložení magnetického toku. Tato situace je podrobněji znázorněna na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Magnetický tok uvnitř step-lap jádra [8]

Protože amorfní transformátor je vyráběn jako vinutý v C-tvaru, jsou jeho vzduchové mezery tvořeny step-lap technologií v horizontální rovině. Nejvýhodnější je takzvaná NSL (new step-lap) technologie, kdy jsou vzduchové mezery rozděleny horizontálně na základně transformátoru tak, že se postupně zvyšuje počet kroků mezi mezerami a současně se snižuje počet vrstev vzduchových mezer. Tím se dosáhne menšího nárůstu magnetické indukce a tedy i snížení ztrát. Popis NSL a CSL struktur amorfního jádra je vidět na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9: Popis NSL a CSL struktur amorfního jádra [9]

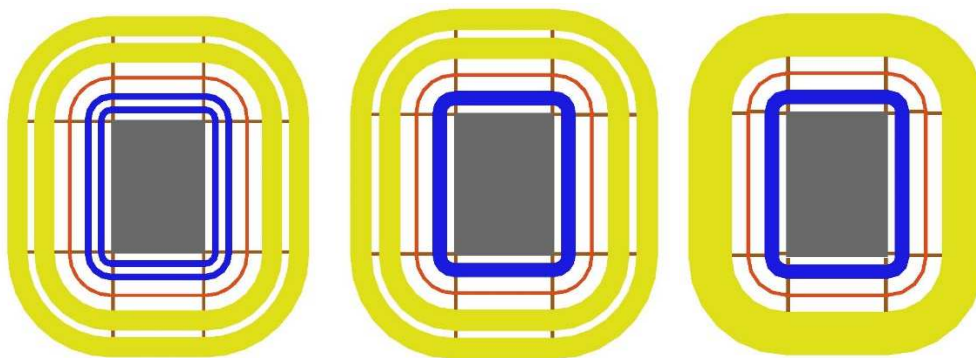
2.2 Vinutí distribučního transformátoru

Na vinutí distribučních transformátorů daného výkonu jsou kladeny přísné požadavky definované platnými standardy, které definují základní typy zkoušek (viz ČSN EN 60270¹). Zejména jde o provedení vinutí z hlediska mechanické tuhosti, elektrické pevnosti a výše odváděných ztrát ovlivňujících výši oteplení. To vede v některých případech ke kompromisnímu řešení, protože např. požadavek na dostatečnou odolnost vinutí proti účinkům zkratových proudů je v protikladu k požadavku na účinný odvod ztrátového tepla. Vinutí nižšího napětí je u distribučních transformátorů zpravidla provedeno ve fóliovém provedení z Al nebo Cu pásku,

¹ Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů.

zatímco vinutí vyššího napětí je tvořeno u suchých transformátorů jako skupinové polohové vinutí, které je zalité. [10]

Vinutí je možno pro lepší chlazení dělit do jednotlivých sekcí, které jsou od sebe odděleny distančními vložkami a samotné sekce vinutí vyššího napětí a nižšího napětí je od sebe odděleno izolačním válcem. V mé práci budou použity tři varianty provedení vinutí transformátoru. První varianta bude mít rozdělené vinutí vyššího i nižšího napětí. Toto provedení má nejlepší chladicí vlastnosti, ovšem za cenu vyšších výrobních nákladů. Z tohoto důvodu bude podrobena analýze i provedení s rozděleným vinutím pouze vyššího napětí a nakonec provedení bez rozděleného vinutí téhož napětí. Výše popsané varianty jsou znázorněny na obrázku 2.10, kde je znázorněn pohled na průřez sloupku transformátoru. Žlutou barvou je označeno vinutí vyššího napětí, oranžovou izolační bariéra, modrou vinutí nižšího napětí, hnědou podpěrné lišty a šedivou jádro.



Obrázek 2.10: Uspořádání vinutí

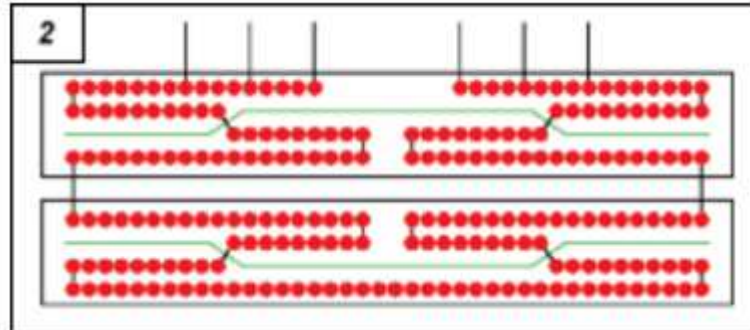
2.2.1 Vinutí nízkého napětí

Vinutí nízkého napětí se pro transformátory o výkonu nad 200 kVA a napětí nad 1,1 kV volí zpravidla fóliové. Výhodou fóliového vinutí je, že se proud může rozložit po délce vinutí a v případě zkratu působí na cívky nízké hodnoty axiální zkratové síly. Jako mezizávitová izolace slouží prepreg (polotovarový kompozit s kontinuálními vlákny nebo vlákna zalitá v polymerní matrici), který je oboustranně předimpregnován, a navíjí se současně s vodičem. Po navinutí se cívka vytvrzuje při teplotě 150 °C po dobu tří hodin, čímž se prepreg slepí s vodičem a cívka získá potřebnou mechanickou pevnost. [11]

2.2.2 Vinutí vysokého napětí

Pro vinutí vyššího napětí je použito již zmíněné zalité vinutí, kde je vodič zapouzdřen v pevné izolaci. Měděný nebo hliníkový drát se navíjí na trn, který slouží

zároveň jako vnitřní strana formy pro zalití. Vinutí je provedeno jako skupinové polohové vinutí, kde je vinutí rozděleno na dva nebo čtyři díly na fázi. Polohové vinutí je znázorněno na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11: Skupinové polohové vinutí

Mezi jednotlivé polohy se vkládá skelná tkanina – glasvlies – tkanina ze skelných vláken o průměru 10 μm . Jako pojivo se používá epoxidová pryskyřice. Pro vytvoření chladících kanálků se vloží mezi polohy výplňové lišty, které se po zalití vytáhnou a vytvoří tak axiální chladící kanálky. Nakonec se cívka vloží do ocelové formy a zaleje se zalévací hmotou – epoxidovou pryskyřicí – ve vakuové komoře a následně se vytvrdí při teplotách 70 °C až 150 °C. [11]

3 Tepelný obvod transformátoru

Transformátor v provozních podmínkách nemá ideální přeměnu elektrické energie a část se jí přemění na ztrátové teplo, jako při všech přeměnách energie. Tato skutečnost je v souladu s první větou termodynamickou, která říká, že „v přírodě se dějí pouze vzájemné přeměny forem energie, přičemž její celkové množství zůstává stejné“.

Jednotlivé plechy transformátoru a vinutí jsou z provozních a izolačních důvodů odděleny izolací, například papírem nebo lakem. Před zařazením transformátoru do provozu lze předpokládat, že všechny součásti transformátoru mají teplotu okolí nebo byl transformátor po provozu odstaven na dostatečně dlouhou dobu, aby bylo dosaženo ustáleného stavu. Po spuštění transformátoru dochází k ohřevu jak plechů, tak izolačního materiálu. Tím se v jednotlivých částech transformátoru poruší rovnováha ustáleného stavu a teplota těchto částí může několikanásobně převýšit teplotu okolního vzduchu. Bez určitého odvodu tepla by teplota magnetického obvodu a hliněného nebo měděného vinutí mohla dosáhnout až desetinásobku teploty okolí, čímž by došlo k porušení jeho mechanických vlastností a zároveň by došlo ke zničení izolace.

Z výše uvedených poznatků je patrné, že hlavním činitelem, který omezuje výkon transformátoru je nižší tepelná odolnost izolačních materiálů transformátoru a je tedy nezbytné zařadit chladící prostředí podél magnetického obvodu například olej nebo vzduch.

Při ohřívání chladícího média, ať už oleje nebo vzduchu, dochází k nerovnoměrnému ohřevu, a jeho teplota není rovnoměrná. Vznikne narušení mechanické rovnováhy, což se projeví tím, že teplejší a tedy i lehčí část tekutiny postupuje směrem nahoru a vyměňuje si místo s chladnějšími částmi, které jsou i těžší. Tento proces výměny chlazení se nazývá přirozeným prouděním chladící tekutiny.[12] S velikostí transformátoru vzrůstá i náročnost jeho chlazení. Plyne to z rovnic (1) a (2):

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \sqrt[4]{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^3} \quad (1)$$

$$\frac{S_{ch12}}{S_{ch11}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \quad (2)$$

Rovnice (1) a (2) ukazují, že ztráty v transformátoru s rostoucím výkonem rostou rychleji, než jeho chladicí plochy. Například přechod od výkonu 1000 kVA do 16 000 kVA zvětšuje ztráty osminásobně, avšak jeho chladicí plocha vzroste pouze čtyřnásobně za předpokladu, že všechny plochy transformátoru 16 000 kVA jsou úměrné rozměrům transformátoru 1000 kVA, a že indukce a proudová hustota jsou v obou případech stejné. [13]

Pokud je přirozené chlazení nedostatečné pro transformátor, je možné rychlejší výměnu tepla zařídit některým z následujících řešení:

1. Umělým zvětšením chladících ploch. Čím větší je transformátor, tím větší je důraz na pečlivější provedení jeho vinutí a magnetický obvod může být doplněn o chladicí kanálky. Vnější chladicí povrch je zvětšen zvlněním stěn nádoby, použitím chladících trubek, radiátorů, atd.
2. Zvětšením intenzity výměny tepla – pomocí zařazení nuceného oběhu chladícího média například větrákem nebo čerpadlem. Nuceným oběhem se ovšem sníží stupeň bezpečnosti provozu zařazením pomocného zařízení, které současně ovlivňuje i celkovou účinnost. Z hlediska bezpečnosti provozu se musí zavést opatření na signalizaci poruchy pomocného zařízení, případně se musí snížit jeho výkon.
3. Menším využitím aktivních materiálů. Tím, že se zmenší dovolená proudová hustota, se zmenší i ztráty v přibližně stejném poměru a tím se i zmírní problém s chlazením. Tento způsob je ovšem neekonomický, jelikož je to spojeno se zvětšením váhy mědi a železa.
4. Užitím izolace s vyšší teplotní odolností. Tento způsob je nepoužitelný pro olejové transformátory, jelikož olej, který by přišel do kontaktu s vinutím o vyšší teplotě než 100 °C, by se rychle chemicky rozkládal.

Transformátory se dělí do skupin podle výše zmíněných druhů chladící tekutiny a podle způsobu rozvodu této tekutiny. Tyto skupiny jsou například: vzduchem přirozené chlazení (AN), vzduchem nucené chlazení (AF), olejové přirozené chlazení (ONAN), olejové chlazení s umělým ofukováním (OFAN), atd. V mé práci podrobuji výzkumu transformátor s přirozeným vzduchovým chlazením (AN), kde se uplatňuje především odvod tepla vedením a prouděním.

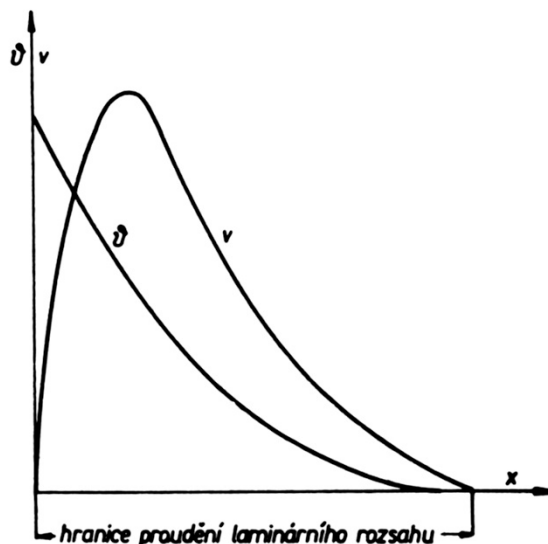
3.1 Způsob odvádění tepla

Proces odvodu tepla ze zahřátého tělesa je složitý proces, který má charakter trojrozměrného šíření. V technické praxi se odvod tepla řeší tak, že se celý proces rozloží na řadu jednoduchých jevů, jejichž přesnost potvrzují naměřené hodnoty.

Při řešení úloh odvodu tepla rozlišujeme tři druhy odvodu tepla: vedením, zářením a prouděním. Transformátor lze z hlediska tepelného přenosu rozdělit na dvě části: na části, které teplo vytváří (magnetický obvod a vinutí) a části, které teplo pouze přenášejí (izolace, stěny nádoby). Tepelný tok se přenáší tuhým prostředím vedením, tekutým a plynným konvekcí a vnějším povrchem konstrukce transformátoru zároveň sáláním. [13]

3.1.1 Konvekce

Konvekce je způsob přenosu tepla u tekutých nebo plynných látek. Její mechanismus spočívá v ohřátí tenké vrstvičky chladicího média u povrchu ohřátého tělesa, od kterého přebírá teplo vedením. Tato vrstvička se stane lehčí a mění se její rychlost od nuly do určité maximální rychlosti, kde rychlost opět začne následně klesat k nule, jak je znázorněno na obrázku 3.1, kde se uvažuje laminární způsob proudění chladicí tekutiny. Tato rychlost nepřesahuje u vzduchového chlazení 1 m/s a u olejového chlazení 1 cm/s.



Obrázek 3.1: Rozložení tepelných spádů a rychlosti ochlazovacího činitele poblíž teplého tělesa při laminárním proudění [13]

Tato tenká vrstvička, kde dochází k úbytku teploty na povrchu ohřivaného tělesa, se nazývá pásmem proudění. Šířka tohoto pásma je u vzduchu okolo 12 mm od povrchu ochlazeného tělesa a okolo 3 mm u olejového chlazení.

U přirozené konvekce se vzduchovým chlazením svíslé roviny platí, že teplo odvedené za jednotku času z jednotky této roviny má obecný tvar podle rovnice (3):

$$q_k = c \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt[4]{(t_{ao} \cdot H)}} \cdot \Delta\vartheta^{1,25} \quad (3)$$

Kde δ je poměrná hustota vzduchu, t_{ao} je absolutní teplota okolí, H je výška chlazené roviny a $\Delta\vartheta$ je rozdíl středních teplot ohřátého tělesa a okolního vzduchu a c je označení pro konstantu.

Pro obvyklé hodnoty teplot t_{ao} lze vzorec zjednodušit na tvar (4):

$$q_k = 2,46 \cdot (1 - 9,2 \cdot 10^{-4} \cdot t_o) \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt[4]{H}} \Delta\vartheta^{1,25} \quad (4)$$

Z tohoto vzorce vyplývá, že při změně teploty okolí o 10 °C by se změnilo q_k o asi 1%. Poměrnou hustotu vzduchu lze vypočítat s dostatečnou přesností ze vzorce (5):

$$\delta = \frac{16 - h}{16 + h} \quad (5)$$

Kde h je nadmořská výška stanoviště transformátoru. Pro vyšší nadmořské výšky je vzduch řidší a tím je horší chlazení a proto uvedený vzorec platí pro nadmořské výšky nižší než 6 km.

Pro transformátory s výškou menší než 1 m platí, že proudění začíná být turbulentní, při kterém ztrácí výška chladícího povrchu význam. Opět pro obecné hodnoty lze proto vzorec (4) zjednodušit na následující tvar pro zjednodušené výpočty:

$$q_k = 2,4 \cdot \Delta\vartheta^{1,25} \quad (5)$$

Pokud se rovnice (4) vydělí rozdílem středních teplot ohřátého tělesa a okolního vzduchu $\Delta\vartheta$, získá se součinitel přestupu tepla konvekcí do okolí (6).

$$\alpha_k = \frac{q_k}{\Delta\vartheta} = 2,46 \cdot (1 - 9,2 \cdot 10^{-4} \cdot t_o) \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt[4]{H}} \Delta\vartheta^{0,25} \quad (6)$$

Je patrné, že součinitel přestupu tepla roste úměrně se čtvrtou mocninou rozdílu teplot.

V případě, že ochlazovací povrch není rovný, ale jedná se například o nádobu s vlnitými stěnami, tak se množství tepla odvedeného vzduchem o něco zmenší z důvodu zvětšeného odporu vzduchu, který proudí mezi zalomenými plochami (při zachování ϑ a S_k). Pro tento případ platí vztah (7):

$$\Delta\vartheta = \left(\frac{q_k}{2,42}\right)^{0,8} \quad (7)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že se mění oteplení $\Delta\vartheta$ volněji než ztráty. (Pro znázornění – pro transformátor, který má oteplení oproti okolnímu vzduchu 45 °C a změníme jeho zatížení tak, aby vzrostly ztráty o 50%, zvětší se jeho oteplení pouze $1,5^{0,8}$ krát (1,383 krát)). [13]

3.1.2 Kondukce

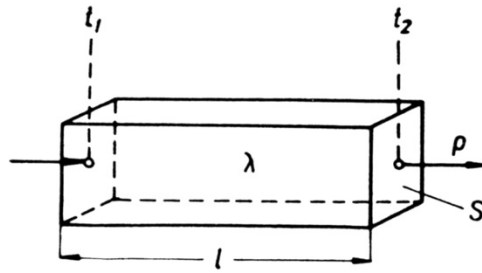
Kondukce (neboli vedení) je zapříčiněno prostřednictvím přímých srážek molekul. Tepelná energie se přenáší z oblasti s vyšší kinetickou energií do oblasti s nižší kinetickou energií, jelikož částice s vyšší rychlostí se srážejí s částicemi s nižší rychlostí, a tím se zvyšuje kinetická energie částic s nižší rychlostí.

Při výpočtu kondukce se lze omezit na vedení tepla v jednom směru pro dva případy – těleso je pouze vodičem tepla nebo těleso je zároveň zdrojem tepla.

Pro případ vedení tepla, kdy je těleso pouze vodičem tepla platí (8):

$$P = \Delta\vartheta \cdot \frac{\lambda \cdot S}{l} \quad (8)$$

Kde P je množství tepla protékajícího za jednotku času, $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot způsobující tepelný tok, S je průřez tělesa, l je délka cesty tepelného toku a λ je tepelná vodivost, která představuje konstantu závislou na materiálu. Tato situace kondukce je znázorněna na následujícím obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Označení pro vzorec (8) [13]

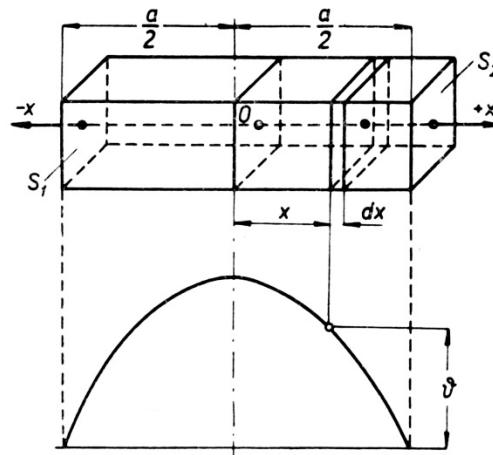
Tento vzorec lze dále převést do tvaru (9):

$$\frac{P}{S} = \Delta\vartheta \cdot \frac{\lambda}{l} = q \quad (9)$$

Kde q představuje tepelný tok a lze vyjádřit pomocí Furierova zákona (10):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (10)$$

Pro případ, kdy je těleso zároveň zdrojem tepla se lze pro zjednodušení opět zaměřit na přenos tepla pouze v jednom směru. Tento případ znázorňuje obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Rozložení oteplení v tělese tvořícím tepelný zdroj [13]

Na obrázku (13.6) je znázorněna situace, kdy se v tělese rovnoměrně generuje teplo, které se dostává ven z hranolu pomocí ploch S_1 a S_2 . Zavedeme ztráty na jednotku objemu p a budeme uvažovat elementární vrstvičku dx , přes kterou proteče za jednotku času energie pSx . Dosazením parametrů vrstvičky do vzorce (8) dostaneme (11)

$$d\vartheta = -p \cdot x \cdot \frac{dx}{\lambda} \quad (11)$$

Záporné znaménko v rovnici představuje úbytek teploty s růstem vzdálenosti x .
[12][13]

3.1.3 Radiace

Radiace (neboli sálání) je vyzařování energie ve formě elektromagnetického záření, které je výsledkem přeměn uvnitř atomů a vzniká na úkor jiných druhů energií, především na úkor tepelné energie. Radiace je vlastností veškerých těles s teplotou větší než 0 K. Každé těleso nepřetržitě vyzařuje energii. Při dopadu na jiná tělesa se část energie absorbuje a část se odrazí. Část energie, která se absorbuje, se změní opět v teplo. Každé těleso tedy zároveň i nepřetržitě pohlcuje sálavou energii.

Výkon odevzdaný jednotkou oteplené plochy může být vyjádřen pomocí Stefan-Boltzmanova zákona (12):

$$q_{pr} = K \cdot v \cdot (t_{a1}^4 - t_{a2}^4) \quad (12)$$

kde t_{a1} a t_{a2} představují absolutní teploty teplého tělesa a okolního prostředí, K je konstanta sálání pro absolutně černé těleso a v představuje poměrný činitel sálání, který je roven poměru množství tepla vyzářeného tělesem k teplu vyzářeným absolutně černým tělesem za stejných podmínek. Konstanta K se obecně volí jako $5,77 \cdot 10^{-8}$. Poměrný činitel sálání v elektrických strojích dosahuje hodnot mezi 0,3 až 0,85, přičemž u většiny strojů se počítá s hodnotami blízkých 0,85, protože většina povrchů má litinový povrch nebo povrch natřený tmavým matným lakem. [14]. Dosazením hodnot do vzorce pro q_{pr} , s teplotami vyjádřenými v Kelvinech, dostaneme vzorec:

$$q_{pr} = 5,77 \cdot v \cdot \left[\left(\frac{t_{a1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{a2}}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Tento vzorec lze pro dosažení rozdílu teplot $\Delta\vartheta = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ zjednodušit do tvaru (14):

$$q_{pr} = 2,38 \cdot v \cdot \Delta\vartheta^{1,25} \cdot (1 + 0,011 t_o) \quad (14)$$

Kde t_o je teplota okolí, $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot ohřátého tělesa a okolí a q_{pr} je výkon vyzářený jednotkou ohřátého povrchu. Vzorec (14) poukazuje na skutečnost, že ztráty odvedené konvekcí i sáláním jsou úměrné $\Delta\vartheta^{1,25}$.

Dělením vzorce rozdílem teplot dostaneme opět součinitel přestupu tepla, v tomto případě pro radiaci (15).

$$\alpha_{pr} = 5,77 \cdot v \cdot \frac{\left[\left(\frac{t_{a1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{a2}}{100}\right)^4\right]}{\Delta\vartheta} \quad (15)$$

Ve zjednodušeném tvaru:

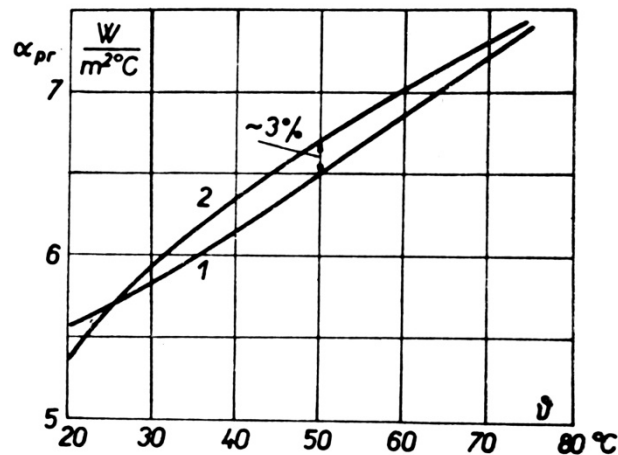
$$\alpha_{pr} = 2,38 * v * \Delta\vartheta^{0,25} * (1 + 0,011 t_o) \quad (16)$$

Pro oteplení v mezích 10 až 100 °C lze závislost nahradit přímkou (17)(18).

$$\alpha_s = 1,7 + 0,01\Delta\vartheta, \text{ pro } v = 0,3 \quad (17)$$

$$\alpha_s = 4,8 + 0,03\Delta\vartheta, \text{ pro } v = 0,85 \quad (18)$$

Tato skutečnost je znázorněna na obrázku 3.4, kde je vidět průběh podle vzorce (15) a podle zjednodušené verze tohoto vzorce (16):



Obrázek 3.4: Závislost součinitele přestupu tepla sáláním: křivka 1 (13) a křivka 2 (14), v obou případech pro teplotu okolí 20 °C [13]

Z výše uvedených poznatků je patrné, že hodnoty činitelů charakterizující odvod tepla vedením a sáláním jsou podobné. Zásadně se liší pouze ve výpočtu povrchu, jelikož u vedení se uplatní celá plocha ochlazovacího tělesa, kdežto u radiace pouze povrch jeho obvodu. Tato skutečnost má význam například u výpočtu ochlazení u vnitřního povrchu nádoby. [13]

3.2 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je klíčovým parametrem při určování přestupu tepla, který udává množství tepla, přestupujícího za jednotku času jednotkou povrchu při teplotním spádu 1 °C mezi teplotou tekutiny a povrhu tělesa.

Množství tepla sdělené stykem, může být stanoveno podle Fourierova zákona, ovšem tento vztah počítá s předem neznámými koeficienty, které se zjistí až experimentálně. Z tohoto důvodu lze zjednodušeně počítat pomocí Newtonova vzorce, který se soustřeďuje pouze na jednu neznámou – součinitel přestupu tepla:

$$\Delta P = \alpha \cdot S \cdot (t_1 - t_2) \quad (19)$$

Kde α představuje součinitele přestupu tepla a S plochu ohřivaného tělesa. Z tohoto vzorce je patrné, že oteplení části transformátoru je přímo úměrné ztrátám a nepřímo úměrné součiniteli přestupu tepla a chladicí ploše.

Velikost součinitele přestupu tepla není pevně stanovena a liší se podle situace, kde dochází k přestupu tepla. Z tohoto důvodu je součinitel závislý na celé řadě proměnných a pro jeho určení se používá diferenciálních rovnic. Ty se získají tak, že se jednotlivé proměnné stanoví na základě fyzikálních zákonů pro malou část prostoru. Jejich integrací se následně získá analyticky závislost mezi veličinami pro celou oblast a pro celý časový interval. Mezi nejdůležitější rovnice patří rovnice přecházení tepla, rovnice průtoku tepla, rovnice kontinuity, pohybová rovnice a okrajové podmínky. [14]

3.3 Stanovení součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla není pro celý povrch stejný a je tedy potřeba počítat s podmínkami, které přísluší dané situaci, jako je povrch chladicí stěny, tvar, poloha a velikost plochy a na oteplení. Zpravidla se pracuje se střední hodnotou součinitele přestupu pro velké plochy.

Konvekce a kondukce se zpravidla počítají společně, přičemž u elektrických strojů výrazně převažuje podíl konvekce. Tento jev se nazývá vedení tepla. Prouděním chladiva okolo chlazeného povrchu dojde k jeho ohřátí a tím zmenší svojí měrnou váhu, čímž dochází k volnému proudění chladiva. Volné proudění nastává jak u vodorovných, tak i svislých stěn a jeho intenzita stoupá s teplotou ohřevu tělesa.

Podle Lorenzova vztahu platí pro součinitel přestupu tepla následující vztah:

$$\alpha_{vp} = 0,548 \sqrt[4]{\frac{g \cdot c \cdot \beta \cdot \lambda^3 \cdot \Delta\vartheta}{\nu \cdot h}} \quad (20)$$

Kde g je gravitační zrychlení, c měrná tepelná kapacita chladiva, β je činitel objemové roztažnosti chladiva, λ je měrná tepelná vodivost chladiva, ν je kinematická viskozita chladiva a h je svislá výška stěny.

Po dosazení hodnot, které odpovídají běžné teplotě provozu a předpokladu, že součinitel není závislý na výšce stěny, dojde k značnému zjednodušení funkce a lze ji pro teplotu od 10 do 100 °C nahradit přímkou, podobně jako u radiace. Obecně se pro elektrické stroje volí střední hodnota:

$$\alpha_{vp} = 6,5 + 0,05\Delta\vartheta \quad (21)$$

Pro povrch stroje, který je volně vystavený radiaci a konvekci s kondukcí se oba součinitele přestupu spojují a v jeden, který je pro činitel sálání $c_s = 0,85$ roven

$$\alpha = 11,3 + 0,08\Delta\vartheta \quad (22)$$

Chlazení olejem je efektivnější, než je chlazení vzduchem a platí pro něj tedy i značně výhodnější součinitel přestupu:

$$\alpha_{vp} = 40,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{h}} \quad (23)$$

Voda jako chladicí prostředek má ještě lepší vlastnosti než olej, ovšem z bezpečnostních důvodů se u elektrických strojů nepoužívá.

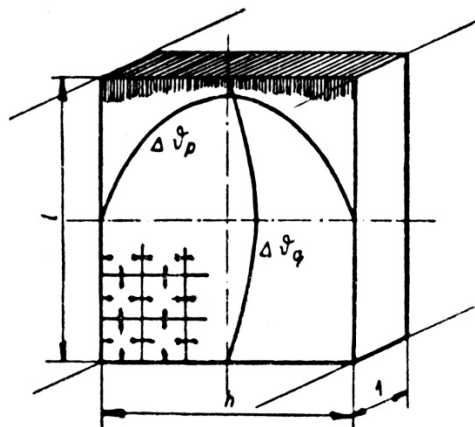
Analytické zjištění a softwarové ověření součinitele přestupu je hlavní část mé diplomové práce. Amorfní transformátor, který navrhuji, bude chlazen vzduchem s nuceným oběhem. Lze na něj tedy uplatnit vzorce (21) a (22), pro které je ovšem zapotřebí znalost oteplení, jelikož tyto vzorce slouží ke zpětnému zjištění součinitele přestupu až po odečtení oteplení stroje. V mém případě je možné získat oteplení ze simulace v programu Transient-Thermal (viz. kapitola 6.2), kde použiji následující hodnoty součinitele přestupu pro orientační zjištění oteplení stroje. Tyto hodnoty součinitele přestupu tepla byly vypočteny pro zakryté části stroje pomocí (21), pro nezakryté pomocí (22) a pro částečně zakryté pomocí střední hodnoty výsledků získaných použitím vztahů (21) a (22), neboť jejich hlavním rozdílem je míra podílu radiace. Tyto hodnoty byly vypočteny pro odhadnuté oteplení 70 °C.

Tabulka 3.1: Odhadnuté hodnoty součinitele přestupu

Zakrytí plochy stroje	α
Žádné	16,9
Částečné	13,5
Úplné	10

3.4 Oteplení magnetického obvodu

V magnetickém obvodu se teplo přenáší z teplejšího místa do chladnějšího a tento přenos závisí na vlastnostech materiálu v daném směru. V plechu magnetického obvodu přichází v úvahu tepelná vodivost plechů v podélném směru λ_p a tepelná vodivost plechů a izolace v příčném směru λ_q . Oteplení magnetického obvodu v daných směrech je znázorněno na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Znázornění oteplení jednotky délky magnetického obvodu [12]

Jak je vidět na obrázku, maximální oteplení je dáno vrcholem paraboly v příčné nebo podélné složce. Dále je patrné, že vlivem nízké tepelné vodivosti je přenos oteplení v příčné složce nižší (40 až 100násobně) a lze tedy zanedbat. Další nejistoty se při výpočtu oteplení magnetického obvodu zanesou vlivem nerovnoměrnosti zakrytí obvodu vinutím nebo spojkami stahovací konstrukce. To zapříčiní rozdílnou rychlost chladícího média a způsobí rozdílný součinitel přestupu tepla pro jednotlivé jednotky objemu.

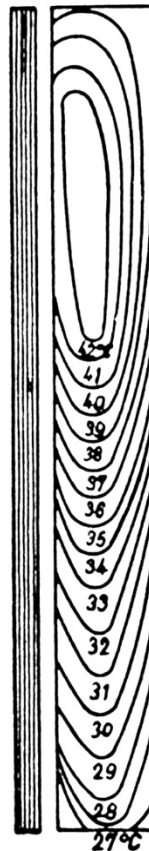
Pro transformátory do výšky magnetického obvodu 500 mm lze poměrně přesně využít pro znalost oteplení vzorec (19). Pro větší rozměry transformátoru lze postačujících výsledků dosáhnout pomocí úvahy, že jádro má tvar válce a jeho čelem se odvádí teplo. Pro tento případ platí (24):

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{A}{B^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{\lambda_q \cdot B}{\alpha} \cdot \sinh\left(\frac{B \cdot h}{2}\right) + \cosh\left(\frac{B \cdot h}{2}\right)} \right) \quad (24)$$

Kde $A = \frac{p}{\lambda_q}$, $B = \frac{\lambda_q \cdot O}{B \cdot S}$, p je měrná ztráta jednotky objemu, λ_q je příčná tepelná vodivost, α je součinitel přestupu tepla, O je obvod průřezu, S je chladicí plocha a h výška části, s kterou se počítá.

3.5 Oteplení vinutí s plynným dielektrikem

Teplota cívek stoupá od dolní části vinutí po horní a od středu vinutí po okraj cívky, což je dané vzájemným ovlivňováním jednotlivých cívek a stoupáním chladícího média od zdola nahoru. Rozložení teploty vinutí podél chladícího kanálku je vidět na obrázku M-3.



Obrázek 3.6: Příčný řez oteplení jednotlivých míst ve vinutí [12]

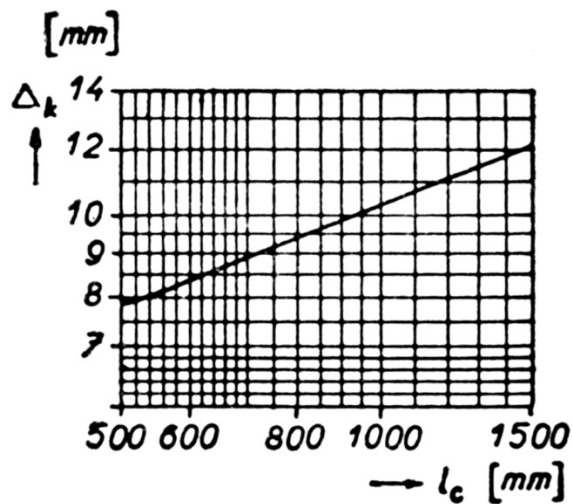
Protože se pro chlazení vzduchem uplatňují především svislé kanálky, platí pro oteplení rovnice (25):

$$\Delta\vartheta = \frac{q}{2,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{l}}} \quad (25)$$

A po vyjádření $\Delta\vartheta$ (26):

$$\Delta\vartheta = \left(\frac{q}{2,5}\right)^{\frac{4}{5}} \cdot l^{\frac{1}{5}} \quad (26)$$

Chladicí kanálky pro vzduchové chlazení musí mít šířku minimálně 8 mm, přičemž pro transformátory větších rozměrů (od 600 mm) a pro vinutí blíž k jádru musí mít chladicí kanálky větší šířku. Závislost šířky kanálku na výšce vinutí je vidět na obrázku 3.8.



Obrázek 3.7: Střední šířka chladicího kanálku v závislosti na výšce vinutí

4 Elektromagnetický návrh

Cílem diplomové práce je návrh distribučního transformátoru s důrazem na minimální ztráty. Znalost podstaty ztrát v transformátoru je tedy základním bodem elektromagnetického návrhu.

4.1 Ztráty v transformátoru

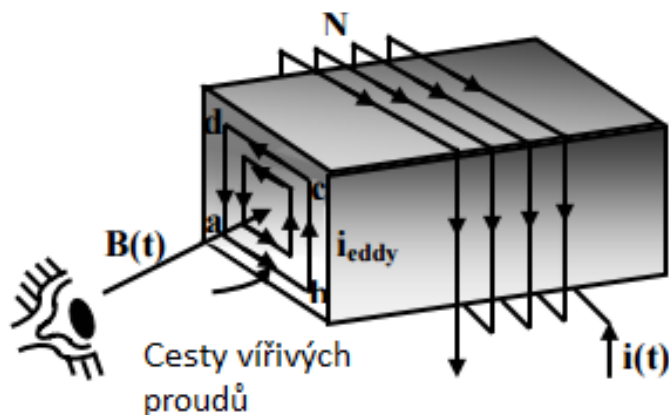
Ztráty v transformátoru lze rozdělit na ztráty nakrátko, které jsou závislé na zatížení transformátoru, a ztráty naprázdno, které jsou nezávislé na zatížení:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k \quad (28)$$

4.1.1 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno se dělí do tří skupin: na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a dodatečné ztráty.

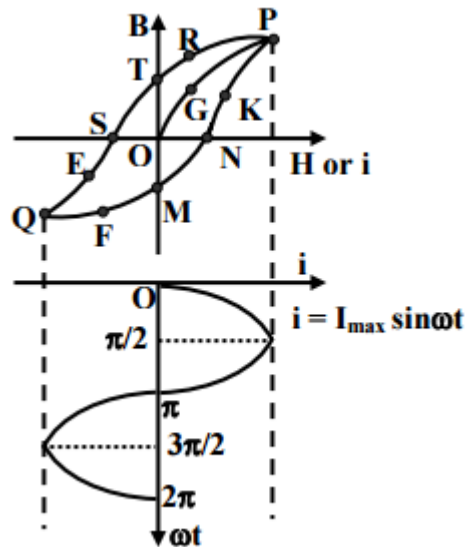
Ztráty vířivými proudy popisuje obrázek 4.1. Na tomto obrázku je znázorněno kvádřové jádro z vodivého materiálu, které je obtočené cívkou, v níž protéká časově proměnný proud. Na průřezu tohoto kvádru lze určit libovolnou obdélníkovou přirozeně uzavřenou dráhu a-b-c-d. V této dráze bude za těchto podmínek indukované elektromagnetické pole podle Faradayova zákona a v této dráze poteče časově proměnný vířivý proud. Velikost proudu bude omezena odporem daného obvodu, kterým poteče. To znamená, že v tom obvodu budou vznikat ztráty a dojde k ohřevu kvádru. Celková velikost vířivých proudů je daná celkovým součtem jednotlivých drah. Z tohoto poznatku je patrné, že rozdělení magnetického jádra transformátoru do jednotlivých vrstev sníží velikost vířivých proudů a amorfní fólie, které se vyznačují svojí malou tloušťkou, vliv vířivých proudů značně snižují.



Obrázek 4.1: Vířivé Proudů uvnitř magnetického obvodu [15]

Hysterezní ztráty vznikají též vlivem vystavení materiálu střídavému magnetickému poli. Vnitřní struktura materiálu je tvořena z domén, jejichž magnetické dipóly jsou orientovány náhodně. Vlivem přiložení magnetického pole tyto domény mění svoje natočení souhlasně s okamžitým směrem magnetického pole. K natočení domén se spotřebuje energie, která se projeví oteplením magnetického obvodu. Velikost této energie je úměrná velikosti frekvence vnějšího magnetického pole. Velikost hysterezních ztrát lze vypočítat z obsahu B-H křivky daného materiálu. Na obrázku 4.2 je vidět B-H křivka CRGO plechu společně s proudem protékajícím obvodem, který vybudí vnější magnetické pole. Z bodu O do bodu P vede křivka prvotní magnetizace, která znázorňuje první přiložení magnetického pole k jádru. Po poklesu proudu z maxima do nuly dochází k změně polohy bodu B-H křivky po nové trase, která se nachází nad křivkou prvotní magnetizace až do bodu T, kdy v materiálu zůstává remanentní magnetické pole. [15] Celý cyklus jedné periody obsahuje trasu P-T-S-Q-M-N-P, při kterém vznikne ztrátová energie o velikosti:

$$W = \int_0^{B_0} H dB \quad (29)$$



Obrázek 4.2: B-H křivka CRGO plechu

4.1.2 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko jsou tvořeny především Jouelovými ztrátami ve vinutí, které jsou úměrné druhé mocnině okamžité velikosti proudu, jak ve vstupním, tak výstupním vinutí.

Dále jsou ztráty nakrátko tvořeny dodatečnými ztrátami, které jsou vyvolané magnetickým tokem ve všech magneticky a elektricky vodivých částech, které se nalézají v magnetickém poli při zkoušce nakrátko. Mezi dodatečné ztráty tedy patří ztráty vířivými proudy v jednotlivých vinutích a ztráty vyvolané ve feromagnetických materiálech, které leží v rozptylovém magnetickém poli a které vedle vlivu vířivých proudů zahrnují rovněž hysterezi. [10]

4.2 Elektromagnetický návrh

První výpočet parametrů transformátoru provedu za pomoci elektromagnetického návrhu, který byl vytvořen v programu Microsoft Excel dle [21]. Elektromagnetický návrh byl vytvořen za pomoci tabulek, norem, příslušné literatury a technického odhadu. V tabulkách jsou žlutě označené údaje zadány a bíle označené údaje vypočteny náležitými vzorci.

Prvním bodem návrhu je zvolení výkonu transformátoru, napětí, druh zapojení a prvotní návrh vinutí. Z těchto údajů je možno vypočítat například proudovou hustotu

ve vinutí, fázový proud nebo první parametry vinutí, které lze následně upravit podle potřeby návrhu, jak je vidět v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Základní údaje návrhu

typový výkon	kVA	250	kmitočet	Hz	50
napětí primáru	V	22000	napětí sekundáru	V	400
spojení primáru	-	D	spojení sekundáru	-	Y
proud	A	6,56	proud sekundáru	A	360,84
proud hust.	A/mm ²	2	proud hust.	A/mm ²	2
potřebný průřez	mm ²	3,28	potřebný průřez	mm ²	180,4
paralelních drátů		1	paralelních drátů		1
šířka vodiče	mm	1,05	šířka vodiče	mm	7,7
výška vodiče	mm	3,14	výška vodiče	mm	23,2
šířka vodiče	mm	0,5	šířka vodiče	mm	0,5
výška vodiče	mm	12,00	výška vodiče	mm	600
průřez svazku	mm ²	6,00	průřez svazku	mm ²	300
proud. hust.		1,09	proud. hust.		1,2
fázové napětí	V	22000	fázové napětí	V	230,9
fázový proud	A	3,79	fázový proud	A	360,8
počet závitů	-	3386,8	počet závitů	-	35,5

Za pomoci výše uvedených parametrů se dopočítají magnetické indukce vinutí a zvolí se počet závitů. V mých variantách návrhů je vinutí rozděleno do několika částí a tomu jsou přizpůsobeny počty závitů, jak je vidět v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Počet závitů

U1	N1-1	N1-2	B	N2-1	N2-2	U2
22000	1700	1700	1,095	15	15	336,2
				16	16	358,6
				17	17	381

Následně se zvolí parametry magnetického obvodu, jak je vidět z tabulky 4.3. Kvůli nutnosti dodržení vzdáleností mezi vinutími a magnetickým obvodem (viz. kapitola 5) se jednotlivé varianty návrhu transformátoru liší ve velikosti magnetického obvodu.

Tabulka 4.3: Parametry magnetického obvodu

magnetický obvod		Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
šířka jádra [C]	mm	140	140	140
stah jádra [D]	mm	200	200	200
šířka okna [B]	mm	370	350	330
výška okna [A]	mm	760	760	760
průřez jádra	mm ²	26600	26600	26600
váha železa	kg	985,3	968,1	951
volba indukce	T	1,1	1,1	1,1

Dalším bodem návrhu je výpočet parametrů vinutí. Vinutí je hlavním rysem rozdílů jednotlivých variant diplomové práce. V tabulce 4.4 jsou vidět parametry vinutí nízkého napětí a v tabulce 4.5 parametry vinutí vysokého napětí.

Tabulka 4.4: Parametry vinutí nízkého napětí

		kanál 1	vinutí 1-1	kanál 2	vinutí 1-2
šířky	mm	10	10	10	10
obvod i	mm	680	742,8	805,6	868,5
obvod e	mm	742,8	805,6	868,5	931,3
obvod s	mm	711,4	774,2	837,1	899,9
závitů	-		16		16
šířka vodiče	mm		0,5		0,5
výška vodiče	mm		600		600
vodiče radiálně	-		1		1
vodiče axiálně	-		1		1
vrstev	-		1		1
závit/vrstva	-		16		16
šířka vinutí	mm		17		17
výška vinutí	mm		600		600
průřez	mm ²		300		300
1 cívka	kg		10,03		11,6
celk. hm. 3f	kg		30,1		34,9
ztráty	W		544,4		632,7
výška vinutí	mm		600		600
součinitel přestupu	W/m ² /K		9		9
povrch	m ²		0,55		0,64
oteplení	K		36,1		36,1

Tabulka 4.5: Parametry vinutí vysokého napětí – pokračování 4.4

kanál 3	bariéra	kanál 4	vinutí 2	kanál 5	vinutí 2
20	5	20	30	10	30
931,3	1056,9	1088,4	1214	1402,5	1465,4
1056,9	1088,4	1214	1402,5	1465,4	1653,9
994,1	1072,7	1151,23	1308,3	1433,9	
			1700		1700
			0,5		0,5
			12		12
			1		1
			1		1
			35		35
			48,5		48,5
			30		30
			594,8		594,8
			6		6
			36		42,9
			108,1		128,8
			1615,5		1925,9
			595		595
			9		11
			0,66		0,95
			44,8		42,3

V tabulkách 10.1, 10.2, 10.3 a 10.4 v příloze jsou vidět parametry vinutí pro zbylé dvě varianty provedení vinutí. Tyto varianty se liší přítomností chladících kanálků mezi vinutími a úpravou velikosti celého transformátoru.

Nakonec ze znalosti hodnot všech tabulek je možno vypočítat základní hodnoty transformátoru, které slouží k ověření věrohodnosti návrhu a k orientaci při analýze výsledků ze simulací, Tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 4.6.

Tabulka 4.6: Výsledné hodnoty elektromagnetického návrhu

jm. impedance	ohm	5808
odpor nakrátko	ohm	109,62
reaktance nakrátko	ohm	213,71
odpor nakrátko	%	1,88
reaktance nakrátko	%	3,68
napětí nakrátko	%	4,13
ztráty nakrátko	W	4718,5
ztráty naprázdno	W	213

Výsledné hodnoty ztrát jsou ve wattech. Prostředí Ansys (viz. Kapitola 6) ovšem počítá ve wattech na metr kubický, proto je nutné převést ztráty naprázdno a nakrátko na hodnoty v poměrných jednotkách. Poměrné jednotky se získají přepočítáním ztrát na objem příslušné části obvodu transformátoru. Tento objem je možno získat z programu AutoCAD, v němž vytvořím 3D model transformátoru (viz. Kapitola 5) a za pomoci tohoto modelu zjistím jeho parametry. Přepočet je znázorněn v následující tabulce. Ztráty nakrátko jsou převedeny na každé vinutí samostatně za předpokladu rovnoměrného rozložení ztrát. Přepočet je vidět v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7: Přepočet ztrát na poměrné hodnoty

	vinutí nn ₁	vinutí nn ₂	vinutí vn ₁	vinutí vn ₂	jádro
W	544,3	632,7	1 615,5	1 925,9	213
mm ³	13 936 471	16 198 418	70 060 366	83 518 905	12 8800 000
m ³	0,0139	0,0161	0,07006	0,0835	0,128
W/m ³	3 9062,4	39 062,4	23 059,3	23 059,3	1 654

4.3 Steinmetzův vztah – Maxwell 3D

Steinmetzův vztah je vědecký vztah pro výpočet ztrát naprázdno v transformátoru, který používá software od firmy Ansys (viz kapitola 7). Jak již bylo řečeno, ztráty naprázdno se dělí na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty byly zahrnuty Steinmetzovým vztahem v jeho prvotním tvaru:

$$p_{Fe} = p_h + p_v = k_h \cdot B^2 \cdot f + k_v \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (30)$$

Kde p_{Fe} reprezentuje měrné ztráty v železe, p_h měrné ztráty hysterezní, p_v měrné ztráty vířivými proudy, k_h a k_v jsou koeficienty těchto ztrát, B je magnetická indukce a f je frekvence magnetického pole.

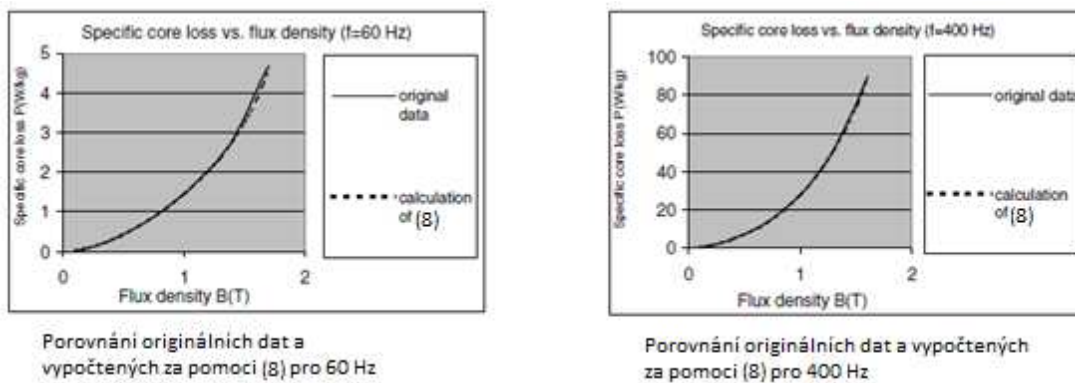
Steinmetzův vztah v tomto tvaru dával uspokojivé výsledky v lineární oblasti magnetizační křivky do zhruba 1T, ovšem nad touto hodnotou magnetické indukce docházelo k odchylkám mezi vypočtenými hodnotami a změřenými hodnotami na Epsteinově vzorku.

Steinmetzův vztah z důvodu těchto nepřesností prošel mnoha modifikacemi, které se opíraly o nejnovější poznatky v oblasti struktury materiálu a magnetizace. V současné době se stále nedokázalo odhalit přesnou příčinu ztrát naprázdno. Rozdíly mezi hodnotami vypočtenými Steinmetzovým vztahem a experimentálně naměřenými

hodnotami reprezentují dodatečné ztráty, které souvisejí s tloušťkou, plochou příčného řezu a vodivostí materiálu. Jedná se o parametr, který popisuje mikrostrukturu materiálu. Současný tvar Steinmetzova vztahu se vyznačuje již minimálními odchylkami od naměřených hodnot:

$$p_{Fe} = p_h + p_v + p_d = k_h \cdot B^{(a+bB+cB^2)} \cdot f + k_v \cdot B^2 \cdot f^2 + k_d \cdot B^{1.5} \cdot f^{1.5} \quad (31)$$

Kde p_d reprezentuje měrné dodatečné ztráty, k_d je koeficient dodatečných ztrát a a , b , c jsou konstanty, měnící se s frekvencí. Na obrázku 4.3 jsou vidět průběhy ztrát elektrotechnické oceli Ak 26-M47 při určité frekvenci v závislosti na magnetické indukci s užitím (3).



Obrázek 4.3: Průběhy ztrátových charakteristik magnetického obvodu

Steinmetzův vztah je důležitý pro práci v programu Maxwell 3D, protože jeho výstupem jsou mimo jiné koeficienty k_h , k_v a k_d , které mohou být následně použity pro výpočet ztrát za pomoci tohoto vztahu. [16]

5 AutoCAD

Simulace v softwaru Ansys vyžaduje tvorbu modelu stroje, jehož pracovní stav bude simulovat. Model lze vytvořit v prostředí Ansys, nicméně zároveň umožňuje import již hotového modelu. Z tohoto důvodu je vhodné vytvořit model v prostředí, jehož primární funkce je tvorba modelů. Pro tvorbu modelu jsem zvolil program AutoCAD, jehož exportované soubory *.sat jsou kompatibilní s Transient-Thermal a Maxwell 3D.

Jako základní předlohu pro transformátor jsem použil výkresy a tabulky pro suché transformátory od firmy Blum Modulkern. Tyto tabulky jsem po tvorbě elektromagnetického modelu upravil podle výsledků. Parametry magnetického obvodu všech variant transformátoru jsou vyneseny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Rozměry magnetického obvodu

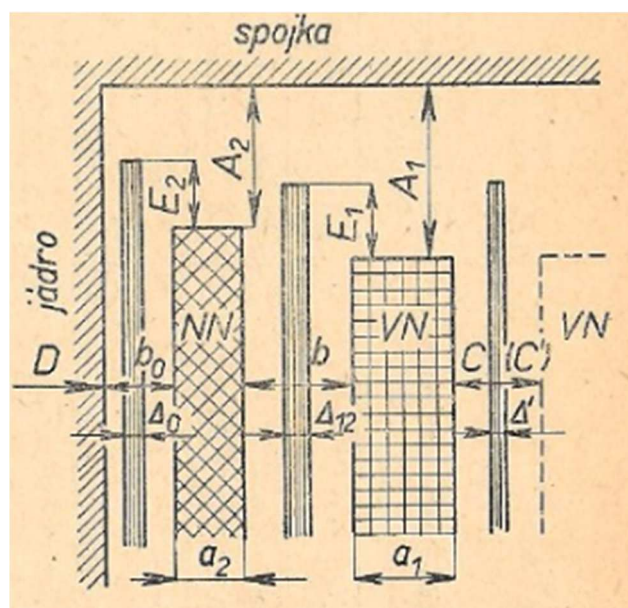
Varianta	Šířka jádra [mm]	Stah jádra [mm]	Šířka okna [mm]	Výška okna [mm]
1	140	200	370	760
2	140	200	350	760
3	140	200	330	760

Rozměry vinutí vysokého napětí, vinutí nízkého napětí a bariéry jsou vyneseny v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Rozměry vinutí a bariéry

Varianta	Šířka nn_1 [mm]	Šířka nn_2 [mm]	Šířka vn_1 [mm]	Šířka vn_2 [mm]
1	10	10	30	30
2	20		30	30
3	20		60	

Poloha vinutí vzhledem k magnetickému obvodu, protějším vinutím a bariéře byla zvolena tak, aby splňovala platné standardy, které se požadují při návrhu transformátoru. [17][18] Vybrané vzdálenosti jsou vyneseny v tabulce 5.3 a obrázku 5.1.

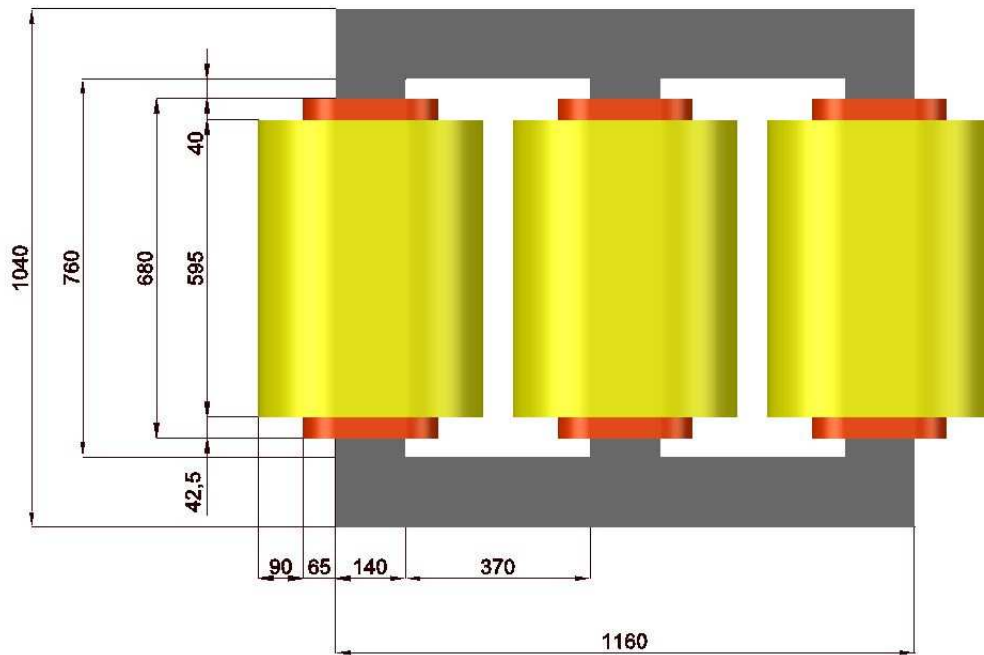


Obrázek 5.1: Vzdálenosti uvnitř transformátoru

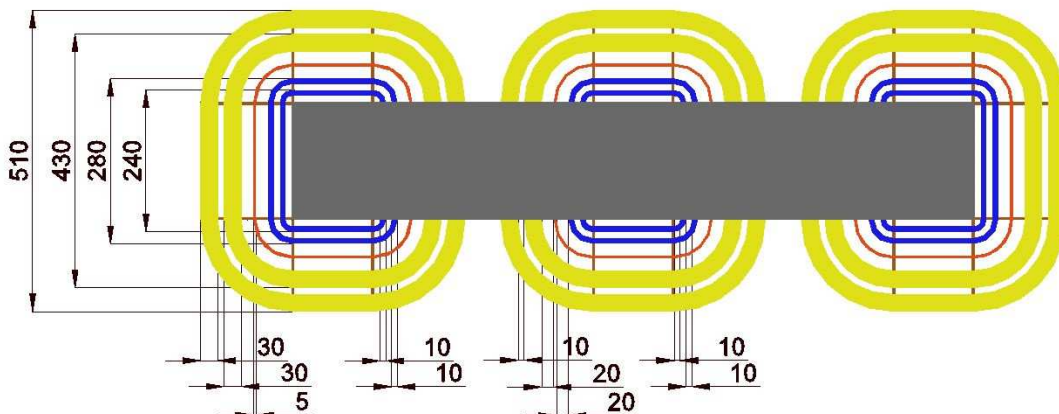
Tabulka 5.3: Předepsané vzdálenosti uvnitř transformátoru

E1 [mm]	E2 [mm]	A1 [mm]	A2 [mm]	b [mm]	Δ_{12} [mm]	C [mm]
40	42,5	80	82,5	45	5	60

Na obrázcích 5.2 a 5.3 je možno vidět hotový model, který je složen z magnetického obvodu, dvou vinutí nižšího napětí a dvou vinutí vyššího napětí a izolační bariéry. Model, který má rozdělené pouze vinutí vysokého napětí a model bez rozdělených vinutí je vidět na obrázcích 10.59–10.62 v příloze.



Obrázek 5.2: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého a nízkého napětí



Obrázek 5.3: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého a nízkého napětí

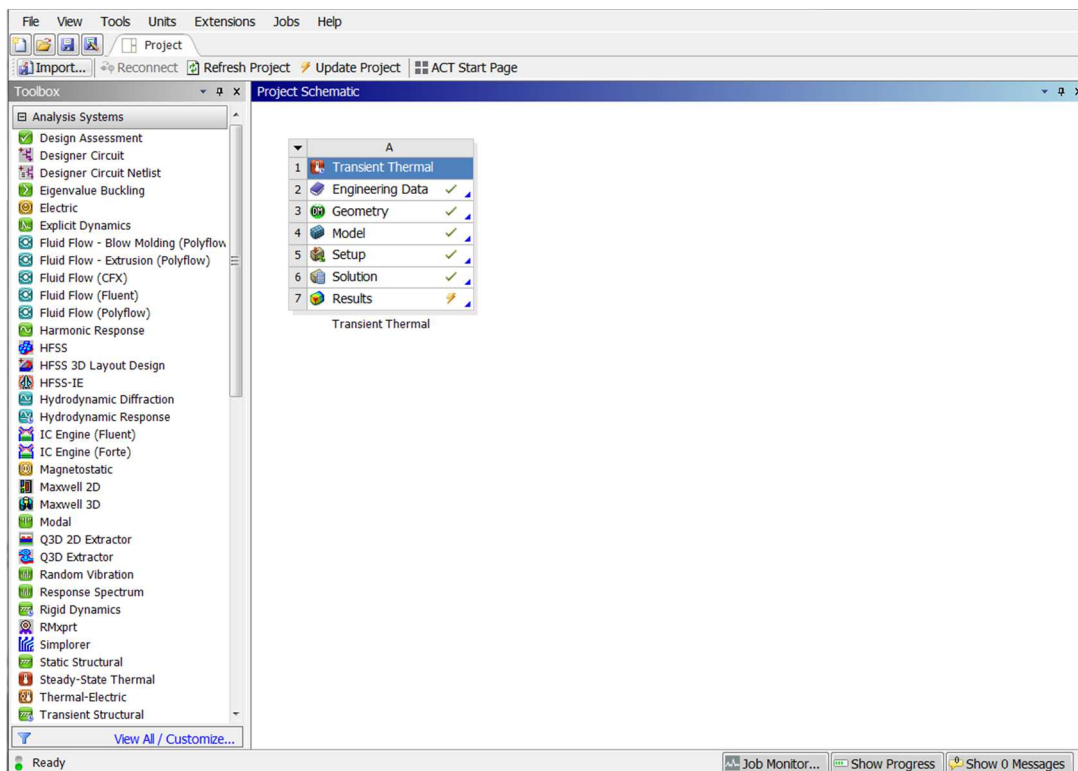
Magnetický obvod je složen z několika částí, lišící se stupněm zakrytí okolními částmi transformátoru, aby bylo možno jednotlivým částím přiřadit rozdílnou hodnotu koeficientu přestupu tepla v programu Transient-Thermal.

6 Ansys

Softwareové prostředí od firmy Ansys slouží k technickým výpočtům nebo simulacím netočivých strojů, točivých strojů, všech přístrojů, ale i celých strojů, jako jsou auta nebo letadla. Může simulovat jejich celkové chování v reálné situaci od zapnutí po chod a vypnutí. V transformátorech lze sledovat průběh napětí, proudů a ztrát při sepnutí, ale i mechanické namáhání vinutí. Ve své práci využívám studentskou verzi Ansys Electronics, konkrétně jeho modul Maxwell 3D, který je zprostředkován přímo školou a je nutné s ním pracovat na školním internetovém připojení. Workbench a jeho další součásti jsou volně dostupné od firmy Ansoft pro studenty přímo z oficiálních stránek a je možno s ním pracovat i doma. Omezení pro studentskou verzi je pouze v rozsahu výpočtu. Toto omezení se týká pouze velkých projektů a nezasahuje do této práce.

6.1 Workbench

Program Workbench je základním vývojovým prostředím pro moji práci. Slouží jako základna pro propojení všech programů od firmy Ansoft, ale i jako spouštěcí prostředí jednotlivých programů, které ve své práci použiji. Na následujícím obrázku 6.1 je vidět jeho grafické prostředí.



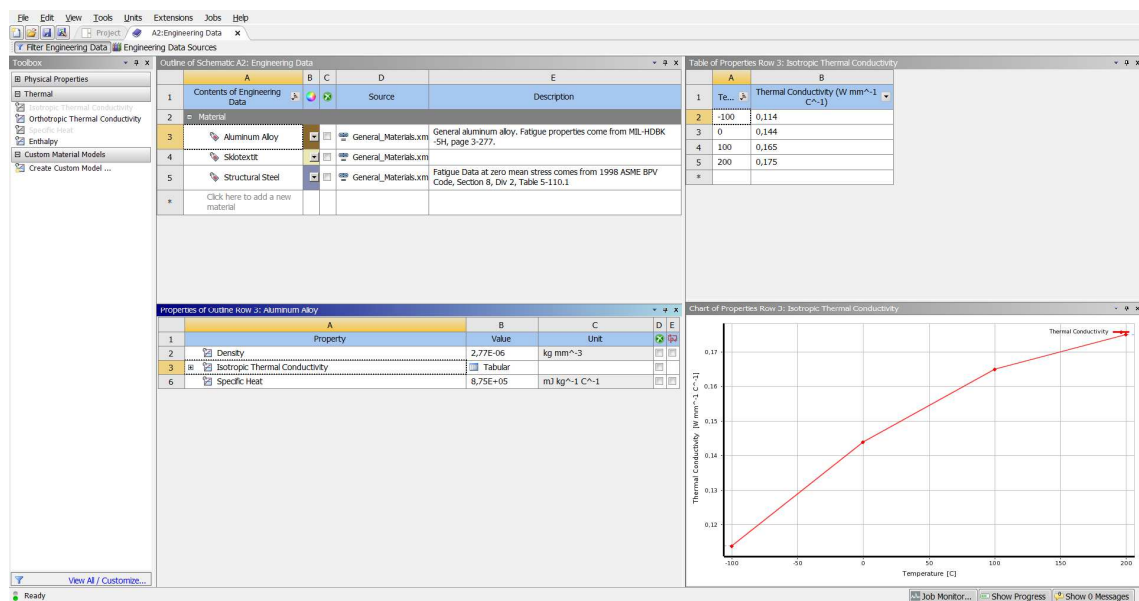
Obrázek 6.1: Workbench

Na levé straně obrázku jsou vidět všechny programy, které lze použít pro simulace. V okně Project Schematic je vidět program Transient-Thermal, který je v tento moment připravený tvorbě simulace oteplení zařízení.

6.2 Transient-thermal – varianta 1 – rozdělené vinutí vysokého a nízkého napětí

Transient-Thermal je program, který slouží k tepelné simulaci modelů, které jsou mu zadány. Na obrázku 6.1 jsou vidět všechny součásti tohoto programu.

První část jsou Engineering data. V této záložce se volí materiály, které bude možno v dalších krocích přiřadit jednotlivým částem modelu, jehož funkce se bude simulovat. Materiály, s kterými jsem pracoval, byly Aluminium Alloy, modifikovaný Structural steel a sklotexit, jak je vidět na obrázku 6.2.



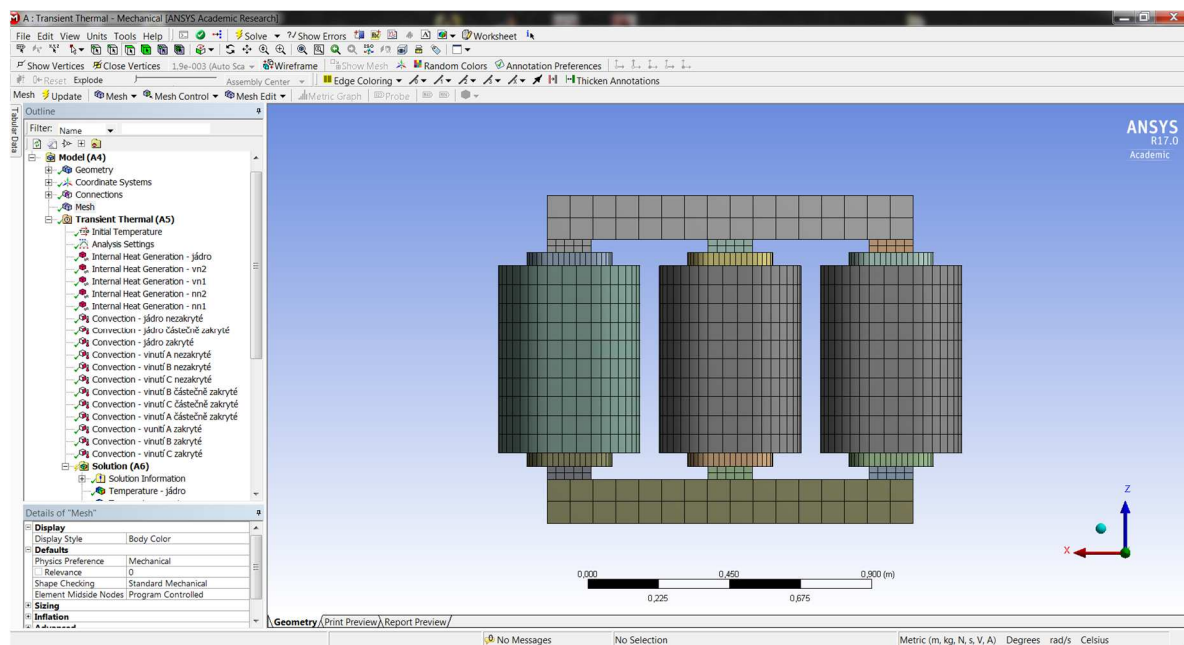
Obrázek 6.2: Transient-Thermal – Engineering data

V této části programu lze vybrat z knihovny materiály, které byly již předdefinované anebo vytvořit vlastní materiál, kterému lze z levého okna Toolbox přiřadit požadované vlastnosti a v dolním okně Properties tyto vlastnosti modifikovat. Vlastnosti materiálu lze nastavit i jako funkce, což znamená, že se například jeho hustota může měnit v závislosti na jeho teplotě.

Další záložka na obrázku 6.1 – Geometry – slouží k vytvoření modelu pro výpočet. Ačkoli obsahuje příslušenství pro jednoduchou tvorbu modelu, je výhodnější vytvořit svůj model v jiném programu a do geometry ho naimportovat. V mém případě

se jednalo o import *.sat souboru z AutoCADu. Při tomto druhu importování se musí dát pozor na jednotky modelu. Model, který byl vytvořen v prostředí AutoCAD v milimetrových jednotkách, totiž má za normálních okolností v prostředí Transient-Thermal metrové jednotky. Řešení je v převedení modelu v AutoCADu za pomoci příkazu SCALE na tisícínovou velikost, která bude po převedení do Transient-Thermal v milimetrovém měřítku.

Po vytvoření modelu je možno přejít do záložky Model, která je spojená zároveň se zbylými záložkami Setup, Solution a Results. V této záložce se programu zadává jeho funkce. Na obrázku 6.3 je vidět můj model transformátoru s již zadanou generací tepla a konvekcí.



Obrázek 6.3: Transient-Thermal – Model

Ztráty a odvod tepla jsem zadal jako konstantní hodnoty. Ztráty byly zadány za pomoci příkazu Internal Heat Generation. Internal Heat Generation je funkce, která počítá s objemovou složkou modelu. Bylo tedy nutné vybrat jednotlivé části modelu objemově a postupně jim zadat jejich generaci tepla. Odvod tepla je zadán pomocí konvekce. Transient-Thermal určuje velikost předání tepla pomocí součinitele přestupu tepla. Velikost tohoto součinitele byla upravena, aby obsahovala odvod tepla jak konvekcí, kondukcí i radiací. V konvekcí bylo potřeba určit počáteční teplotu, díky které lze dopočítat oteplení transformátoru z výsledných teplot. Tato teplota byla zvolena 70 °C pro počáteční hodnoty a její velikost byla upravena pro další simulace.

Mimo tepelné veličiny bylo potřeba zadat Mesh, neboli mřížku (citlivost), s níž bude program počítat.

Nakonec se určí doba délky simulace. V mé práci jsem po prvních pokusech zjistil, že přechodový tepelný děj transformátoru po jeho zapnutí lze prohlásit za ukončený po 30 000 vteřinách pro první simulace a 48 000 vteřinách pro pozdější simulace. Transient-Thermal ovšem nevypočítá stav simulace po této době, ale počítá průběžné výsledky, které vynese do grafů a tabulek. Rovněž lze pustit video tohoto průběhu. Počet mezivýsledků záleží na uživateli. Můžeme nechat automaticky vypočítat simulaci, s tím, že Transient-Thermal sám vyhodnotí důležité body. Výsledky tohoto průběhu byly ovšem z mého hlediska nedostačující a v mé práci je zadáno, že maximální doba mezi výsledky je 1500 vteřin, s tím, že na začátku simulace s rychle se měnící teplotou budou automaticky kratší doby mezi výsledky, s minimální hranicí 0,1s.

Následně je možno výpočet spustit. Délka simulace může dosahovat mnoha hodin. Záleží na počtu funkcí, které výpočet značně ztíží, a na citlivosti výpočtu.

Po prvotním výpočtu Transient-Thermal nevytvoří výsledky, neboť až po prvotním výpočtu lze zadat, jaké průběhy a veličiny program vypočte. V mém případě jsem zadal, aby byla vypočtena teplota jednotlivých částí transformátoru.

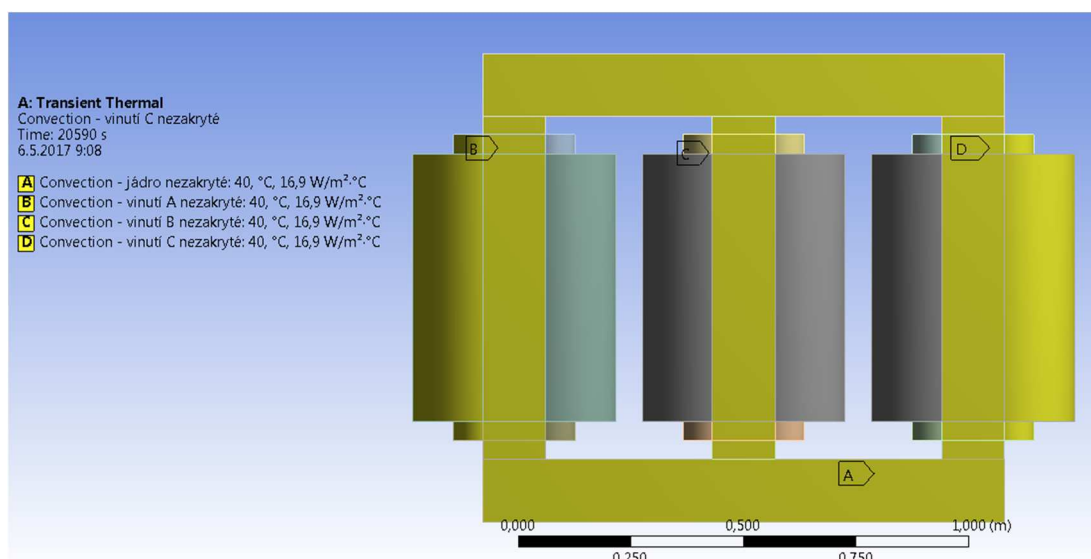
6.2.1 První simulace

Účinnost přestupu tepla v Transient-Thermal záleží na velikost součinitele přestupu tepla a na velikosti plochy, na které je zadaná konvekce. Jak bylo odvozeno v kapitole 3.3, pro prvotní výpočet byly zvoleny hodnoty součinitele podle tabulky 6.1:

Tabulka 6.1: Odhadnuté hodnoty součinitele přestupu

Zakrytí plochy stroje	α
Žádné	16,9
Částečné	13,5
Úplné	10

Na obrázku 6.4 jsou vidět zadané hodnoty konvekce pro nezakryté části transformátoru. Pro částečně zakryté a zakryté části je vidět zadání konvekce na obrázcích 10.1 a 10.2 v příloze.

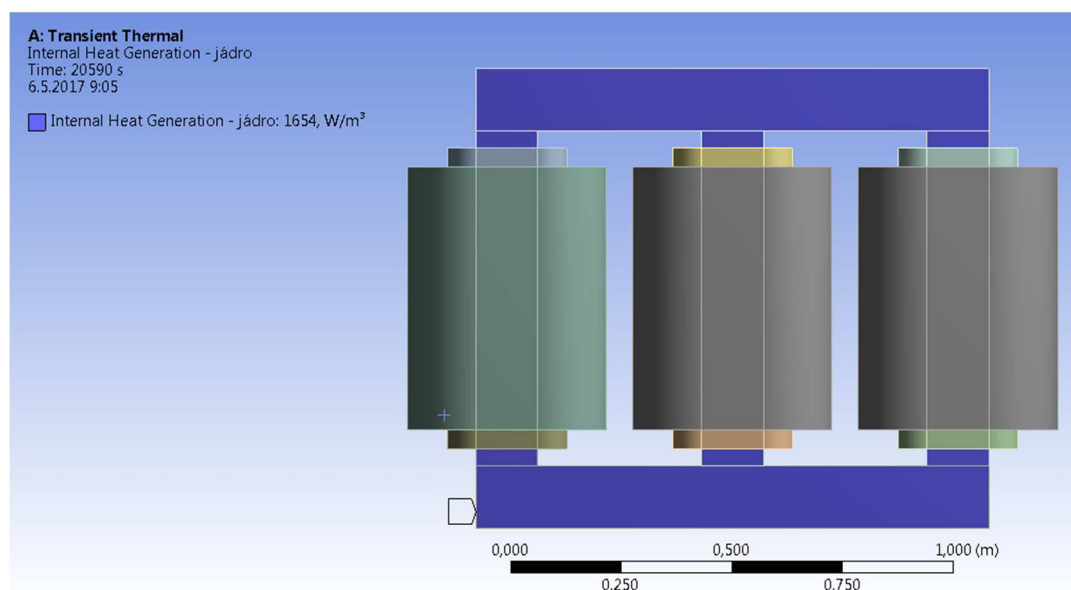


Obrázek 6.4: Konvekce na nezakrytých plochách – varianta 1.1

Na obrázku 6.5 je vidět zadání hodnot měrných ztrát v magnetickém obvodu. Na obrázcích 10.3 a 10.4 v příloze je znázorněno zadání měrných ztrát ve vinutích vysokého napětí a nízkého napětí. Zadané ztráty jsou vyneseny v tabulce 6.2.

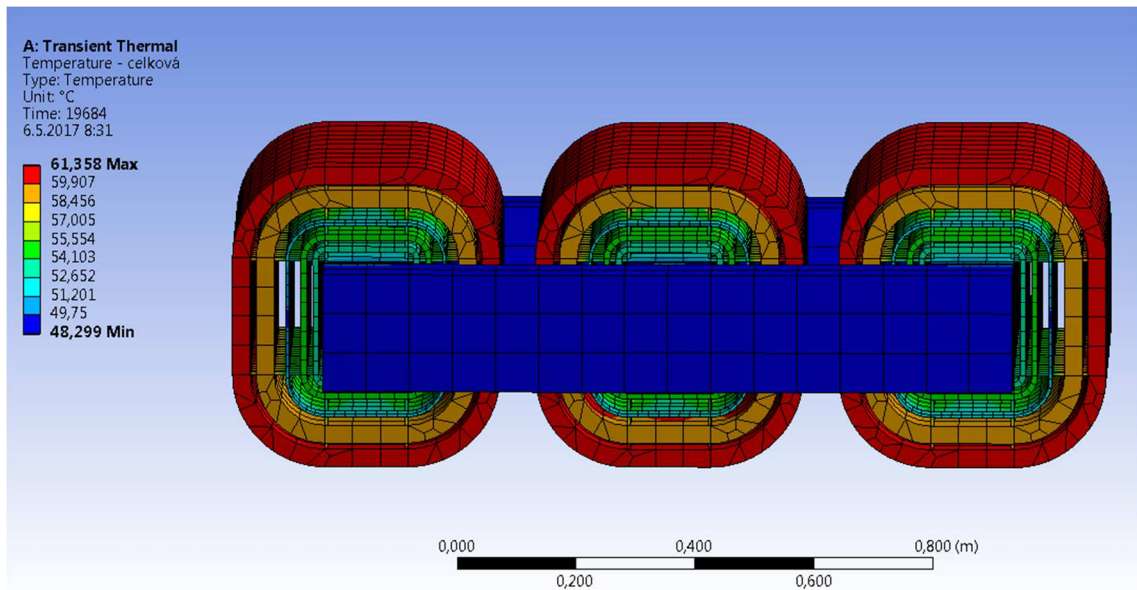
Tabulka 6.2: Měrné ztráty v transformátoru – varianta 1.1

	Vinutí nn ₁	Vinutí nn ₂	Vinutí vn ₁	Vinutí vn ₂	Jádro
W	544,39	632,75	1615,54	1925,89	213,04
mm ³	13 936 471	16 198 418	70 060 366	83 518 905	128 800 000
m ³	0,0139	0,0161	0,07006	0,0835	0,1288
W/m ³	39 062,47	39 062,45	23 059,32	23 059,36	1 654,07



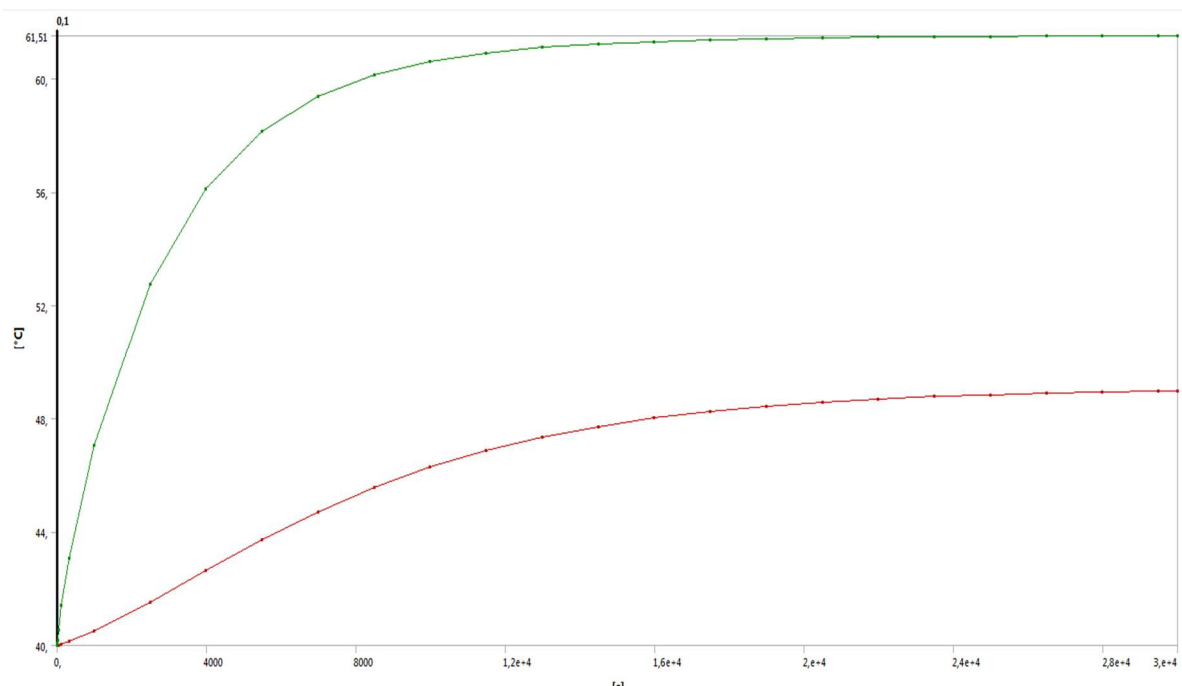
Obrázek 6.5: Internal heat generation v magnetickém obvodu – varianta 1.1

Výsledek simulace oteplení transformátoru je na obrázku 6.6, 6.8 a 6.9 a dále na obrázcích 10.5, 10.6, 10.7 v příloze. Z výsledků je patrné, že největší oteplení nastává na vinutí vysokého napětí a to na vnějším, kde teplota dosáhla 61,3 °C. Naopak nejmenší oteplení nastalo na magnetickém obvodu – mimo oblast zakrytou vinutím. To je zapříčiněno menšími ztrátami v magnetickém obvodu a větší plochou pro odvod tepla. Zde dosáhla teplota po 30 000 vteřinách simulace minimální hodnoty 48,2 °C.



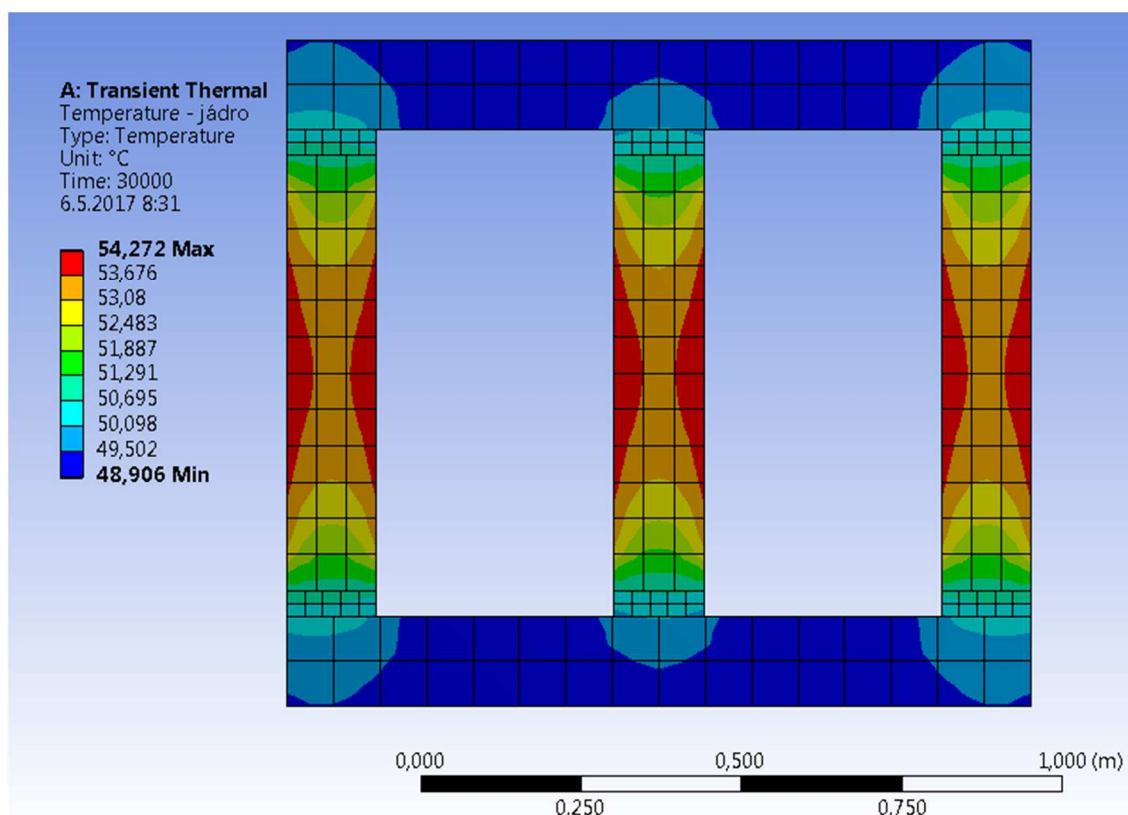
Obrázek 6.6: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.1

Průběh nárůstu teploty po dobu 30 000 vteřin v nejteplejším (zelený průběh) a nejchladnějším (červený průběh) místě transformátoru je znázorněn na obrázku 6.7.

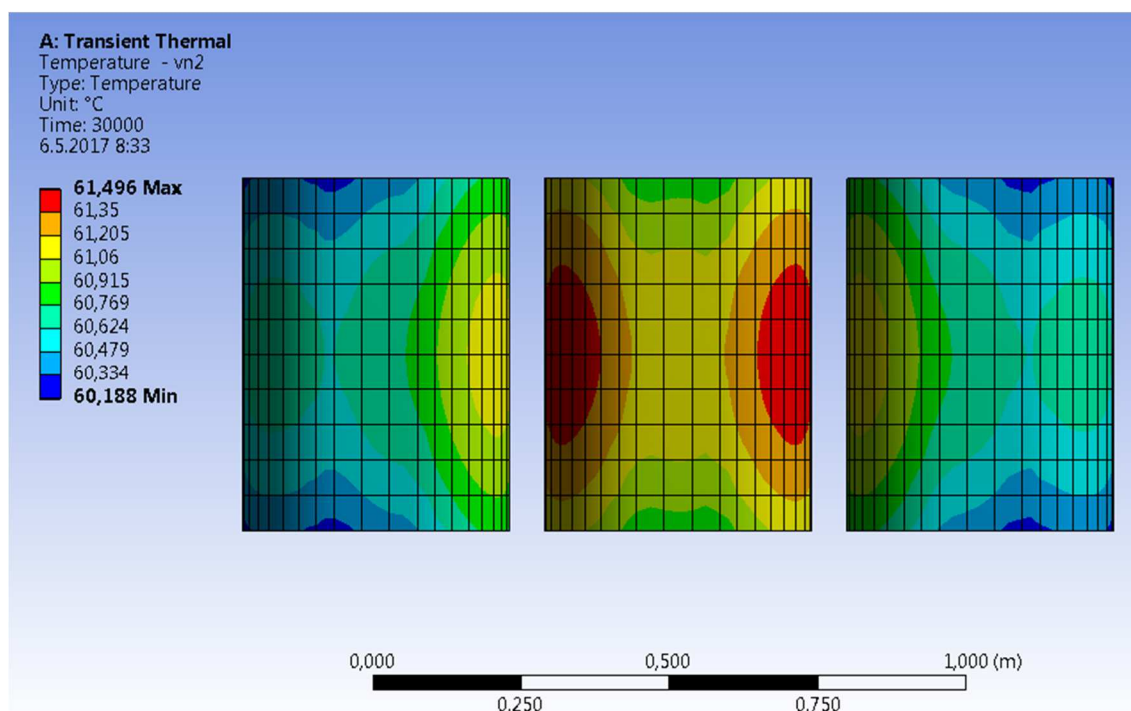


Obrázek 6.7: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.1

Rozložení teploty na konci simulace na nejteplejší části transformátoru a na nejstudenější části transformátoru je vidět na obrázcích 6.8 a 6.9



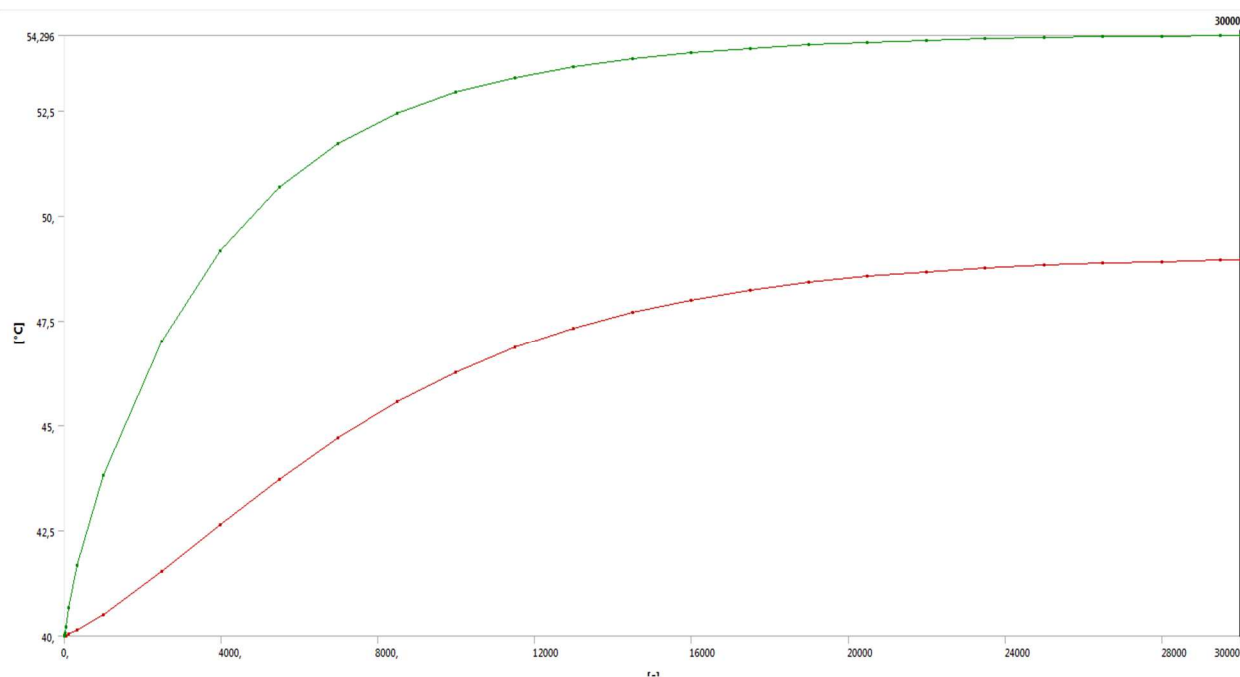
Obrázek 6.8: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.1



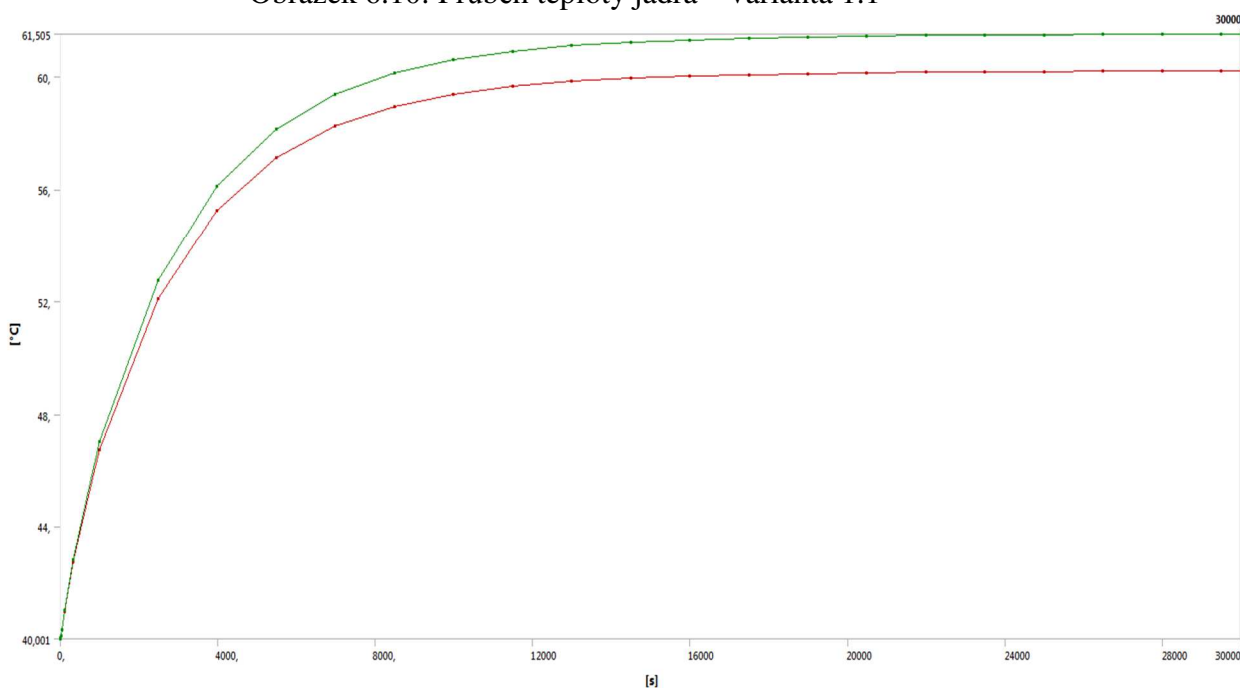
Obrázek 6.9: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.1

Jak je vidět z obrázku 6.8, nejstudenější místo je na spojce sloupců. Nejteplejší místo je oproti tomu na sloupcích v místech zakrytí vinutím. Na vinutí vysokého napětí je patrné, že nejteplejší bod se nachází na prostředním sloupcu vinutí vysokého napětí, protože je zde zhoršená efektivita předání tepla.

Průběh teplot na magnetickém obvodu a vinutí vysokého napětí je znázorněn na obrázcích 6.10 a 6.11.



Obrázek 6.10: Průběh teploty jádra – varianta 1.1



Obrázek 6.11: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 1.1

Z průběhu křivek na obrázku 6.10 je vidět výrazný rozdíl mezi minimální a maximální teplotou magnetického obvodu oproti vinutí vysokého napětí na obrázku 6.11. To je způsobeno tím, že magnetický obvod má nerovnoměrné hodnoty konvekce po svém obsahu, a tak v místech překrytí vinutím dochází k výraznému nárůstu teploty během celé simulace.

Hodnoty maximálních a minimálních teplot pro všechny části transformátoru jsou vyneseny v tabulce 6.1. V tabulce je i výpočet maximálního oteplení pro jednotlivé části transformátoru. Počáteční teplota pro výpočet oteplení byla 40 °C.

Tabulka 6.3: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.1

	min. teplota [°C]	max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	48,9	54,2	14,2
Nn ₁	53,7	54,9	14,9
Nn ₂	54,3	55,4	15,4
Vn ₁	59,1	60,5	20,5
Vn ₂	60,1	61,5	21,5

Z výsledných hodnot je patrné, že výsledné oteplení neodpovídá mnou vypočteným hodnotám oteplení, které byly vypočítány v elektromagnetickém návrhu. Pro následující simulace bylo tedy zapotřebí udělat opatření, která by napomohla při korekci hodnot, které vyšly z první simulace v Transient-Thermal.

6.2.2 Druhá simulace

První úvaha o věrohodnosti výsledků padla na elektromagnetický návrh, konkrétně vinutí. Z návrhu, který byl proveden v kapitole 4, vychází rozměry vinutí, chladících kanálků a výška vinutí. Následně byly navrženy rozměry jednotlivých cívek vinutí. Tímto způsobem ovšem nebyl dodržen poměr mezi plochou navrženého vinutí a plochou navržených cívek. Celkový objem vinutí není totožný s celkovým objemem navržených cívek, který byl menší. Celkové oteplení simulace v Transient-Thermal ovšem počítá s měrnými ztrátami vztaženými na objem vypočtený z modelu v AutoCADu. Ten byl sestaven podle návrhu celkového vinutí a tak teplota v Transient-Thermal vychází menší, než by měla. Bylo tedy zapotřebí provést korekci výpočtu měrných ztrát za pomoci činitele plnění.

Tabulka 6.4: Vypočtené hodnoty součinitele přestupu – varianta 1.2

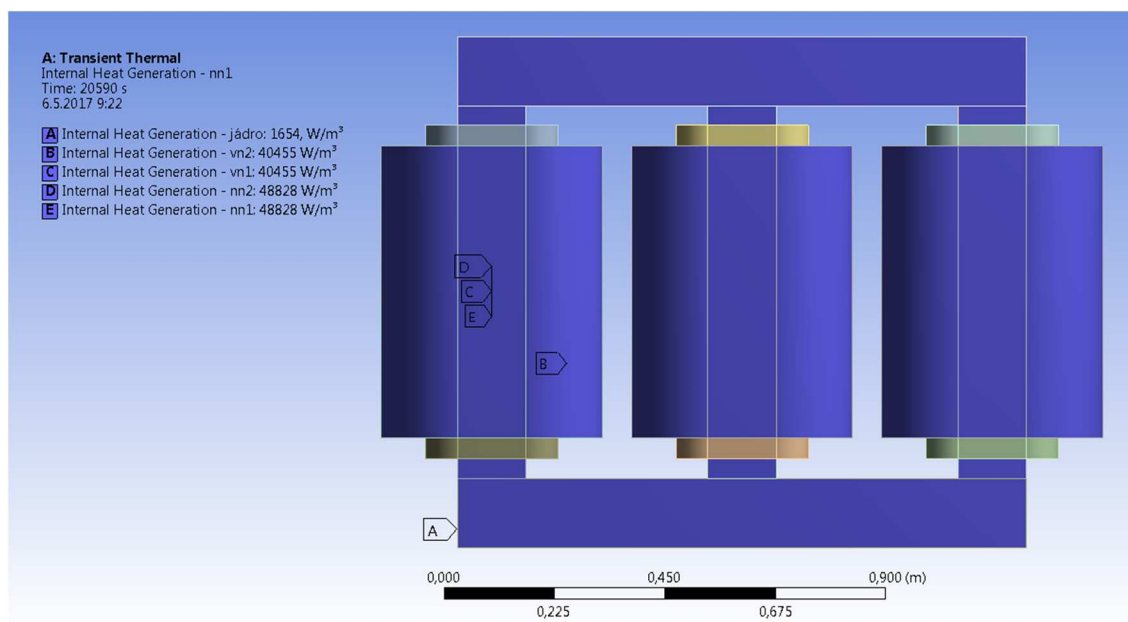
	Nn ₁	Nn ₂	Vn ₁	Vn ₂
Plocha vinutí	6000	6000	17850	17850
Plocha Al	4800	4800	10200	10200
Činitel plnění	0,8	0,8	0,57	0,57

Díky znalosti činitele plnění bylo možno dopočítat upravené ztráty pro vinutí vysokého a nízkého napětí. Výpočet je znázorněn v tabulce 6.5.

Tabulka 6.5: Výpočet ztrát s činitelem plnění – varianta 1.2

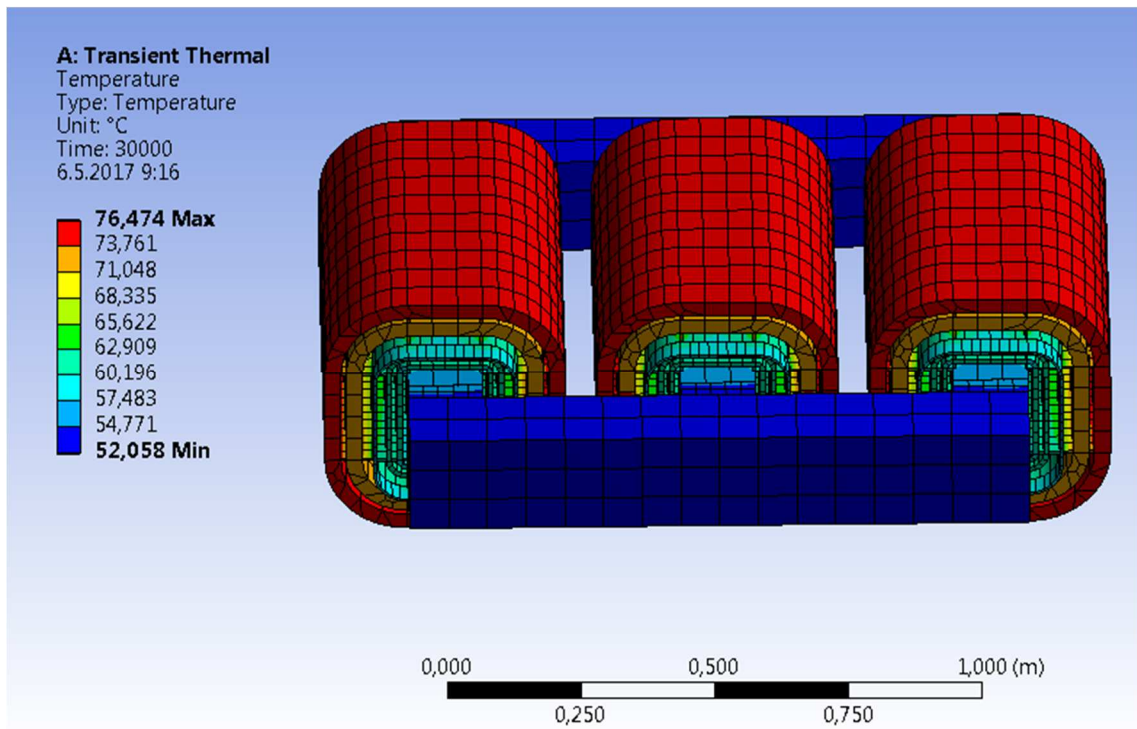
	Vinutí nn ₁	Vinutí nn ₂	Vinutí vn ₁	Vinutí vn ₂	Jádro
W	544,39	632,75	1 615,54	1 925,89	213,04
mm ³	13 936 471	16 198 418	70 060 366	83 518 905	128 800 000
m ³	0,0139	0,0161	0,07006	0,0835	0,1288
W/m ³	39 062,47	39 062,45	23 059,32	23 059,36	16 54,07
Činitel plnění	0,8	0,8	0,571	0,571	1
m ³ po přepočtu	0,0111	0,01294	0,0399	0,0476	0,1288
W/m ³	48 828	48 828	40 454,9	40 455,0	1 654,03

Tyto hodnoty měrných ztrát byly zadány do softwaru Transient-Thermal stejně jako u první simulace. Zadané ztráty pro všechny části transformátoru jsou vidět na obrázku 6.12.

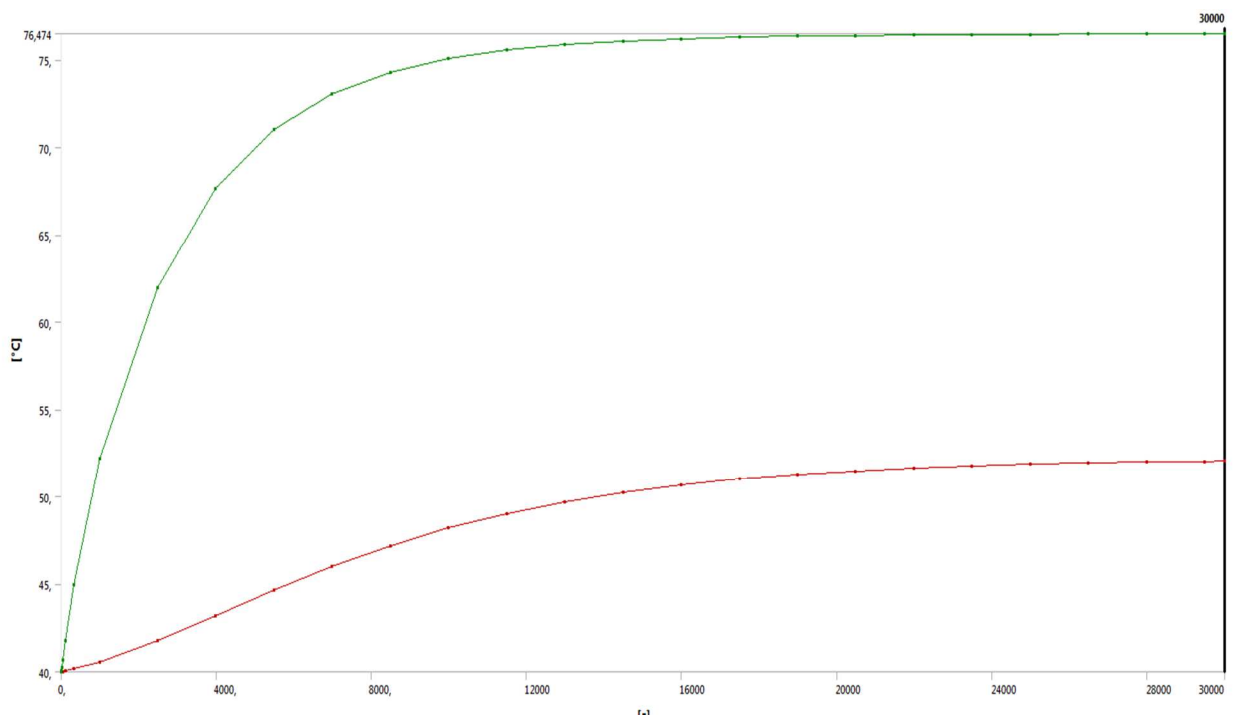


Obrázek 6.12: Internal heat generation v transformátoru – varianta 1.2

Výsledky druhé simulace jsou znázorněny na obrázku 6.13 a na obrázcích 10.11–10.15 v příloze. Průběh minimální a maximální teploty během celé simulace zachycuje graf na obrázku 6.14. a grafy na obrázcích 10.16–10.20 v příloze.



Obrázek 6.13: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.2



Obrázek 6.14: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.2

Je patrné, že oproti první simulaci došlo k nárůstu teploty na všech částech transformátoru. Hodnoty minimálních a maximálních teplot na jednotlivých částech transformátoru znázorňuje tabulka 6.6. Oteplení se opět vypočítalo z počáteční teploty 40°C.

Tabulka 6.6: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.2

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	52	60,8	20,8
Nn ₁	59,9	61,7	21,7
Nn ₂	61,3	63	23
Vn ₁	72	74,5	34,5
Vn ₂	74,2	76,4	36,4

Výsledky této simulace dopadly lépe. Z porovnání výsledků oteplení první a druhé simulace je patrné, že se oteplení zvýšilo přímo úměrně zvýšením ztrát pomocí činitele plnění.

Je ovšem patrné, že se hodnoty oteplení stále nepřibližují vypočteným hodnotám z elektromagnetického návrhu a je proto potřeba provést další korekci výpočtu.

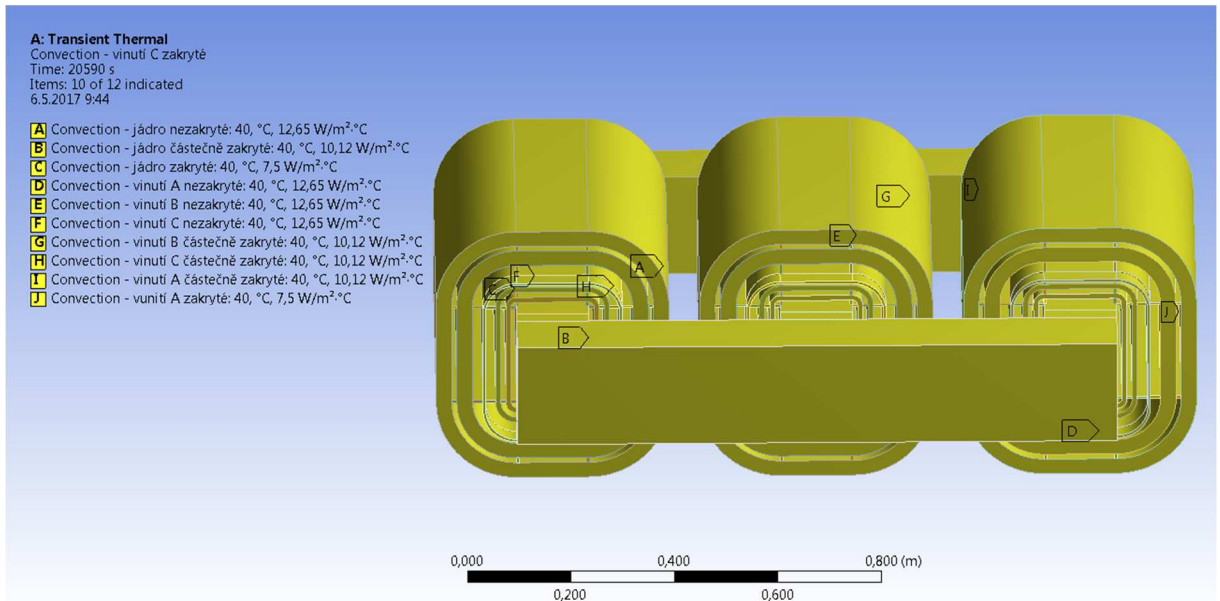
6.2.3 Třetí simulace

Další úvaha o úpravě výpočtu spočívá v přizpůsobení simulace reálným podmínkám. Je patrné, že zvolené činitele přestupu jsou počítány v ideálním stavu. Konvekce v simulaci zahrnuje plochy, které jsou stíněné například lištami nebo jinými konstrukcemi. Je tedy nutno upravit hodnoty součinitele přestupu. Pro upravení jsem použil koeficientu zakrytí o hodnotě 0,75. Přepočet znázorňuje tabulka 6.7.

Tabulka 6.7: Úprava součinitelů přestupu – varianta 1.3

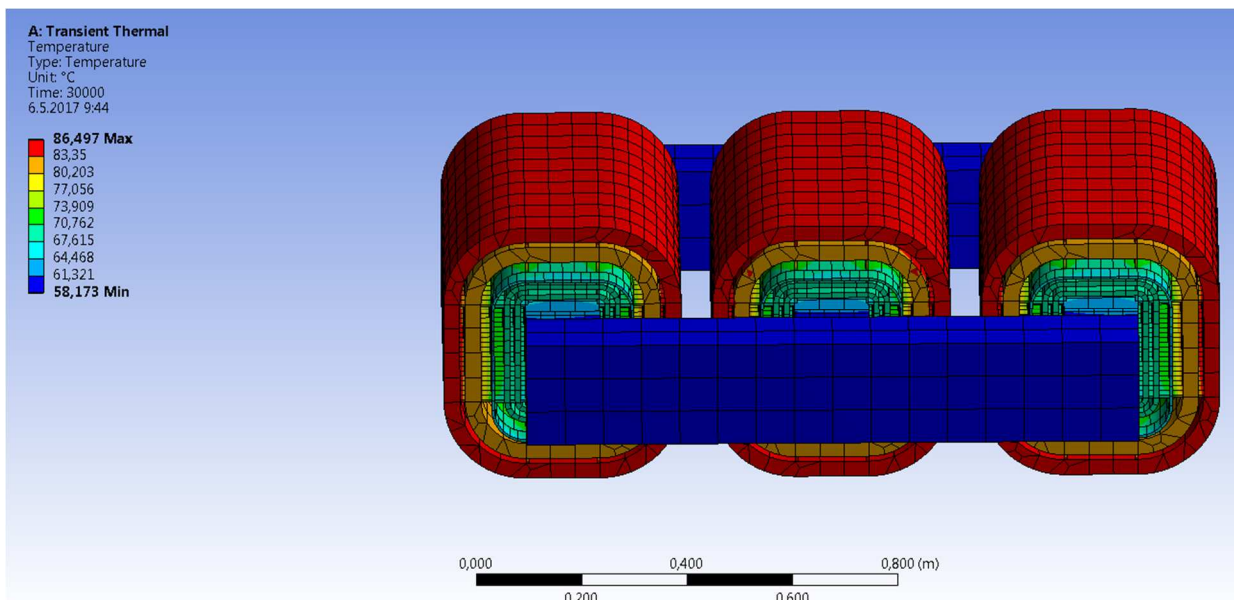
	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67

Stejně jako u první simulace se provede návrh transformátoru v Transient-Thermal. Tentokrát ovšem s upravenou konvekcí o součinitele přestupu tepla se zachováním generací tepla z druhé simulace. Zadané hodnoty konvekce jsou vidět na obrázku 6.15.

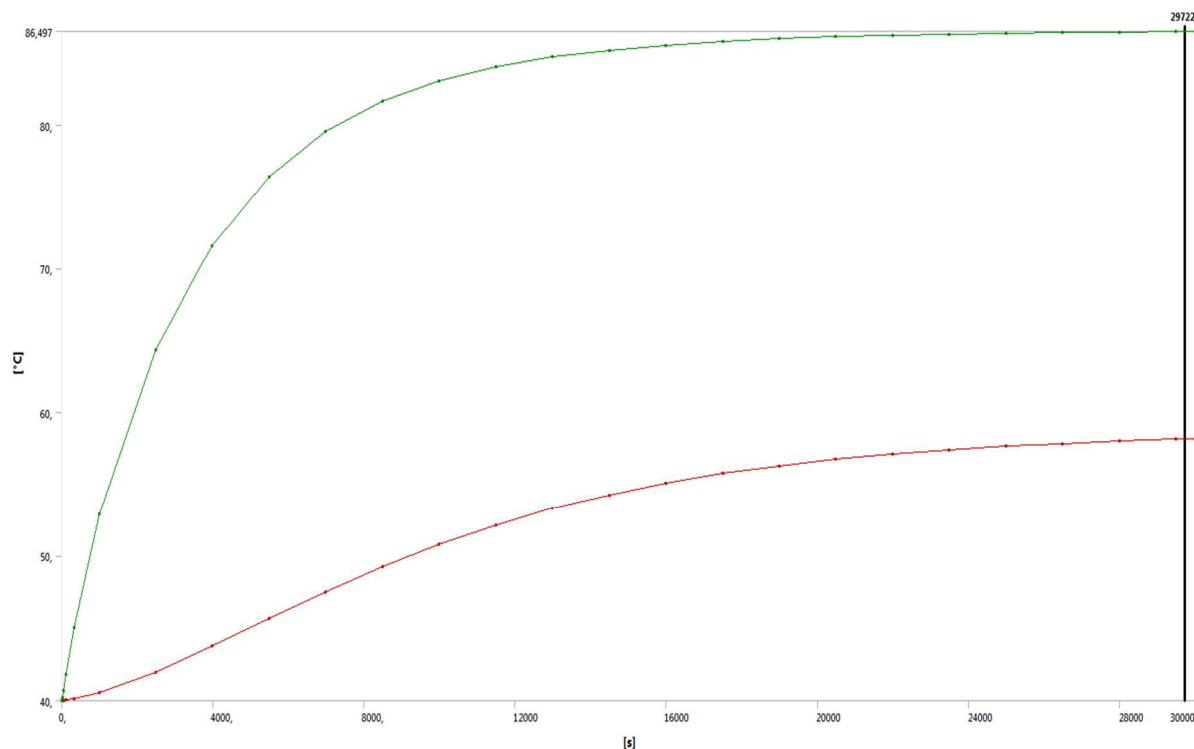


Obrázek 6.15: Konvekce – varianta 1.3

Simulace chodu transformátoru byla provedena po dobu 30 000 vteřin. Výsledná teplota celého systému na konci simulace je vidět na obrázku 6.16. a 10.21–10.25 v příloze. Průběh maximální a minimální teploty celého systému je znázorněn na grafu na obrázku 6.17 a 10.26–10.30 v příloze.



Obrázek 6.16: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.3



Obrázek 6.17: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.3

Podobně jako u druhé simulace, i zde došlo k nárůstu teploty ve výsledcích simulace. Hodnoty minimálních a maximálních teplot na jednotlivých částech transformátoru znázorňuje tabulka 6.8. Oteplení se vypočítalo z počáteční teploty 40 °C.

Tabulka 6.8: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.3

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	58,1	68,7	28,7
Nn ₁	67,7	69,8	29,8
Nn ₂	69,4	71,3	31,3
Vn ₁	81,6	84,2	44,2
Vn ₂	84,1	86,4	46,4

Z výsledků vnesených v tabulce 6.8 je patrné, že opět došlo k zvýšení oteplení všech částí transformátoru. Z porovnání výsledků oteplení druhé a třetí simulace je patrné, že se oteplení zvýšilo bezmála nepřímě úměrně ke snížení součinitele přestupu tepla.

6.2.4 Čtvrtá simulace

Poslední korekce výsledků spočívá v upřesnění výpočtu součinitele přestupu podle (21) a (22). Prvotní výpočet byl proveden pro oteplení 70 °C. Z výsledků třetí

simulace, která se nejvíc přibližuje reálným hodnotám je patrné, že byla zvolená hodnota oteplení moc vysoká. Protože součinitel přestupu tepla je podle Lorenzova vztahu (32) závislý na velikosti oteplení, dojde snížením velikosti oteplení ke zmenšení jeho velikosti a zvýšení oteplení transformátoru čtvrté simulace.

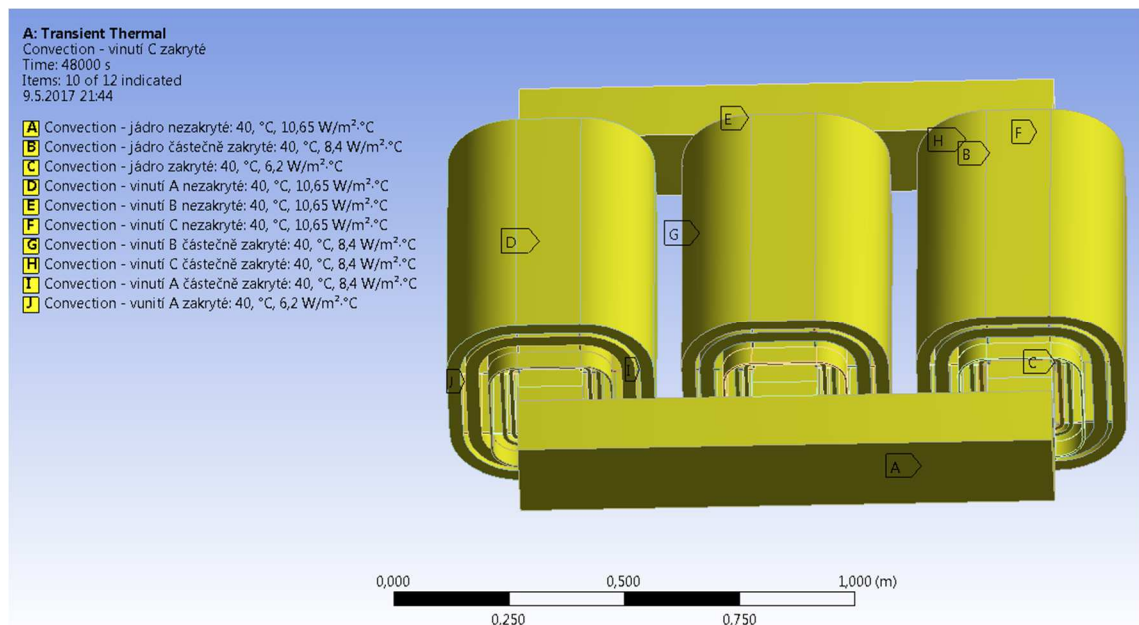
$$\alpha_{vp} = 0,548 \sqrt[4]{\frac{g * c * \beta * \lambda^3 * \Delta\vartheta}{\nu * h}} \quad (32)$$

Upřesní se tedy výpočet součinitele přestupu tepla za pomoci oteplení, které je vyneseno v tabulce 6.8. Přepočtení součinitele je vyneseno v tabulce 6.9.

Tabulka 6.9: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 1.4

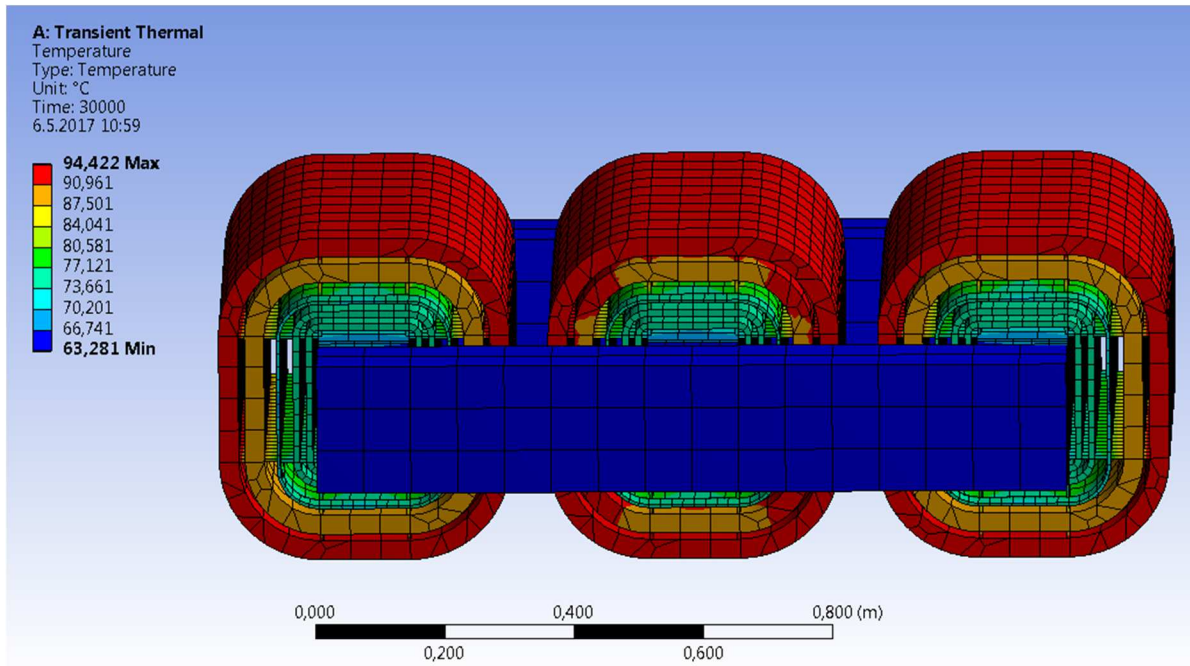
	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67
Upravený α	6,225	8,4	14,2

Dále se provede upravení hodnot konvekce jako při výpočtu třetí simulace. Nové hodnoty konvekce jednotlivých částí transformátoru jsou vidět na obrázku 6.18.

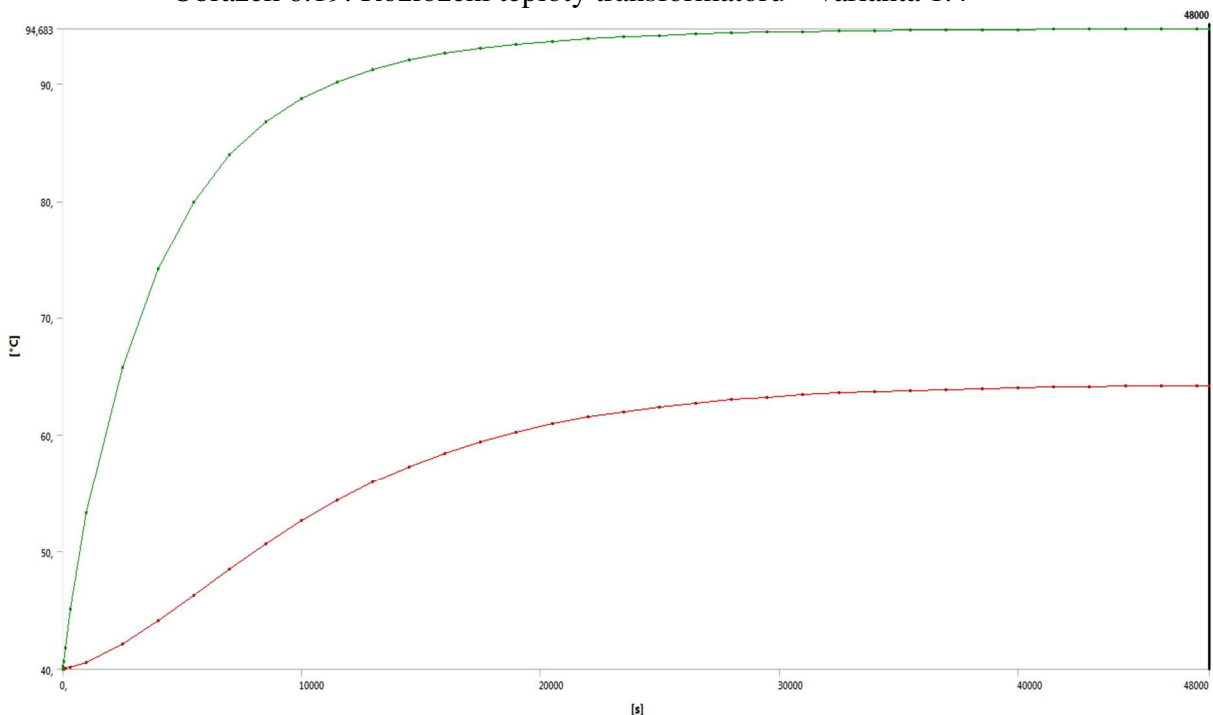


Obrázek 6.18: Konvekce – varianta 1.4

Výsledné teploty celého systému jsou graficky vyneseny na obrázku 6.19 a průběh minimální a maximální teploty celého systému je vyneseno na obrázku 6.20.



Obrázek 6.19: Rozložení teploty transformátoru – varianta 1.4



Obrázek 6.20: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 1.4

Z Výsledků je vidět, že čím větší je oteplení, tím delší je doba ustálení teploty. Bylo proto potřeba upravit délku výpočtu z 30 000 vteřin na 48 000 vteřin. Nejteplejší bod transformátoru se nacházel na vinutí vysokého napětí (92 °C), zatímco bod nejnižší teploty (64 °C) se nachází na magnetickém obvodu mimo zakrytí vinutím. Grafické znázornění teploty jednotlivých částí transformátoru je možno vidět na obrázcích

10.31–10.35 v příloze. Průběh teploty jednotlivých částí transformátoru je vyneseno na obrázcích 10.36–10.40 v příloze.

Průběh výsledného oteplení s výpočtem při počáteční teplotě 40 °C je vyneseno v tabulce 6.10.

Tabulka 6.10: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 1.4

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	64,1	75,7	35,7
Nn ₁	74,5	76,9	36,9
Nn ₂	76,3	78,5	38,5
Vn ₁	89,4	92,2	52,2
Vn ₂	92,0	94,6	54,6

6.2.5 Analýza dat prvního modelu

Simulace oteplení transformátoru s rozděleným vinutí vysokého i nízkého napětí byla provedena pro čtyři různé varianty této simulace. Rozdíl jednotlivých simulací spočíval v úpravě parametrů transformátorů, které mají vliv na oteplení tak, aby se jejich hodnoty podobaly co nejvíc realitě. Výsledné hodnoty oteplení jednotlivých částí transformátoru jsou vidět v tabulce 6.11.

Tabulka 6.11: Výsledné hodnoty první varianty

	První simulace	Druhá simulace	Třetí simulace	Čtvrtá simulace
	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	14,2	20,8	28,7	35,7
Nn ₁	14,9	21,7	29,8	36,9
Nn ₂	15,4	23	31,3	38,5
Vn ₁	20,5	34,5	44,2	52,2
Vn ₂	21,5	36,4	46,4	54,6

Z výsledků je vidět, že každá úprava měla velký vliv na oteplení transformátoru v ustáleném stavu. Úpravy simulací spočívaly ve změně měrných ztrát a změně součinitele přestupu tepla. Z výsledných tabulek každé simulace vyplývá, že oteplení narůstá nepřímo úměrně velikosti změny součinitele přestupu tepla a přímo úměrně velikosti měrných ztrát při daných podmínkách. Transformátor s bodem maximálního oteplení, který vyšel při čtvrté simulaci 54,6 °C, by podle normy ČSN EN 60076-11 měl izolaci realizovatelnou ve třídě A, viz. tabulka 10.7 v příloze.

Dosáhnutí takto nízkého oteplení bylo ovšem dosaženo tím, že se zvětšily chladicí plochy rozdělením vinutí vysokého a nízkého napětí. To znamená, že vzrostly náklady na výrobu transformátoru. Vzrostly náklady například na dodatečný materiál, jako jsou lišty mezi vinutími toho samého napětí. Dále vzrostly náklady na samotný proces výroby, protože přibyly kroky při montáži transformátoru. A především přibyly náklady na materiál, z kterého se transformátor skládá, protože s rozdělením vinutí a přidáním vzduchových kanálků vzroste objem následujících okruhů vinutí, a tím i celý magnetický obvod.

V následujících kapitolách bude tedy podroben simulaci oteplení transformátor s redukováným množstvím chladicích kanálků, který by byl ekonomicky přijatelnější, ovšem za cenu vyššího oteplení.

6.3 Transient-thermal – varianta 2 – rozdělené vinutí vysokého napětí na dvě vrstvy

Tato varianta je kompromis mezi první variantou, kde jsou rozdělena vinutí vysokého a nízkého napětí a třetí variantou, kde není rozdělené žádné vinutí. Rozděleno je vinutí vysokého napětí, protože z první simulace vyplývá, že se na něm vyskytuje vyšší teplota, než na vinutí nízkého napětí. V této variantě provedu pouze dvě simulace, protože použiji již zjištěné předpoklady o součiniteli plnění a koeficientu zakrytí.

6.3.1 První simulace

První simulace byla provedena pro odhadnuté oteplení 70 °C, stejně jako při prvních simulacích u varianty 1. Hodnoty měrných ztrát, součinitelů přestupu tepla a jejich přepočtů, jsou vyneseny v tabulkách 6.12 a 6.13.

Tabulka 6.12: Měrné ztráty transformátoru – varianta 2.1

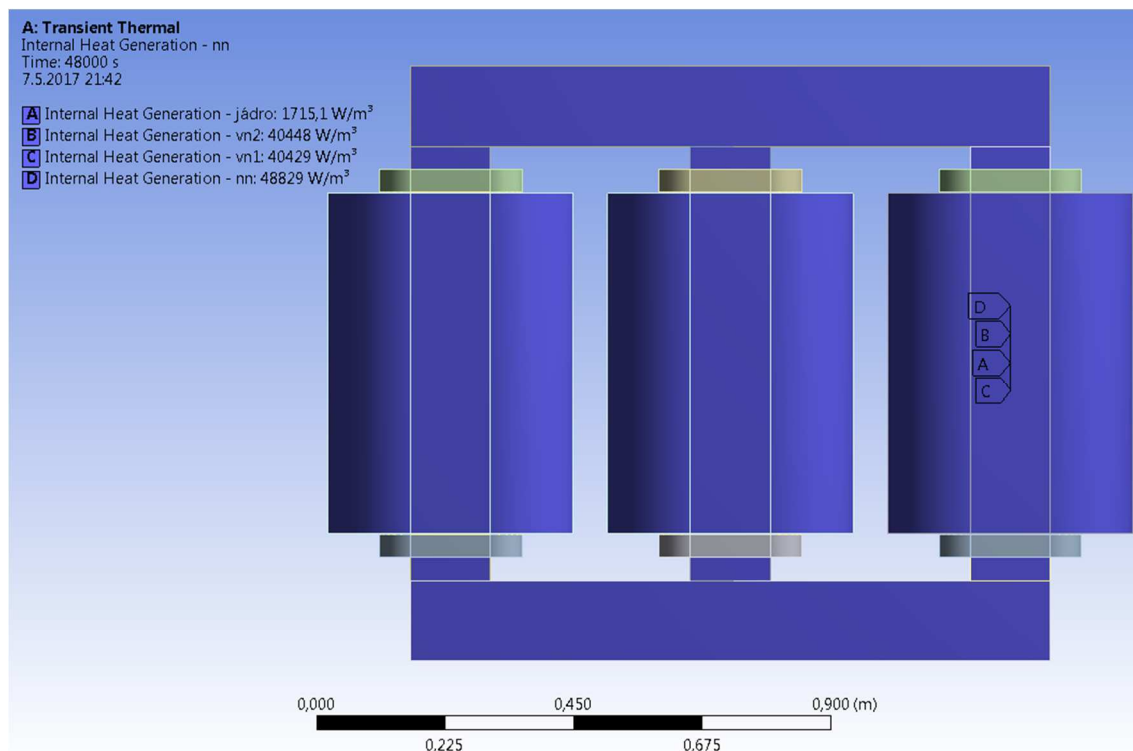
	Vinutí nn ₁	Vinutí nn ₂	Vinutí vn ₁	Vinutí vn ₂
W	1133	1537	1848	217
mm ³	29 003 916	66 695 731	80 154 270	126 500 005
m ³	0,029	0,0666	0,0801	0,125
W/m ³	39 063,6	23 044,9	23 055,5	1 715,4
Činitel plnění	0,8	0,57	0,57	1
m ³ po přepočtu	0,023	0,038	0,045	0,12
W/m ³	48 829,6	40 429,7	40 448,3	1 715,4

Tabulka 6.13: Součinitel přestupu tepla první simulace – varianta 2.1

	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67

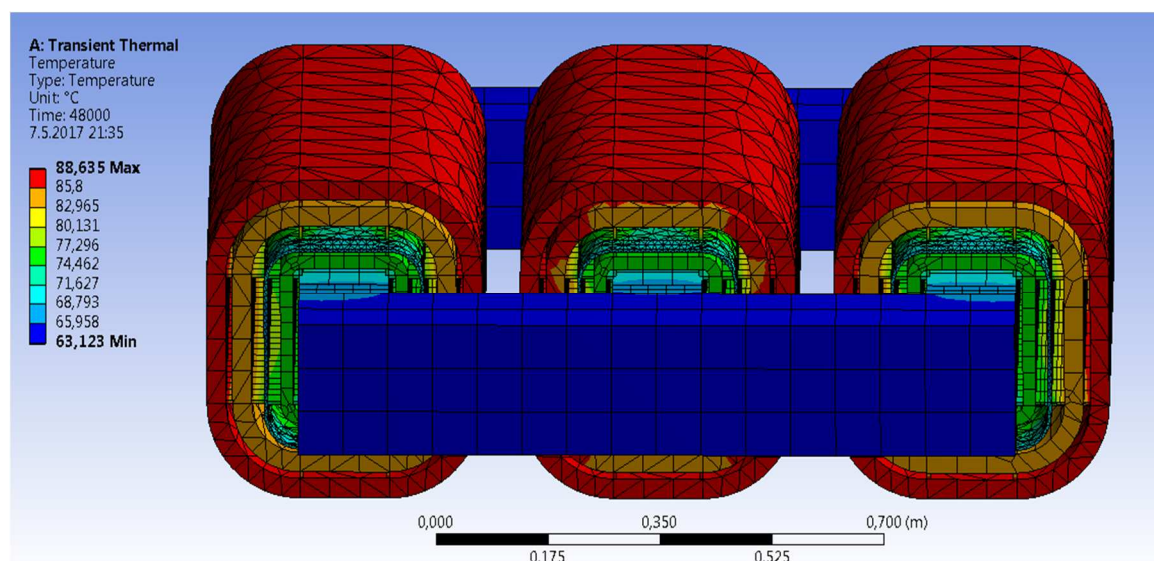
Velikost měrných ztrát jednotlivých částí neprošla velkou změnou, neboť měrné ztráty klesly pouze o množství materiálu, které se ušetřilo vynecháním kanálku u nízkého napětí. Velká změna nastala pouze u vinutí nízkého napětí, kde sloučením vinutí vzniklo jedno vinutí se zhruba stejnými ztrátami, jako mělo vinutí nízkého napětí v první variantě, ovšem s menší plochou pro odvod tepla.

Zadání hodnot měrných ztrát na modelu s rozděleným vinutím pouze vysokého napětí je vidět na obrázku 6.21.

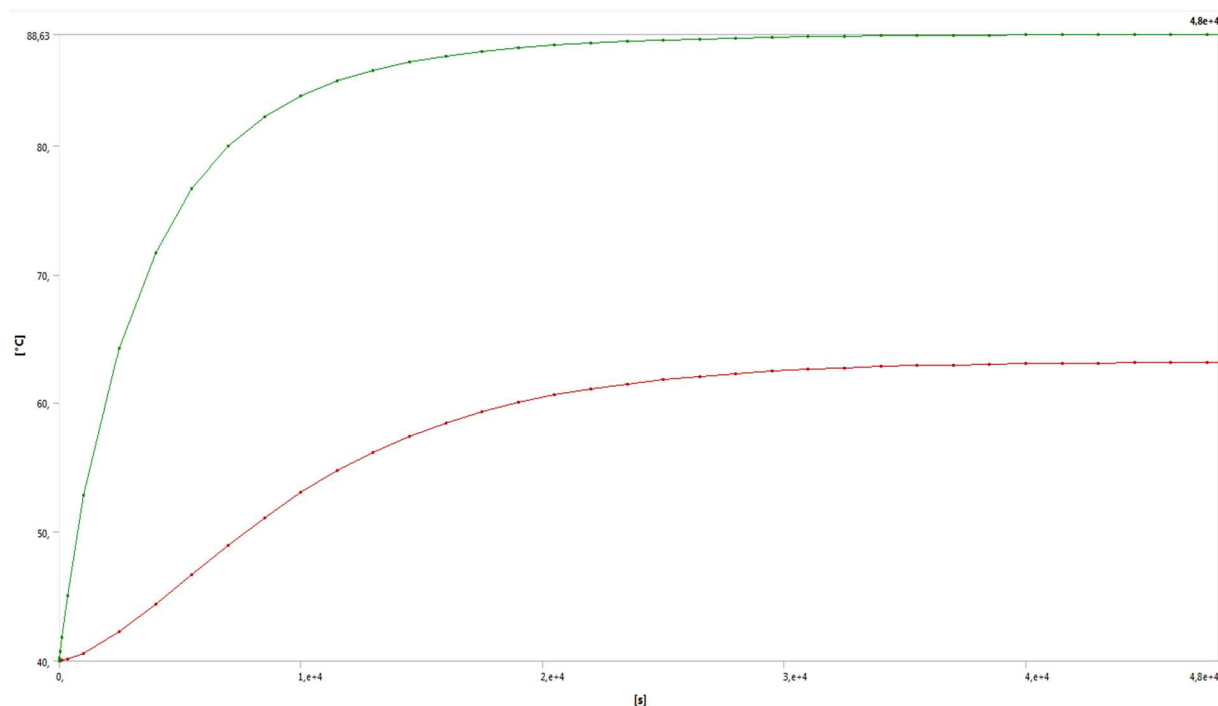


Obrázek 6.21: Internal heat generation v transformátoru – varianta 2.1

Grafické znázornění teploty na transformátoru po první simulaci, která trvala 48 000 vteřin, jsou vidět na obrázku 6.22 a na obrázcích 10.41–10.44 v příloze. Průběh maximální a minimální teploty transformátoru během simulace je vidět na grafu na obrázku 6.23 a na 10.45–10.48 v příloze.



Obrázek 6.22: Rozložení teploty transformátoru – varianta 2.1



Obrázek 6.23: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 2.1

Z výsledků je patrné, že změnou chladicího kanálku došlo k oteplení celého transformátoru oproti třetí simulaci první varianty. Hlavní změna nastala na vinutí nízkého napětí, kde nastalo oteplení o víc než 10 °C. Výsledné hodnoty minimálních a maximálních teplot a oteplení, které bylo vypočteno z počáteční teploty 40 °C první simulace, jsou vyneseny v tabulce 6.14.

Tabulka 6.14: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 2.1

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	63,1	76,2	36,2
Nn	75	77,8	37,8
Vn ₁	84,2	86,8	46,8
Vn ₂	86,2	88,6	48,6

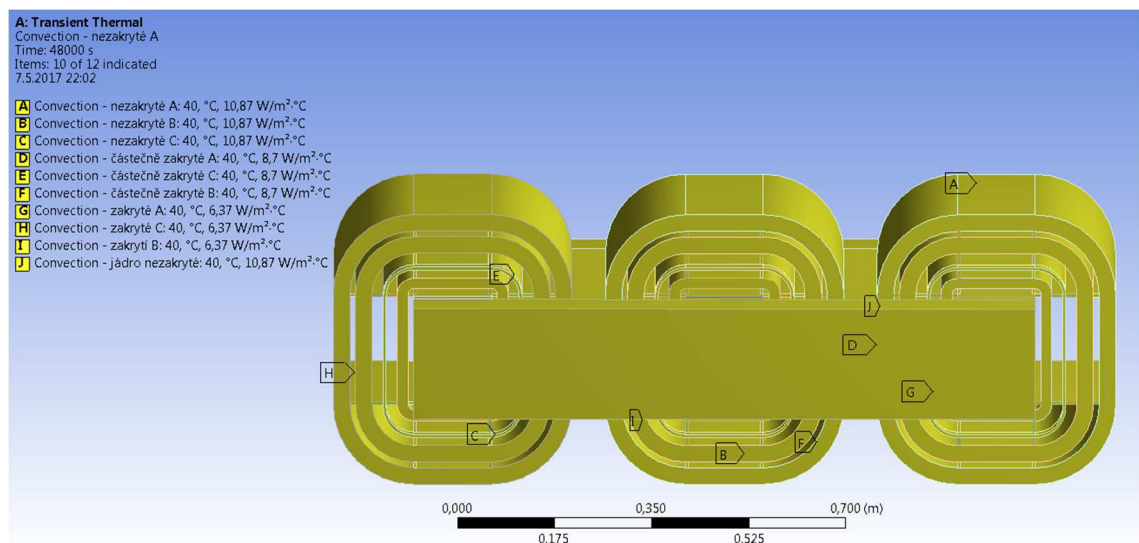
6.3.2 Druhá simulace

Z výsledných oteplení první simulace bylo možno stejně jako u varianty 1 dopočítat upravené hodnoty součinitele přestupu tepla. Tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 6.15.

Tabulka 6.15: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 2.2

	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67
Upravený α	6,37	8,7	10,87

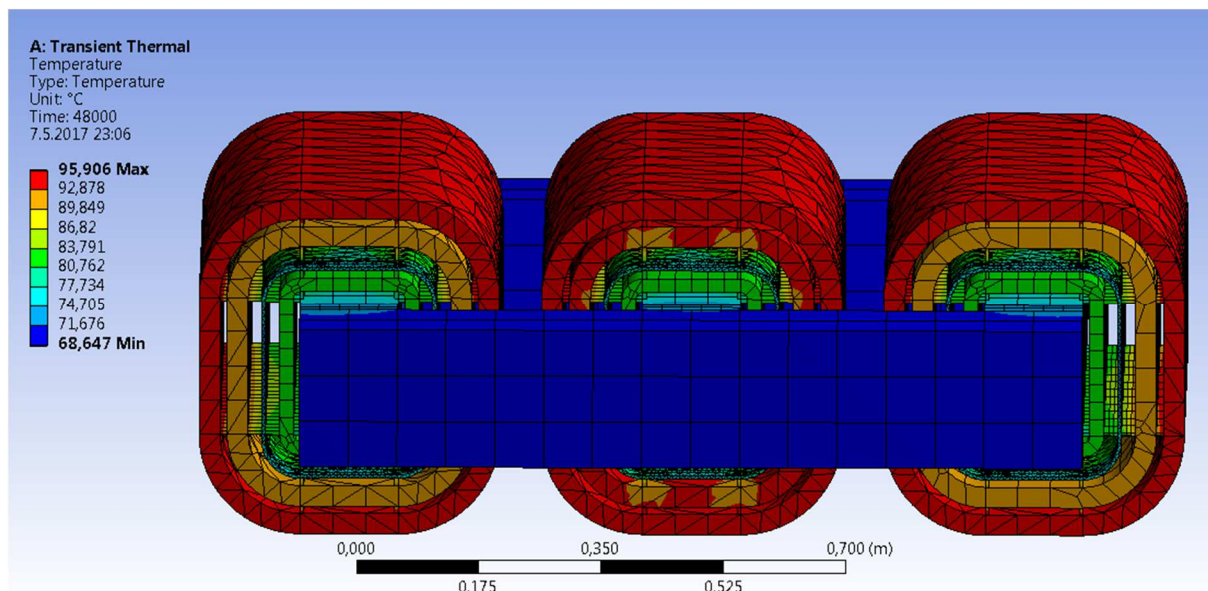
Na obrázku 6.24 je vidět zadání upravených hodnot součinitele přestupu tepla.



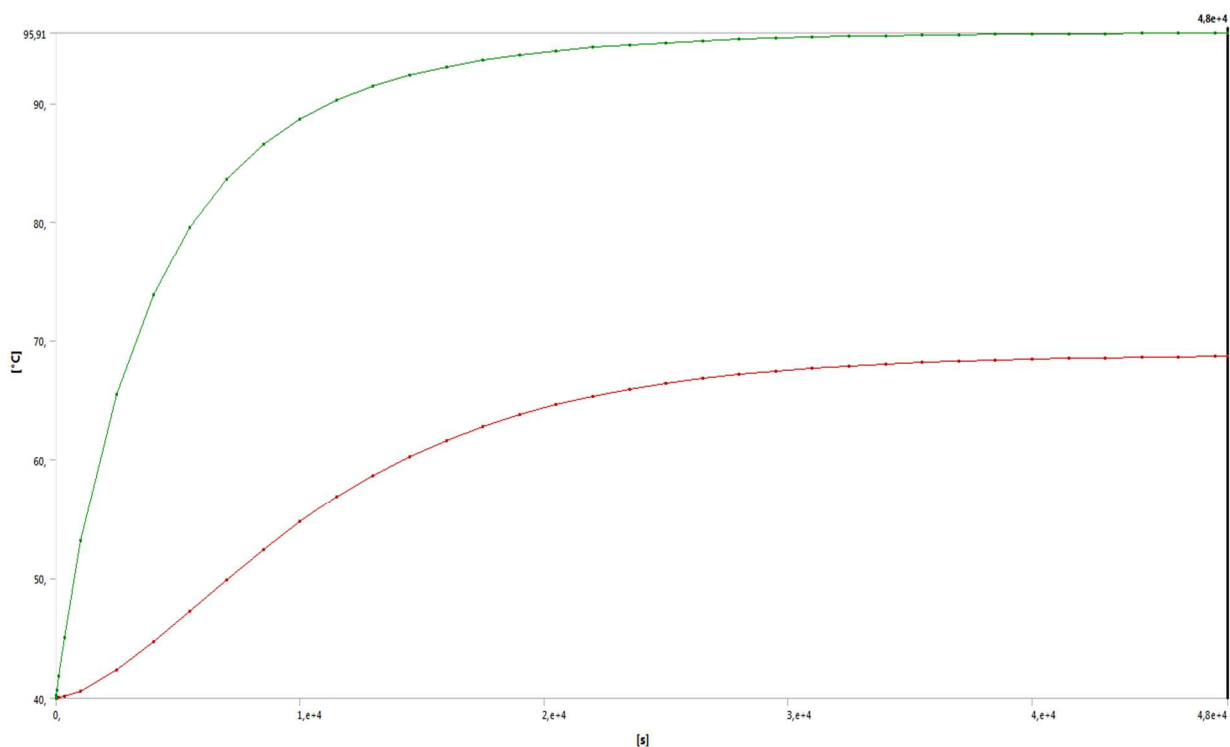
Obrázek 6.24: Konvekce – varianta 2.2

Je vidět, že hodnoty konvekce druhé simulace varianty s rozděleným pouze vinutím vyššího napětí jsou vyšší oproti čtvrté simulaci první varianty. Obě varianty prošly totožným přepočtem, ovšem podle vzorce pro konvekci (32) je patrné, že součinitel přestupu tepla je přímo úměrný hodnotě oteplení, a proto je rozdílná velikost konvekce u totožných výpočtů.

Výsledné hodnoty teploty transformátoru jsou vidět na obrázku 6.25 a 10.49–10.52 v příloze. Na obrázcích 6.27 jsou vidět průběhy teploty během celé simulace transformátoru a vinutí nízkého napětí a v 10.52–10.56 v příloze.



Obrázek 6.25: Rozložení teploty transformátoru – varianta 2.2



Obrázek 6.26: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 2.2

Hodnoty minimální teploty, maximální teploty a oteplení, které se vypočítalo z počáteční teploty 40 °C, jsou vyneseny v tabulce 6.16.

Tabulka 6.16: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 2.1

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	68,6	82,8	42,8
Nn	81,5	84,4	44
Vn ₁	91,3	94	54
Vn ₂	93,46	95,9	55,9

6.3.3 Analýza dat druhého modelu

Cílem druhé simulace bylo zjištění změny oteplení transformátoru při odstranění vzduchového kanálku mezi vinutím nízkého napětí. Touto změnou by se docílilo ekonomických i materiálových úspor při výrobě transformátoru, ovšem za cenu zhoršeného odvodu tepla.

Výsledné hodnoty oteplení pro čtvrtou simulaci varianty transformátoru s rozděleným vinutím nízkého napětí a pro druhou simulaci varianty bez rozděleného vinutí nízkého napětí, jsou vidět v tabulce 6.17.

Tabulka 6.17: Výsledné hodnoty první a druhé varianty

	V.1 čtvrtá simulace	V.2 druhá simulace
	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	35,7	42,8
Nn ₁	36,9	44,5
Nn ₂	38,5	
Vn ₁	52,2	54
Vn ₂	54,6	55,9

Jak vyplývá z normy ČSN EN 60076-11, viz. tabulka 10.7 v příloze, transformátor s těmito hodnotami oteplení by měl izolaci realizovatelnou ve třídě A.

6.4 Transient-thermal – varianta 3 – vinutí vysokého napětí a vinutí nízkého napětí v jedné vrstvě

Poslední varianta, kterou podrobím simulaci v softwaru Transient-Thermal, je s jedním vinutím vysokého a nízkého napětí.

Tato varianta je ekonomicky ze všech tří variant nejvýhodnější, ovšem dojde k vyššímu zahřátí především vinutí vysokého napětí, na kterém, jak vyplývá ze simulací variant jedna a dvě, se už bez této úpravy nachází hot-spot transformátoru, neboli

nejteplejší místo celého transformátoru, podle kterého se řadí izolace transformátoru do příslušných kategorií podle norem.

6.4.1 První simulace

Totožně s variantou s rozděleným pouze vinutím vysokého napětí se provedou dvě simulace. První simulace spočívá v ověření oteplení s vypočteným koeficientem přestupu tepla při oteplení 70 °C. Parametry transformátoru v tomto provedení jsou vyneseny v tabulce 6.18 a 6.19.

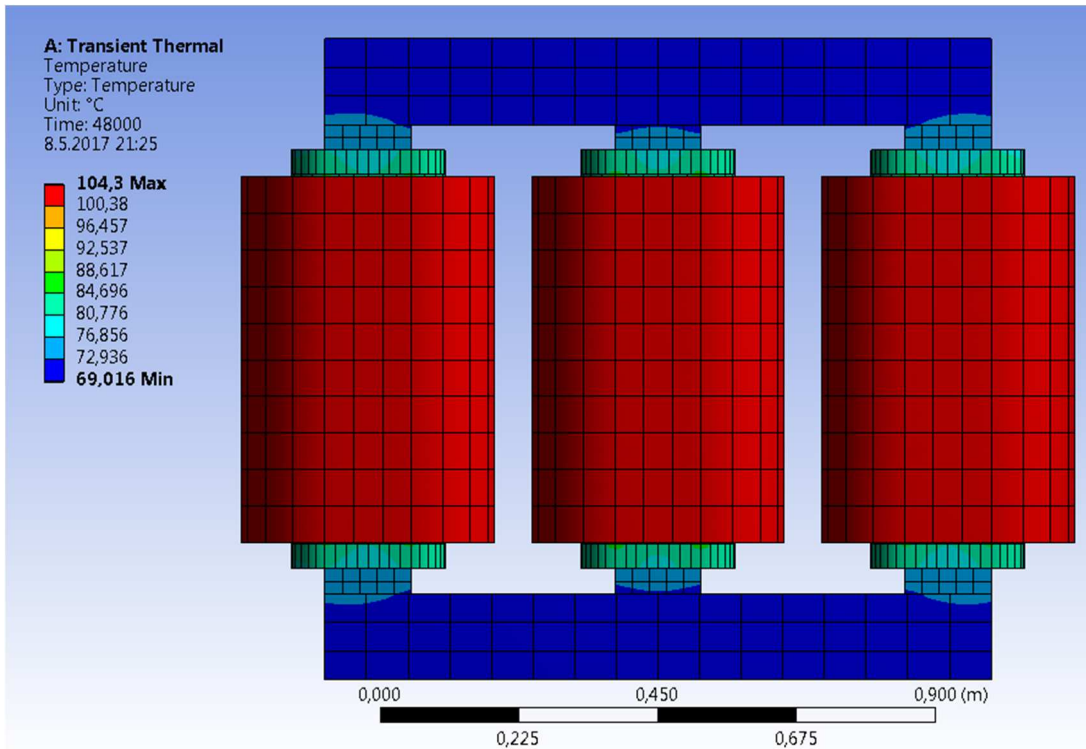
Tabulka 6.18: Měrné ztráty transformátoru – varianta 3.1

	Vinutí nn ₁	Vinutí nn	Vinutí vn
W	1 133	3 307	222
mm ³	29 003 916	143 485 482	124 320 000
m ³	0,029	0,143	0,124
W/m ³	39 063,6	23 047,6	1 785,7
Činitel plnění	0,8	0,57	1
m ³ po přepočtu	0,0232	0,0817	0,1243
W/m ³	48 829,6	40 434,4	1 785,7

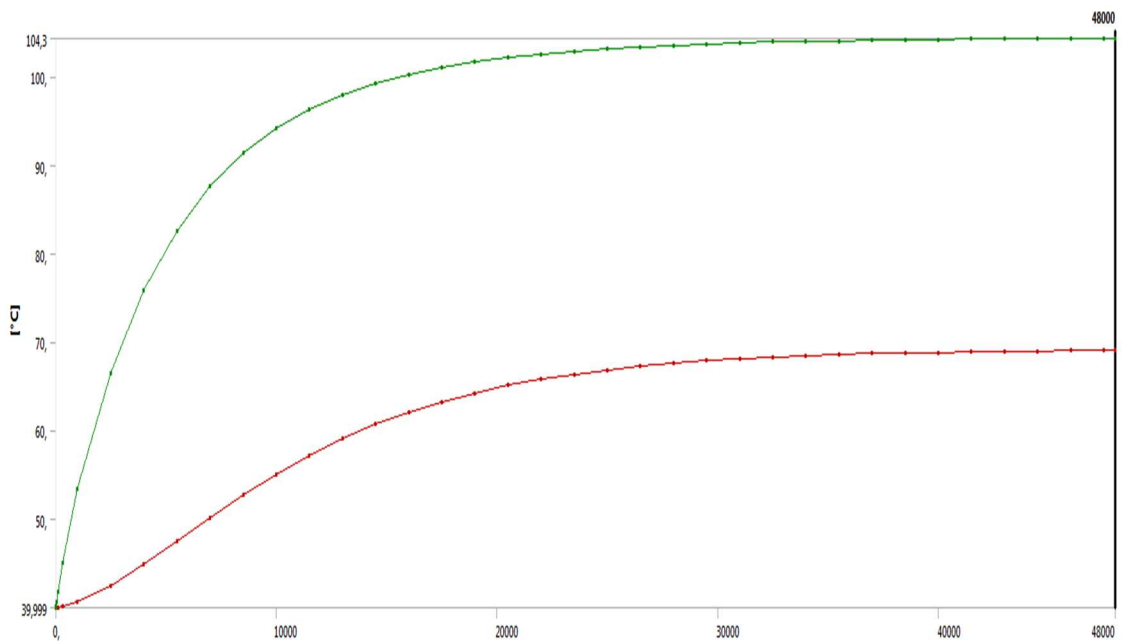
Tabulka 6.19: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 2.2

	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67

Výsledná teplota jednotlivých částí transformátoru je zobrazena na obrázku 6.27. Průběh teplot transformátoru je zobrazen na grafu na obrázku 6.28. Zbylé průběhy a grafické zobrazení teploty jsou vyneseny na obrázcích 10.57–40.62 v příloze.



Obrázek 6.27: Rozložení teploty transformátoru – varianta 3.1



Obrázek 6.28: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 3.1

Maximální teplota, minimální teplota a oteplení, přepočtené teploty z počáteční teploty 40 °C, jsou vyneseny v tabulce 6.20.

Tabulka 6.20: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 3.1

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	69	86	46
Nn	83,9	87,8	47,8
Vn	100,4	104,3	64,3

Z výsledků je patrné, že došlo k oteplení opět celého transformátoru, především ale vinutí vysokého napětí, kde oproti první simulaci varianty s rozděleným pouze vinutím nízkého napětí, došlo ke zvýšení teploty hot-spotu o více než 15 °C.

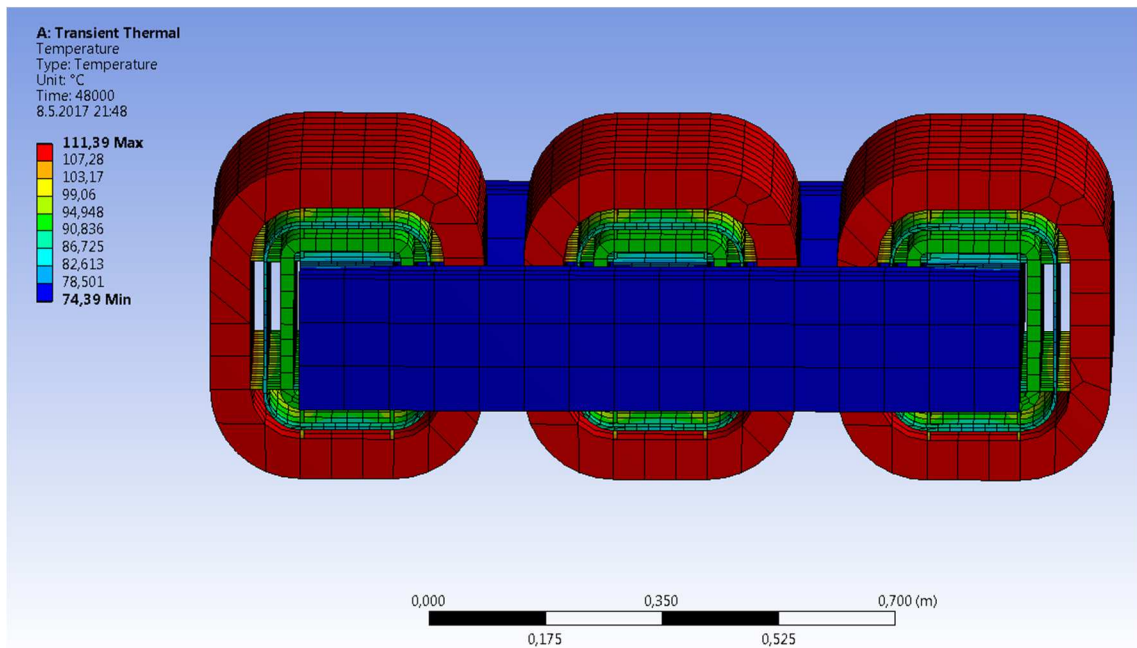
6.4.2 Druhá simulace

Druhá simulace se liší od první opět přepočtením součinitele přestupu tepla podle oteplení, které vyšlo při první simulaci. Tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 6.21.

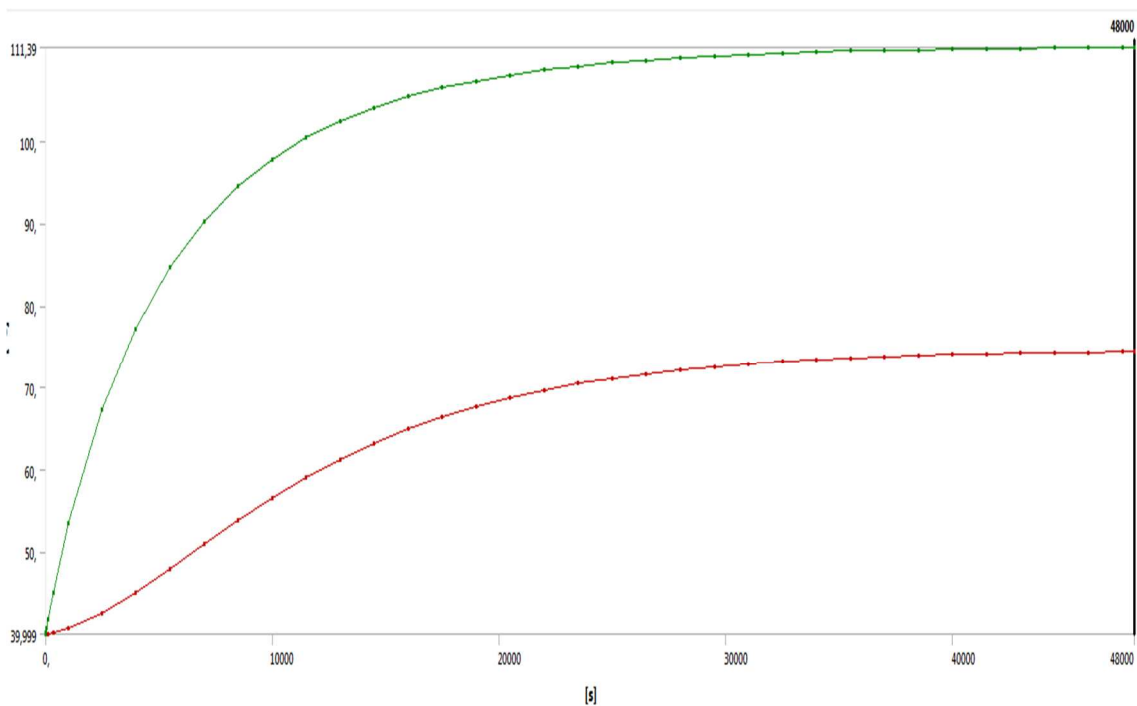
Tabulka 6.21: Upravené hodnoty součinitele přestupu – varianta 3.2

	Zakryté	Polozakryté	Nezakryté
Původní hodnoty α	10	13,5	16,9
α s koeficientem zakrytí	7,5	10,12	12,67
Upravený α	6,5	9,1	11,4

Z tabulky je patrné, že znovu došlo k nárůstu součinitele přestupu tepla při porovnání s tabulkou 6.14, protože došlo k nárůstu teploty transformátoru oproti druhé simulaci druhé varianty. Výsledné teploty simulace, která trvala 48 000 vteřin, jsou vidět na obrázku 6.29, kde je zobrazena teplota celého transformátoru a na 10.63–10.65 v příloze. Průběhy maximální a minimální teploty transformátoru a pouze vinutí vysokého napětí jsou vidět na obrázcích 6.30 a na 10.65–10.68 v příloze.



Obrázek 6.29: Rozložení teploty transformátoru – varianta 3.2



Obrázek 6.30: Průběh maximální a minimální teploty transformátoru – varianta 3.2

Hodnoty minimální teploty, maximální teploty a oteplení, které se vypočítalo z počáteční teploty 40 °C, jsou vyneseny v tabulce 6.22.

Tabulka 6.22: Hodnoty maximálních a minimálních teplot – varianta 3.2

	Min. teplota [°C]	Max. teplota [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	74,4	92,7	52,7
Nn	90,5	94,6	54,6
Vn	107,4	111,4	71,4

6.4.3 Analýza dat třetího modelu

Třetí varianta provedení transformátoru se lišila od ostatních odstraněním chladicího kanálku vysokého napětí. Tímto opatřením se dosáhlo nejmenších materiálních a ekonomických ztrát za cenu snížení chladicí plochy transformátoru pro přirozené proudění vzduchu.

Výsledné teploty poslední simulace všech tří variant jsou vyneseny v tabulce 6.23.

Tabulka 6.23: Porovnání výsledků všech variant provedení vinutí

	V.1 čtvrtá simulace	V.2 druhá simulace	V.3 druhá simulace
	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]	Oteplení [°C]
Jádro	35,7	42,8	52,7
Nn ₁	36,9	44,5	54,6
Nn ₂	38,5		
Vn ₁	52,2	54	71,4
Vn ₂	54,6	55,9	

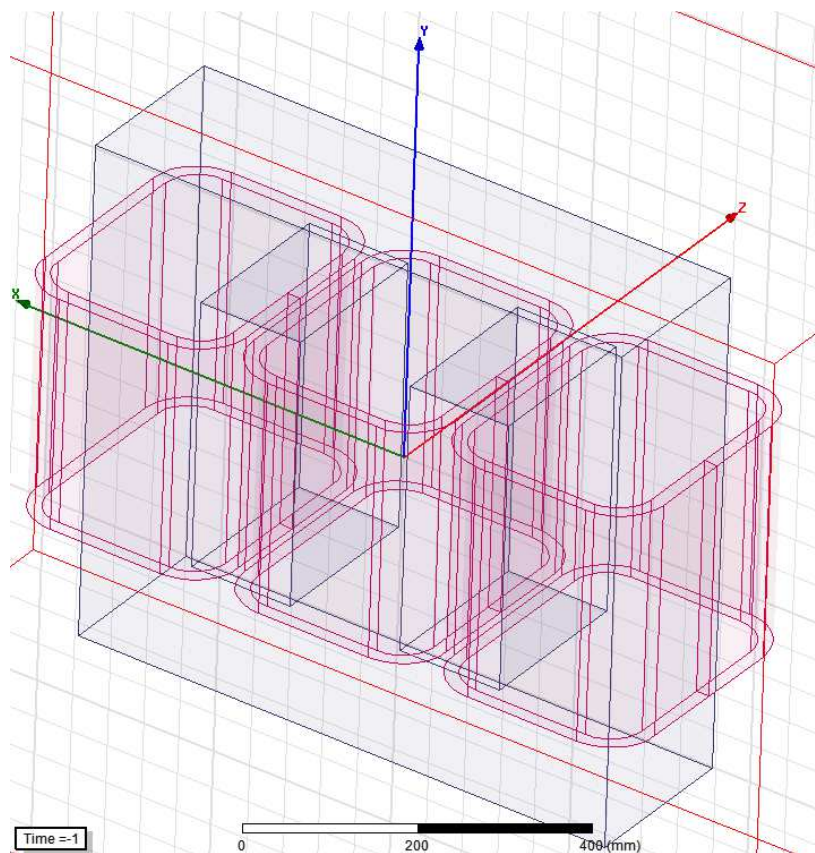
Transformátor s výsledným maximálním oteplením 71,4 °C by podle ČSN EN 60076-11 měl izolaci realizovatelnou ve třídě A.

7 Simulace funkce stroje v SW prostředí

Maxwell 3D

Maxwell 3D od firmy ANSYS slouží k řešení elektrických resp. magnetických polí pomocí metody konečných prvků na základě Maxwellových rovnic. [19]

Maxwell 3D vyžaduje analogicky k Transient-Thermal zadání 3D modelu do jeho grafického prostředí. Příklad modelu magnetického obvodu pouze s vinutím vysokého napětí je vidět na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Model transformátoru v Maxwell 3D

Dané uspořádání je jednou z možností, která může sloužit pro simulaci v chodu naprázdno a přidáním vinutím nízkého napětí i nakrátko. Simulace se provádí v řešiči transient, který vyžaduje zadání materiálových vlastností, způsobu napájení a vymezení okrajových podmínek. Materiál pro vinutí je elektrovedný hliník ve tvaru folie. Pro materiály magnetického obvodu, které jsou rozhodující pro velikost ztrát naprázdno, je třeba vyhledat relevantní údaje na webových stránkách jednotlivých výrobců. Zejména je třeba vyhledat magnetizační charakteristiky $B=f(H)$ pro daný síťový kmitočet a také ztrátové charakteristiky $\Delta P=f(B)$. Tyto údaje je třeba zadat do databáze. Způsob zadání

je popsán dále. V databázi figuruje materiál, který je definován BH křivkou a ztrátovými koeficienty Steinmetzova vztahu, které program vyhodnotí po zadání ztrátové charakteristiky.

7.1 Zadání výpočtu – B-H křivka

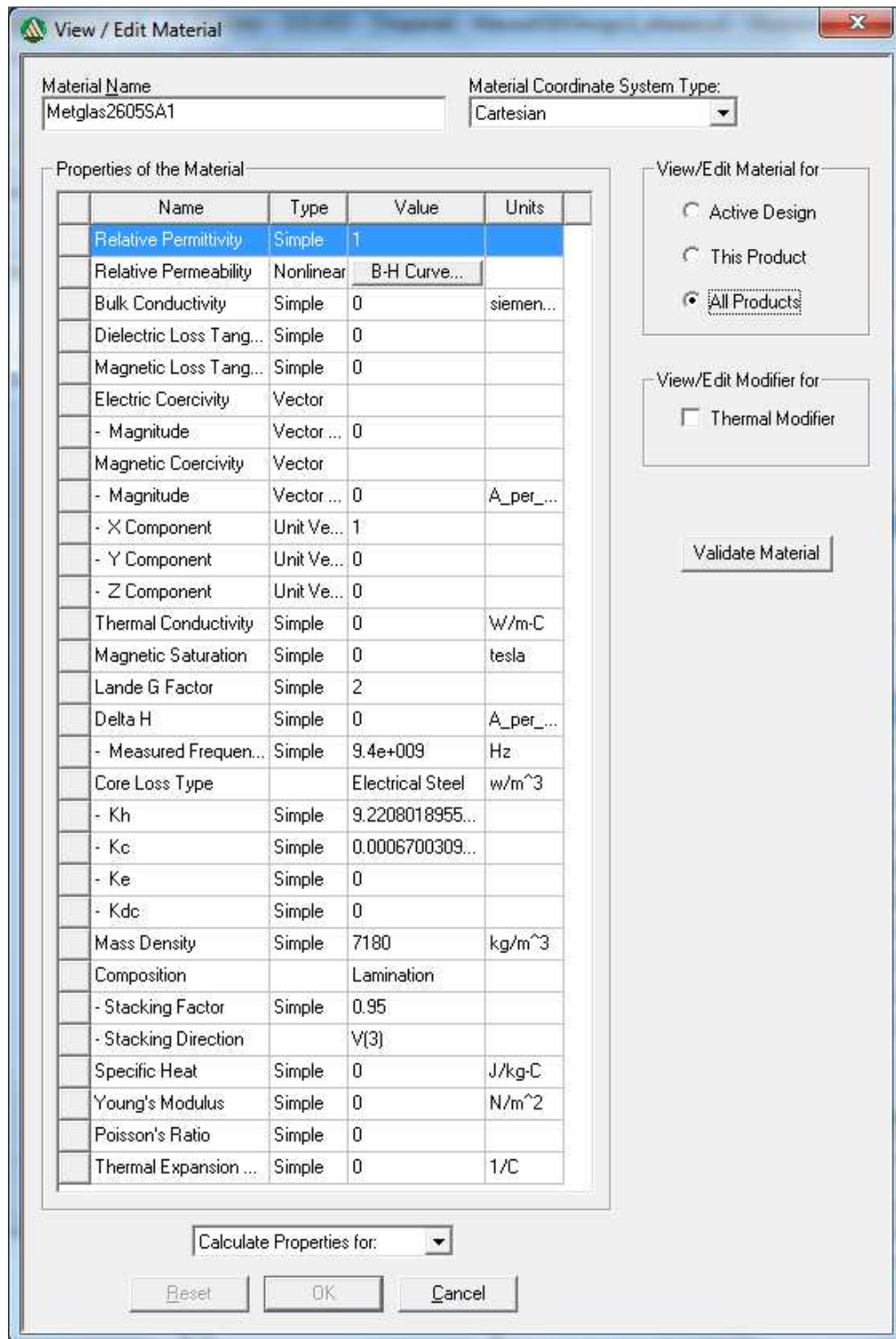
Pro simulaci v Maxwell 3D jsem zvolil amorfní slitinu 2605SA1 od firmy Metglas, kde se podařilo opatřit všechna potřebná výše zmíněná data. Amorfní fólie 2605SA1 je slitina železa, boru a křemíku. Tloušťka této fólie je 0,023 mm. [10]

Z dat získaných z katalogů od Metglas jsem odečetl hodnoty B-H křivky z grafů na obrázcích 10.73 a 10.74. Tyto data jsou vidět zpracované v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Hodnoty magnetizační a ztrátové charakteristiky Metglas 2605SA1

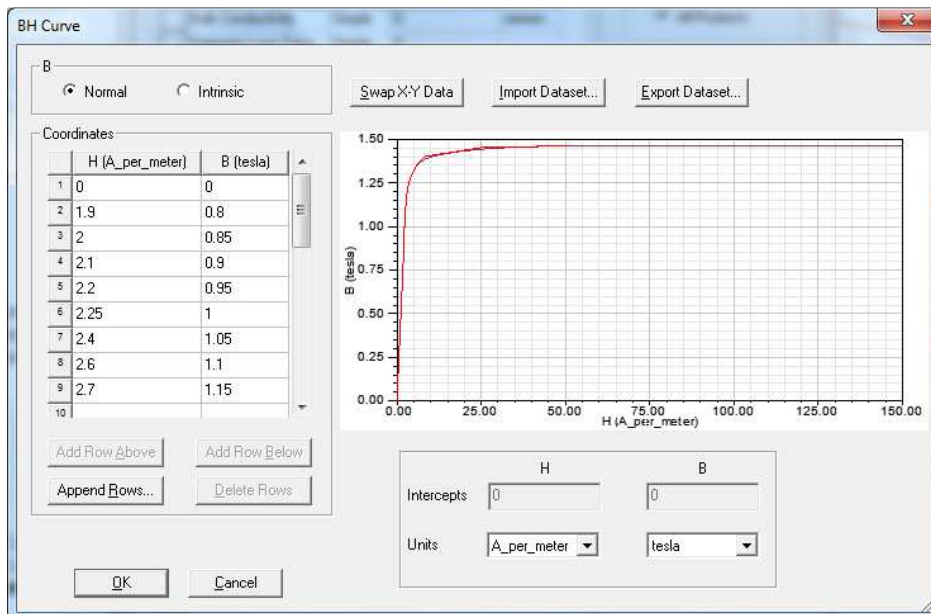
B	H	B	Core loss
T	$A \cdot m^{-1}$	T	$W \cdot kg^{-1}$
0,8	1,9	0,8	0,03
0,85	2	0,85	0,035
0,9	2,1	0,9	0,041
0,95	2,2	0,95	0,046
1	2,25	1	0,052
1,05	2,4	1,05	0,057
1,1	2,6	1,1	0,063
1,15	2,7	1,15	0,07
1,2	3,1	1,2	0,078
1,25	3,5	1,25	0,087
1,3	4,5	1,3	0,097
1,35	5,8	1,35	0,12
1,4	8,5	1,4	0,13
1,45	25	1,45	0,16
1,46	50	1,5	0,19

Ze získaných hodnot jsem vytvořil vlastní materiál pro magnetický obvod v knihovně materiálů v Maxwell 3D. Do knihovny Maxwell 3D byly v nejnovější verzi exportovány první amorfní materiály, tyto materiály ovšem mají nejednoznačné označení a hodnoty, které v mnoha případech nejsou úplné. Nový materiál v knihovně jsem provedl naklonováním již existujícího materiálu z knihovny, kde jsem v jeho vlastnostech upravil parametry, jak je vidět na obrázku 7.2.

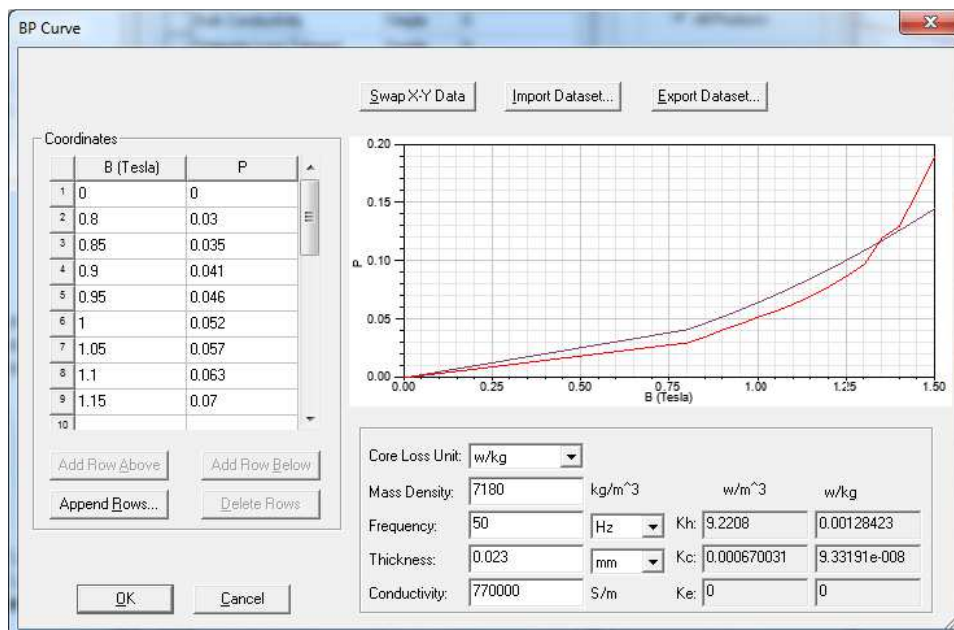


Obrázek 7.2: Vlastnosti materiálu 2605SA1

V druhém řádku na obrázku 7.2 je potřeba zadat hodnoty B-H křivky v záložce B-H Curve, jak je znázorněno na obrázku 7.3. Nakonec bylo potřeba v záložce B-H křivky zadat ztrátovou charakteristiku materiálu. Tato křivka je vynesena na obrázku 7.4.



Obrázek 7.3: Magnetizační charakteristika 2605SA1



Obrázek 7.4: Ztrátová charakteristika 2605SA1

Po zadání charakteristik a jiných hodnot pro daný materiál, jako je frekvence, hustota materiálu, jeho tloušťka nebo vodivost, je možné odečíst z tabulek u B-H charakteristiky ztrátové koeficienty k_h a k_v , které představují hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy.

Podle výpočtu v Maxwell 3D vyšly pro amorfní materiál 2605SA1 koeficienty $k_h = 0,00128 \text{ [Wkg}^{-1}\text{]}$ a $k_v = 9,331 \cdot 10^{-8} \text{ [Wkg}^{-1}\text{]}$. S těmito koeficienty mohou vypočítat ztráty naprázdno transformátoru za použití Steinmetzova vztahu. Maxwell 3D

nepočítá s dodatečnými ztrátami a tak pro mé výpočty postačí základní forma Steinmetzova vtahu (30).

$$p_h = k_h B^2 f = 0,00128 \cdot 1,5^2 \cdot 50 = 0,144 \text{ [Wkg}^{-1}\text{]} \quad (33)$$

$$p_v = k_v B^2 f^2 = 9,331 \cdot 10^{-8} \cdot 1,5^2 \cdot 50^2 = 0,524 \cdot 10^{-4} \text{ [Wkg}^{-1}\text{]} \quad (34)$$

$$p_{Fe} = p_h + p_v = 0,668 \text{ [Wkg}^{-1}\text{]} \quad (35)$$

Z výpočtu mi vyšly ztráty v magnetickém obvodu $0,668 \text{ [Wkg}^{-1}\text{]}$.

7.2 Zadání výpočtu – Dokončení návrhu

Po vytvoření materiálu a je možné tento materiál přiřadit magnetickému obvodu modelu. Dále jsem zadal průběhy napětí jednotlivých fází. V každé fázi je harmonické napětí posunuté o 120° .

$$U_1 = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (36)$$

$$U_2 = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (37)$$

$$U_3 = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (38)$$

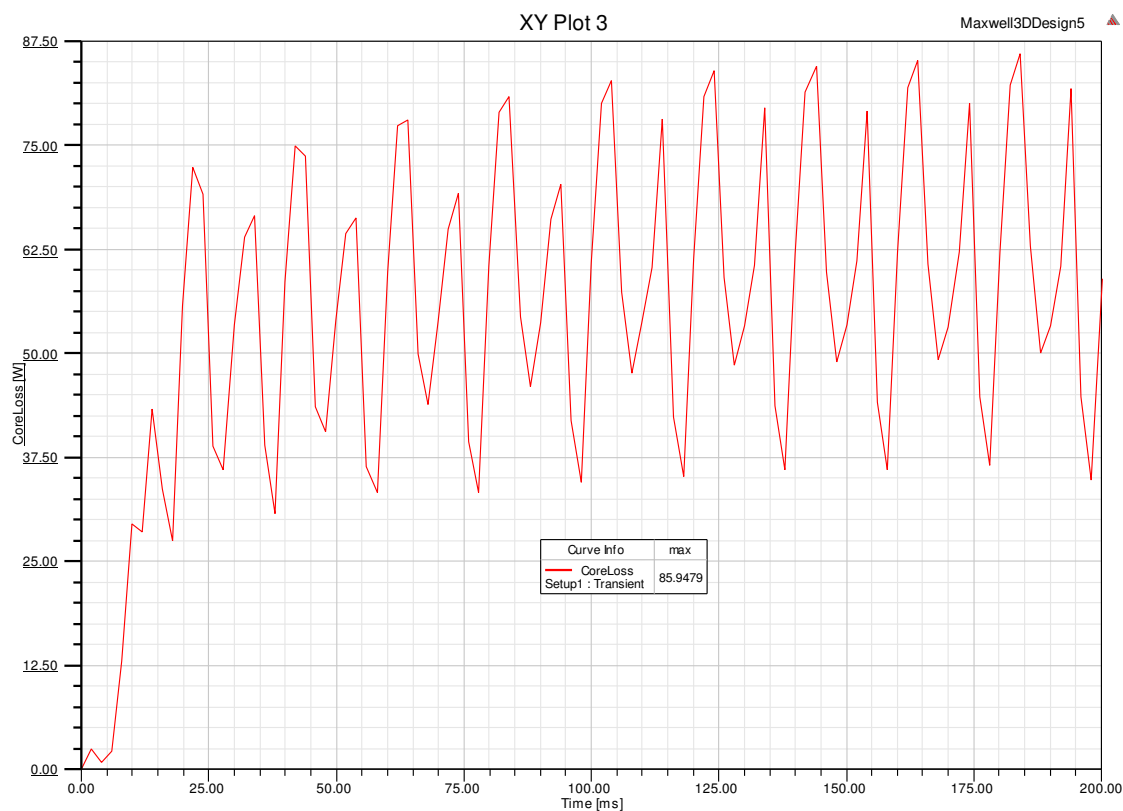
Nakonec bylo potřeba zvolit prostředí, v němž se magnetický obvod nachází. Volí se ideálně co nejmenší prostor, aby výpočet nebyl příliš složitý, je ovšem potřeba zadat prostředí dostatečně velké pro celkové magnetické pole. Pro svůj účel jsem zvolil okolí v rozsahu 30% velikosti obvodu.

7.3 Analýza vypočtených dat

Simulace byla zaměřena na chod transformátoru v režimu naprázdno. V daném případě byla do simulace zahrnuta obě vinutí nízkého napětí i vysokého napětí. U vinutí nízkého napětí byl do obvodu přidán činný odpor $1 \cdot 10^6$ ohm, což představuje fakticky stav naprázdno. Průběh ztrát magnetického obvodu v závislosti na čase je možno vidět na obrázku 7.5 a je z něho zřejmé, že přechodný děj je v okamžiku ukončení simulace dosud neukončen.

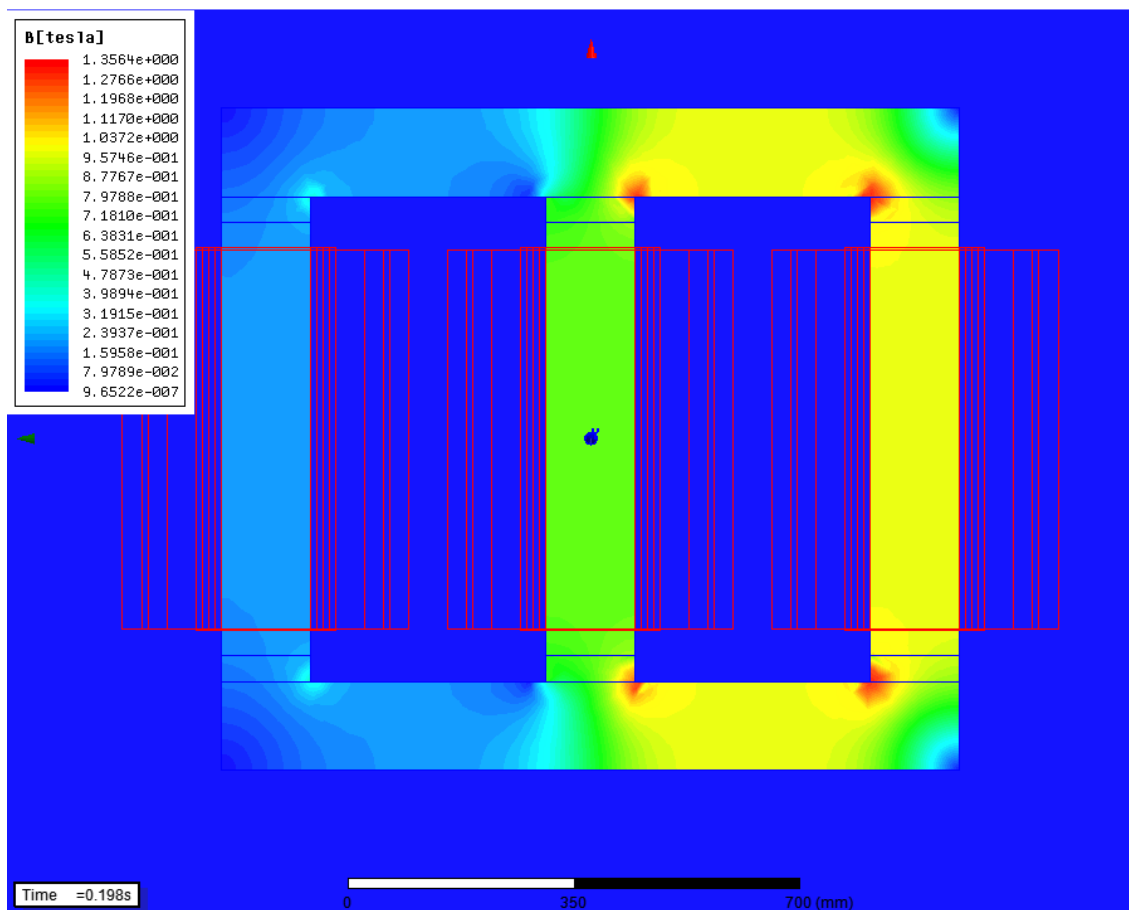
Doba výpočtu, pro úplný 3D model na počítači, který jsem měl k dispozici, přesáhla 2 x 24 hod, proto jsem se s tímto stavem spokojil. Z obrázku 7.6 je vidět, že

maximální hodnota ztrát dosahuje 85 W, což je výrazně níž než předepisuje kategorie A0.



Obrázek 7.5: Průběh ztrát simulace chodu naprázdno

Dále je možné z Maxwellu 3D získat data o rozložení magnetické indukce v libovolném okamžiku prováděné simulace. Na obrázku 7.5 jsou vidět okamžité hodnoty magnetické indukce v jádře transformátoru 0,2 vteřiny po připojení transformátoru k síti.



Obrázek 7.6: Rozložení magnetické indukce na jádru transformátoru

8 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na návrh suchého distribučního transformátoru v provedení se sníženými ztrátami. Z hlediska optimalizace provedení je hlavní důraz kladen na minimalizaci ztrát naprázdno vzhledem k tomu, že transformátor musí zajišťovat nepřetržitou dodávku elektrické energie. Jednotlivé kategorie ztrát naprázdno a nakrátko definuje norma ČSN EN 50464-1. Pro magnetický obvod transformátoru s co nejnižšími ztrátami naprázdno byla zvolena amorfní fólie, která vykazuje díky své unikátní struktuře nejlepší vlastnosti z hlediska ztrát.

V práci jsem provedl návrh transformátoru typového výkonu 250 kVA, který dosahuje ztrát naprázdno dle platných ČSN EN v nejvyšší kategorii A_0 (max. 300 W – tabulka 10.5), zatímco ztráty nakrátko jsou vzhledem k aplikaci hliníkového fóliového vinutí v kategorii C_k (max. 3250 W – tabulka 10.6). Návrh vinutí jsem vzhledem k požadavkům na analýzu možnosti tepelné kontroly v programu Ansys Transient-Thermal členil do vrstev v celkem 3 variantách, které se lišily v přítomnosti vzduchové mezery mezi vinutím téhož napětí.

Zásadní vliv na výsledek tepelné kontroly má volba součinitelů přestupu, které je třeba kvalifikovaně zvolit. V průmyslové praxi každý výrobce vychází z empiricky získaných hodnot na základě realizovaných zkoušek resp. zakázek. Součinitel přestupu je složitou funkcí geometrie, vlastností prostředí a rychlosti chladicího média kolem obtékaných ploch, což vyžaduje simulaci proudění. V prostředí Ansys je k tomuto účelu k dispozici program Fluent, resp. CFX. Tyto SW prostředky jsou velmi náročné na osvojení a nebyly předmětem diplomové práce. V diplomové práci byl pro simulaci oteplení použit program Transient-Thermal.

Výhodou simulace v Transient-Thermal je možnost rozdělení teplosměnných ploch na základě zadaného součinitele, což dává detailnější představu o tepelném zatížení aktivních částí transformátoru. Realizované simulace vykazují značný rozptyl právě v závislosti na odhadu součinitelů přestupu pro jednotlivá vinutí, resp. vrstvy vinutí viz. tabulka 6.23. Z výsledků je vidět, že všechny varianty rozdělení vinutí vysokého i nízkého napětí daného modelu dosahují oteplení, které by umožnilo realizovat transformátor ve třídě izolace A. Z výše uvedeného vyplývá, že by navržený transformátor bylo možné vyrobit ve variantě s vinutím nízkého napětí a vinutím

vysokého napětí členěným do jedné vrstvy bez vnitřních chladících kanálů. Tato varianta by se vyznačovala nejnižšími náklady na materiály a výrobní proces.

Pro simulaci provozního stavu transformátoru byl použit program rovněž od firmy Ansys – Maxwell 3D. Vzhledem k charakteru nepřetržité práce stroje v distribuční soustavě jsem se zaměřil na simulace chodu naprázdno. Hlavní problém v tomto případě činilo opatření ztrátových charakteristik použitého amorfního materiálu. Pro stavbu magnetického obvodu jsem použil amorfní folie 2605SA1 od čínské firmy Metglas. Vzhledem k tomu, že program Maxwell 3D neumožňuje navrhout 3D geometrii magnetického obvodu v tzv. vinutém provedení, byl jsem nucen zvolit zjednodušený klasický skládaný typ třífázového jádrového tvaru.

9 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Electro*. Praha: Cigre, 2002. ISSN 1210-0889
- [2] DECRISTOFARO, Nicholas. Amorphous Metals in Electric-Power Distribution Applications [online]. *Materials Research Society*, 1998, 9 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://blog.dianyuan.com/blog/u/65/1209881105.pdf>
- [3] Urban, Z.: *Amorfní kovy a jejich aplikace v elektrotechnice*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [4] ISIK, Fatih. Amorphous core transformers efficiency analysis in Turkish electrical distribution systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* [online]. 2015, 13 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-15-23-6/elk-23-6-1-1401-195.pdf>
- [5] MOHAN, Man. An Overview on Amorphous Core Transformers. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* [online]. Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering: Scholarlink Research Institute Journals, 2005, 4 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://jeteas.scholarlinkresearch.com/articles/An%20Overview%20on%20Amorphous%20Core%20Transformers.pdf>
- [6] BILLINGS, Keith. *Why Have an Air Gap?* [online]. 2002 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.powerelectronics.com/content/why-have-air-gap>
- [7] Turczynová, L.: *Měření na jednofázovém transformátoru s výkonovým analyzátozem norma D-4000*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2008.
- [8] QUREISHI, Said. *Reducing Building Factor by Using Step Lap (SL) Laminations* [online]. KRYFS Power Components, 2008, 11 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.kryfs.com/pdf/article3.pdf>
- [9] Yeong-Hwa, Ch.: "Magnetic properties improvement of amorphous toroidal cores using newly developed step-lap joints." *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*. Eds. I. Rudas, M. Demiralp, and N. Mastorakis. No. 9. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2009.
- [10] Štěpánek, J.: *Návrh distribučního transformátoru s amorfním magnetickým obvodem*. Bakalářská práce, České Vysoké Učení Technické v Praze, 2015

-
- [11] KRAUS, Miroslav. *Není transformátor jako transformátor* [online]. [cit. 2017-05-22].<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/neni-transformator-jako-transformator--13480>
- [12] JAROSEK, Josef. *Transformátory*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatury, 1961.
- [13] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: Teoretická základy*. Praha: Academia, 1973.
- [14] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [15] *Magnetic Circuits and Core Losses: Module 6* [online]. Kharagpur, 21 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://nptel.ac.in/courses/108105053/pdf/L-22\(TB\)\(ET\)%20\(\(EE\)NPTEL\).pdf](http://nptel.ac.in/courses/108105053/pdf/L-22(TB)(ET)%20((EE)NPTEL).pdf)
- [16] Yicheng Ch., Pragasen P.: "An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation." *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*. Vol. 2. IEEE, 2002
- [17] TICHOMIROV, P.M. *Rasčet Transformátor*. Moskva: Energoizdat 1986
- [18] JAVORSKÝ, P. *Elektrické stroje a Přístroje*. Praha: SNTL 1982
- [19] ANSOFT Maxwell. *ANSYS Maxwell Documentation: Lecture 1: Introduction to ANSYS Maxwell*. [online]. 21. 5. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z:http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L01_Introduction.pdf
- [20] Metglas. *Downloads: Product brochures*. [online]. 2010 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.metglas.com/assets/pdf/2605sa1.pdf>
- [21] Buhr , K.: *Elektromagnetický návrh transformátoru v MS Excel*, 2005.

10 Přílohy

Tabulka 10.1: Parametry vinutí nízkého napětí varianty 2

		kanál 1	vinutí 1-1	kanál 2	vinutí 1-2
šířky	mm	10	10	0	10
obvod i	mm	680	742,8	805,6	868,4
obvod e	mm	742,8	805,6	868,5	931,3
obvod s	mm	711,4	774,2	837	899,9
závitů	-		16		16
šířka vodiče	mm		0,5		0,5
výška vodiče	mm		600		600
vodiče radiálně	-		1		1
vodiče axiálně	-		1		1
vrstev	-		1		1
závit/vrstva	-		16		16
šířka vinutí	mm		17		17
výška vinutí	mm		600		600
průřez	mm ²		300		300
1 cívka	kg		10		10,8
celk. hm. 3f	kg		30,1		32,5
ztráty	W		544,3		588,5
výška vinutí	mm		600		600
součinitel přestupu	W/m ² /K		9,5		9,5
povrch	m ²		0,272		0,301
oteplení	K		68,5		68,5

Tabulka 10.2: Parametry vinutí vysokého napětí varianty 2

kanál 3	bariera	kanál 4	vinutí 2	kanál 5	vinutí 2
20	5	20	30	10	30
868,4	994,1	1025,5	1151,2	1339,7	1402,5
994,1	1025,5	1151,2	1339,7	1402,5	1591
931,3	1009,8	1088,4	1245,4	1371,1	1496,8
			1700		1700
			0,5		0,5
			12		12
			1		1
			1		1
			35		35
			48,5		48,5
			50		50
			594,8		594,8
			6		6
			34,3		41,2
			102,9		123,6
			1537,9		1848,3

595	595
9,5	11,5
0,634	0,661
42,4	40,4

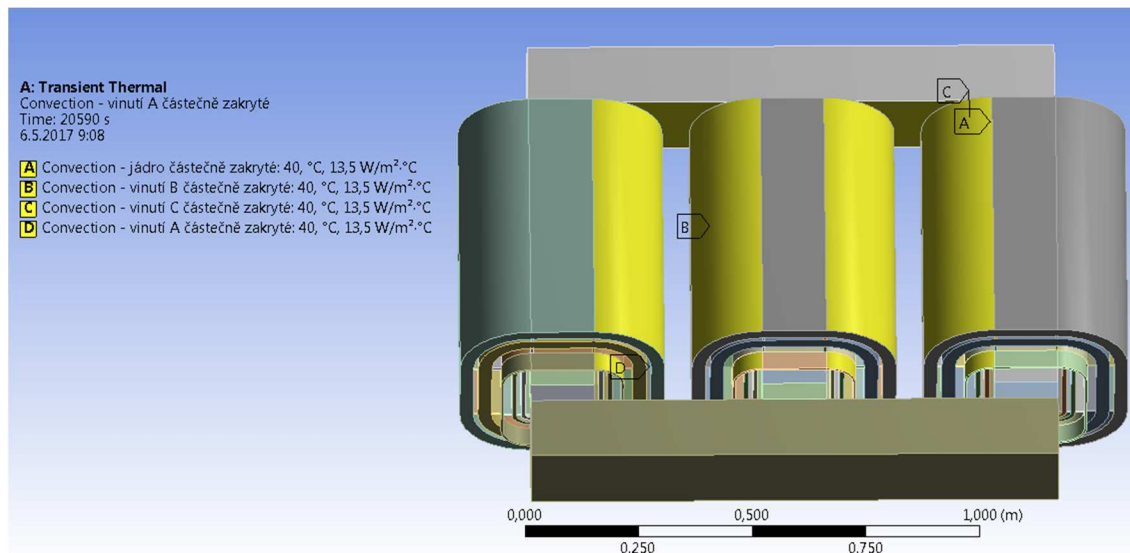
Tabulka 10.3: Parametry vinutí nízkého napětí varianty 3

		kanál 1	vinutí 1-1	kanál 2	vinutí 1-2	kanál 3
šířky	mm	10	10	0	10	20
obvod i	mm	680	742,8	805,6	868,4	868,4
obvod e	mm	742,8	805,6	868,5	931,3	994,1
obvod s	mm	711,4	774,2	837	899,9	931,3
závitů	-		16		16	
šířka vodiče	mm		0,5		0,5	
výška vodiče	mm		600		600	
vodiče radiálně	-		1		1	
vodiče axiálně	-		1		1	
vrstev	-		1		1	
závit/vrstva	-		16		16	
šířka vinutí	mm		17		17	
výška vinutí	mm		600		600	
průřez	mm ²		300		300	
1 cívka	kg		10		10,8	
celk. hm. 3f	kg		30,1		32,5	
ztráty	W		544,3		588,5	
výška vinutí	mm		600		600	
součinitel přestupu	W/m ² /K		9,5		9,5	
povrch	m ²		0,272		0,301	
oteplení	K		68,5		68,5	

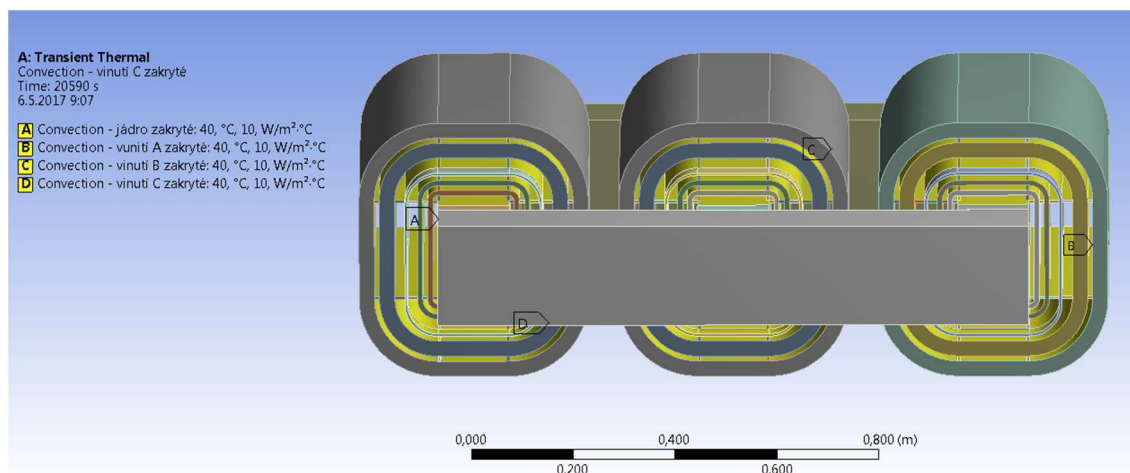
Tabulka 10.4: Parametry vinutí vysokého napětí varianty 3

bariera	kanál 4	vinutí 2	kanál 5	vinutí 2
5	20	30	0	30
994,1	1025,5	1151,2	1339,7	1339,7
1025,5	1151,2	1339,7	1339,7	1528,2
1009,8	1088,4	1245,4	1339,7	1433,9
		1700		1700
		0,5		0,5
		12		12
		1		1
		1		1
		35		35
		48,5		48,5
		50		50
		594,8		594,8
		6		6
		34,3		39,4
		102,1		118,4

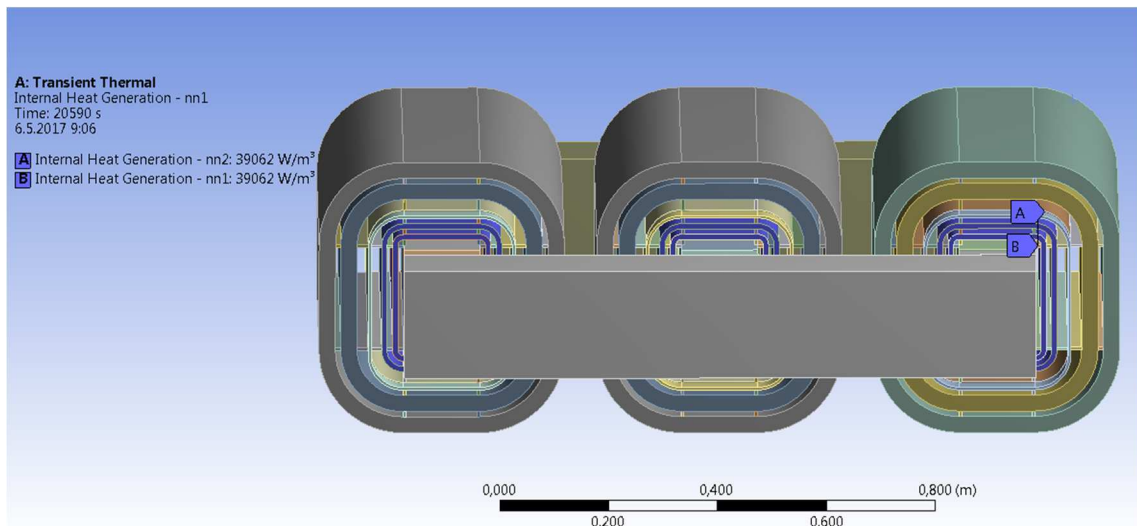
1537,9	1770,7
595	595
9,5	11,5
0,317	0,311
84,9	80,9



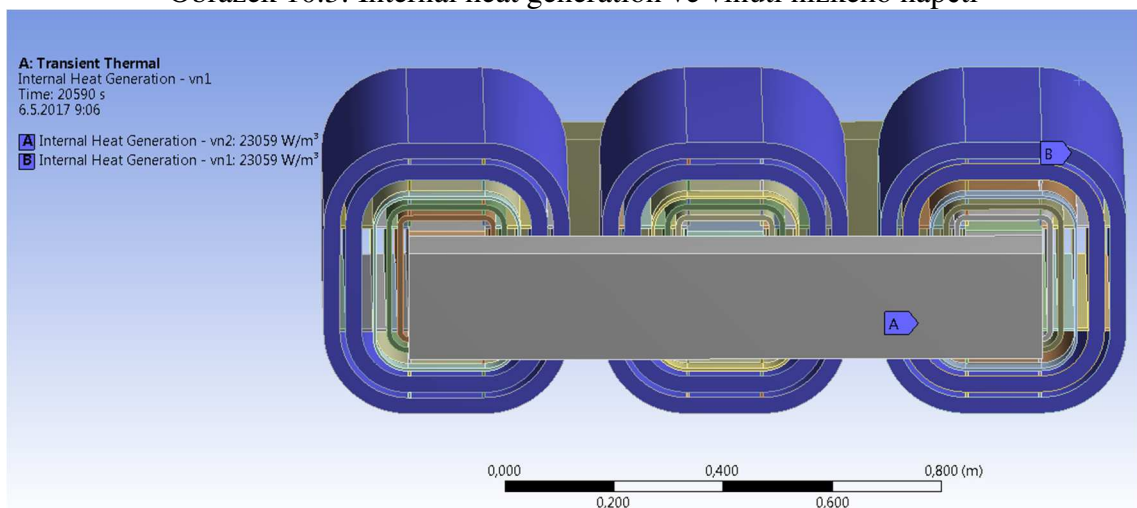
Obrázek 10.1: Součinitel přestupu na částečně zakrytých plochách



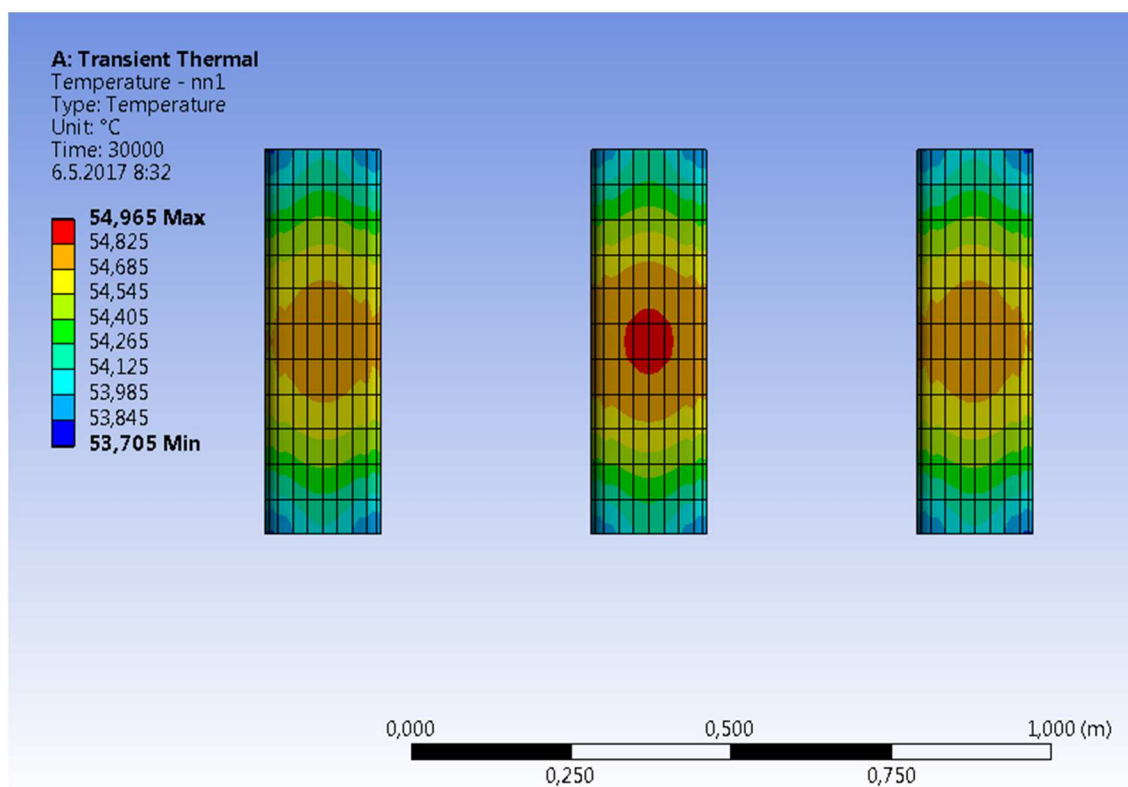
Obrázek 10.2: Součinitel přestupu na zakrytých plochách



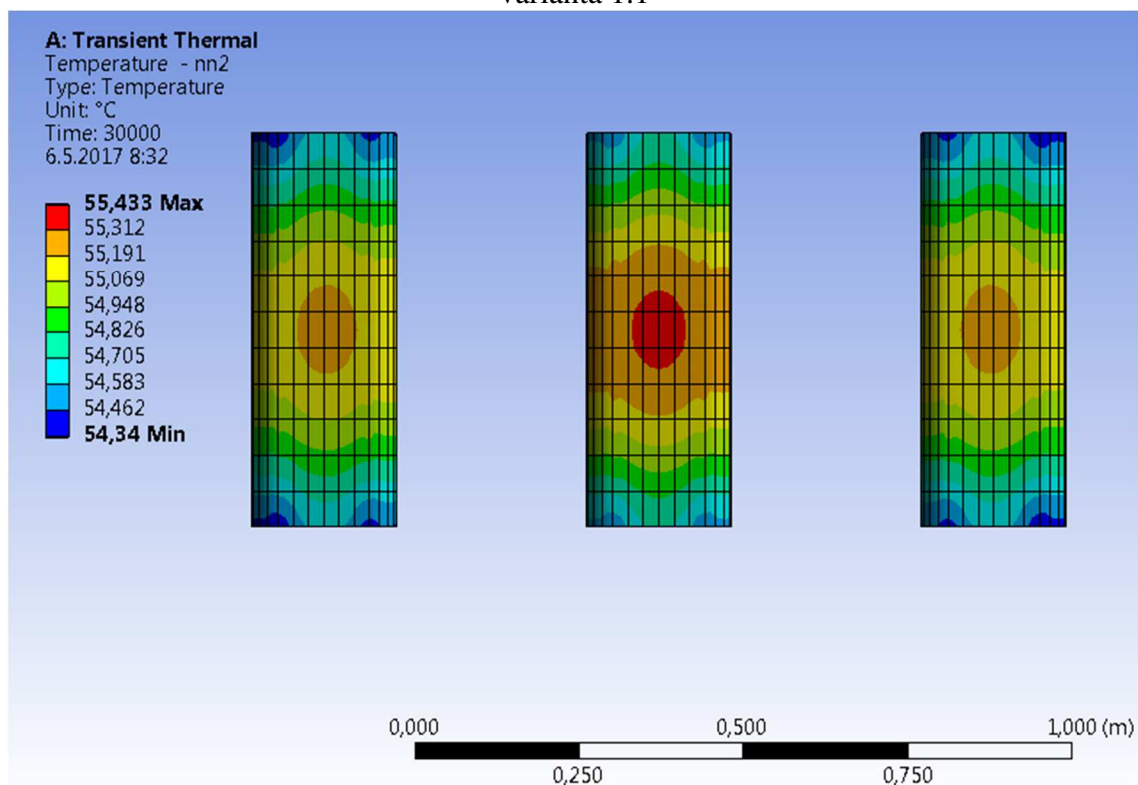
Obrázek 10.3: Internal heat generation ve vinutí nízkého napětí



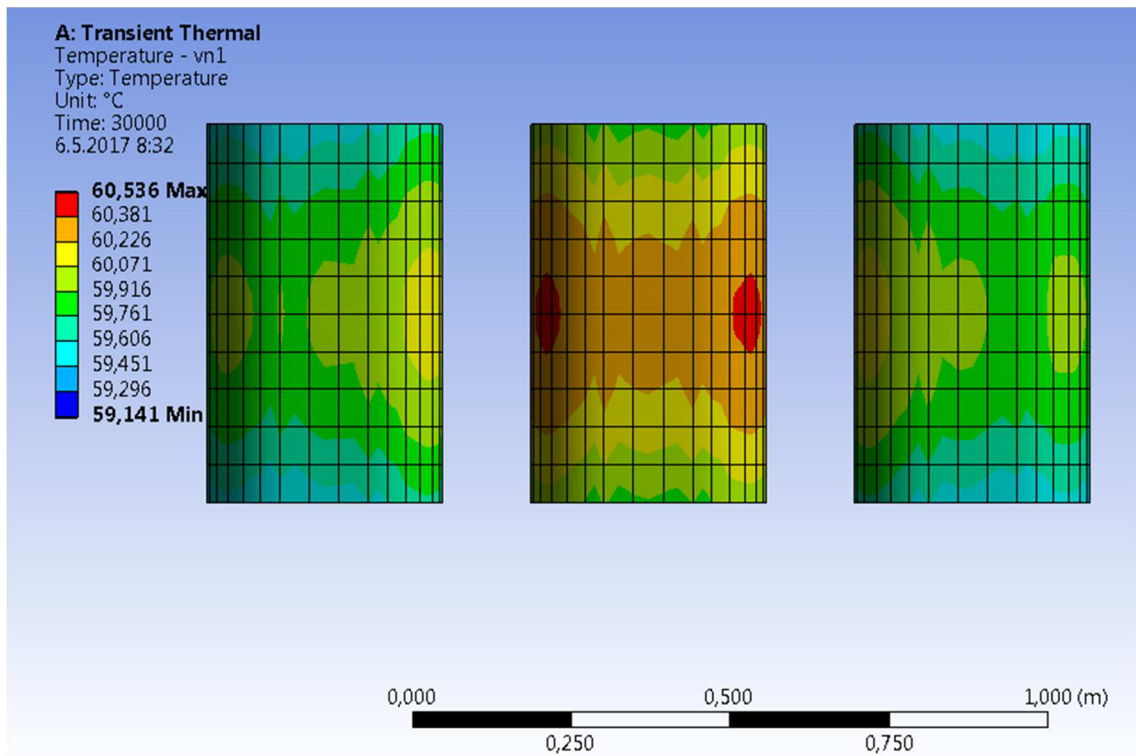
Obrázek 10.4: Internal heat generation ve vinutí vysokého napětí



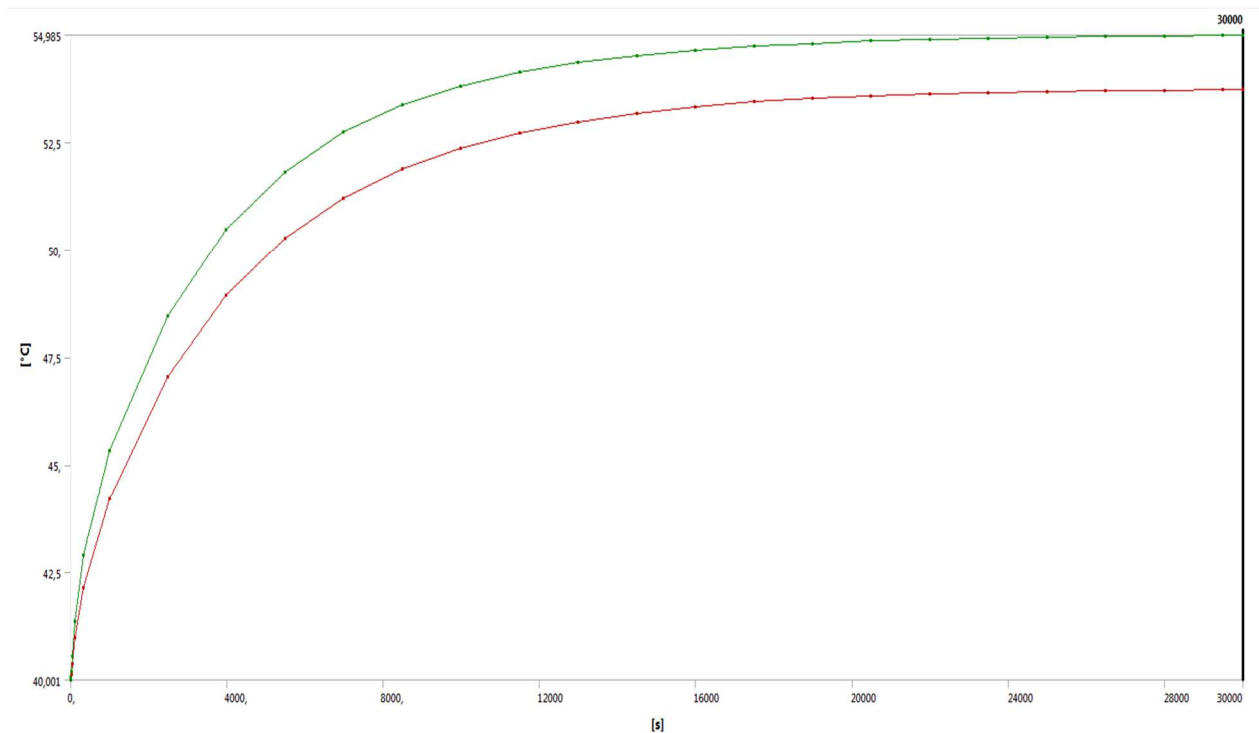
Obrázek 10.5: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.1



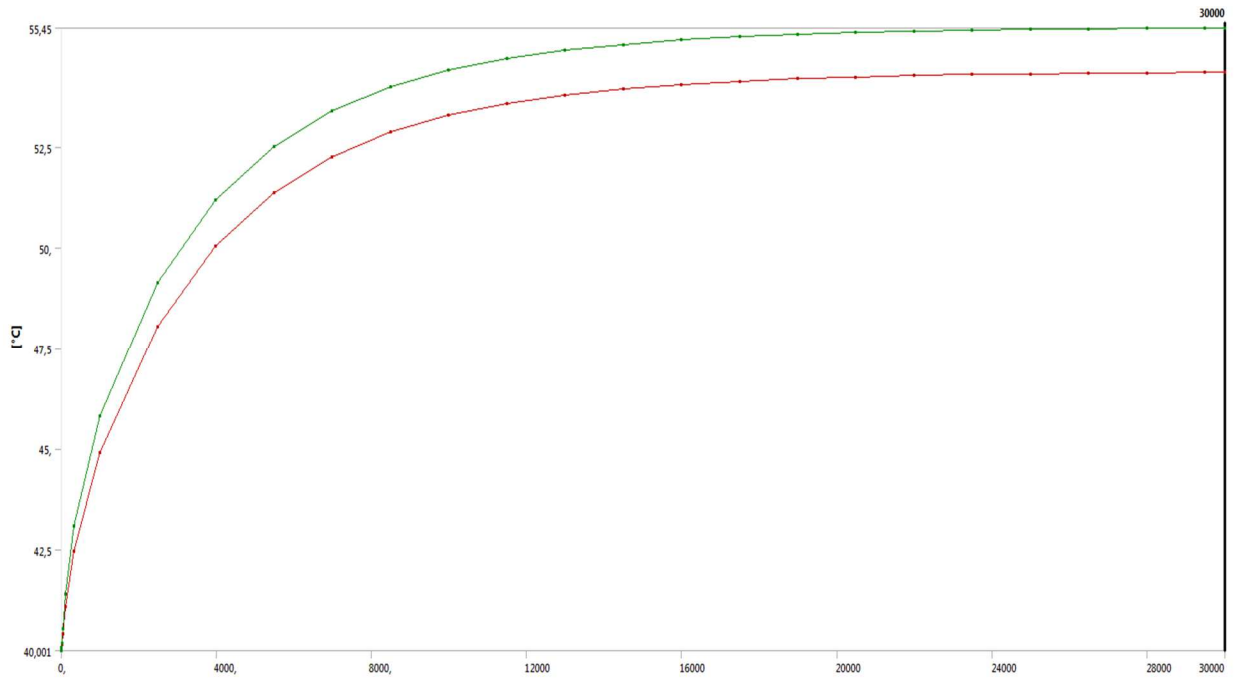
Obrázek 10.6: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.1



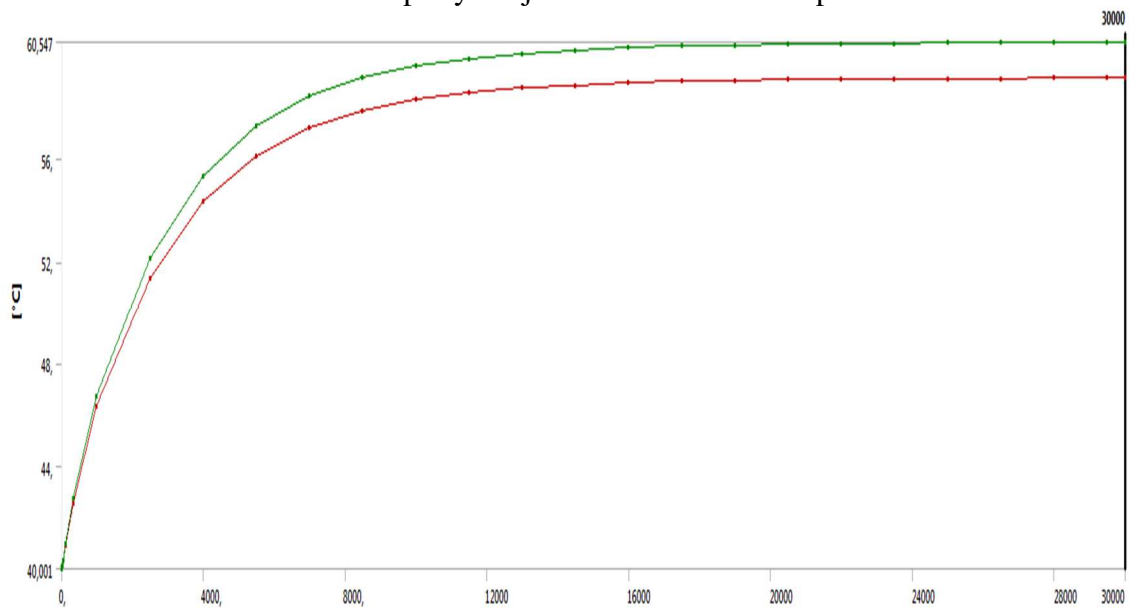
Obrázek 10.7: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.1



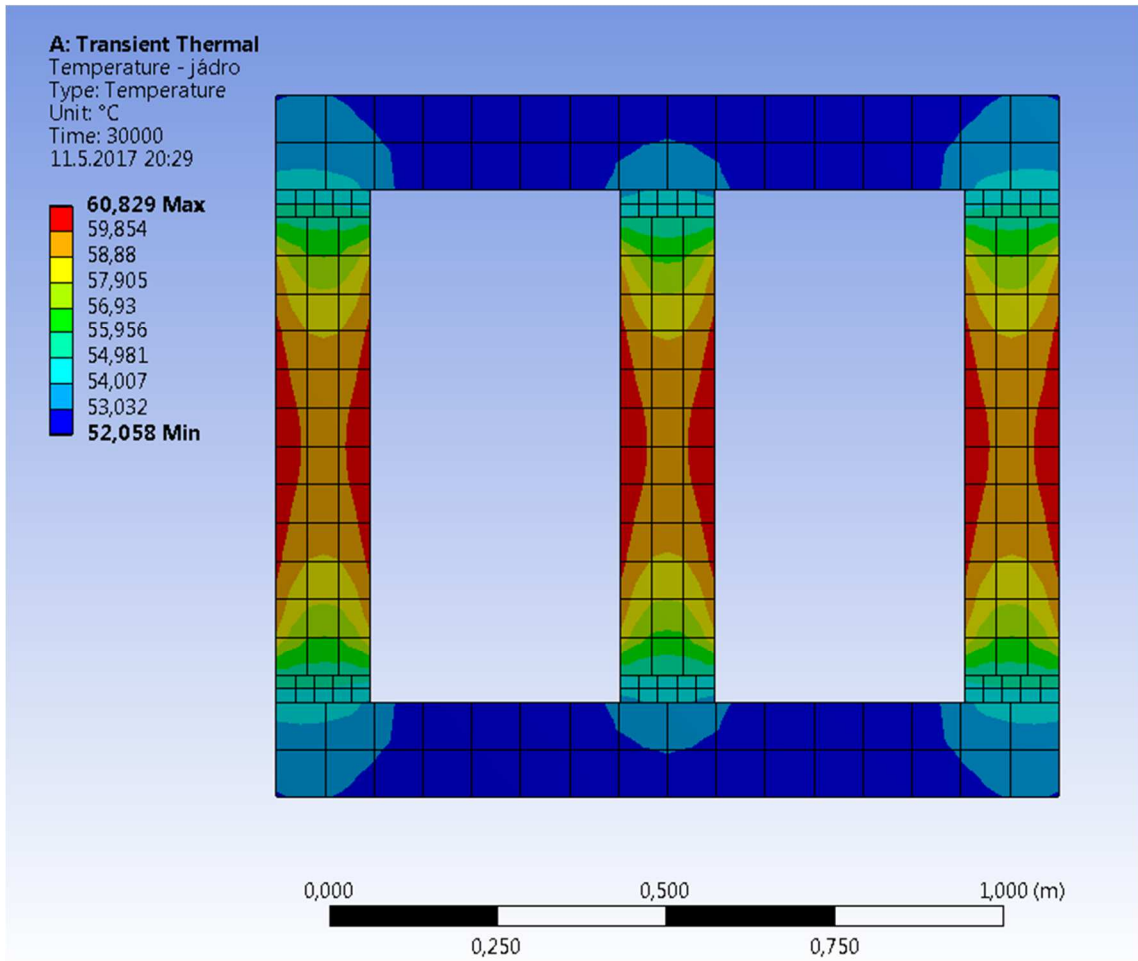
Obrázek 10.8: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.1



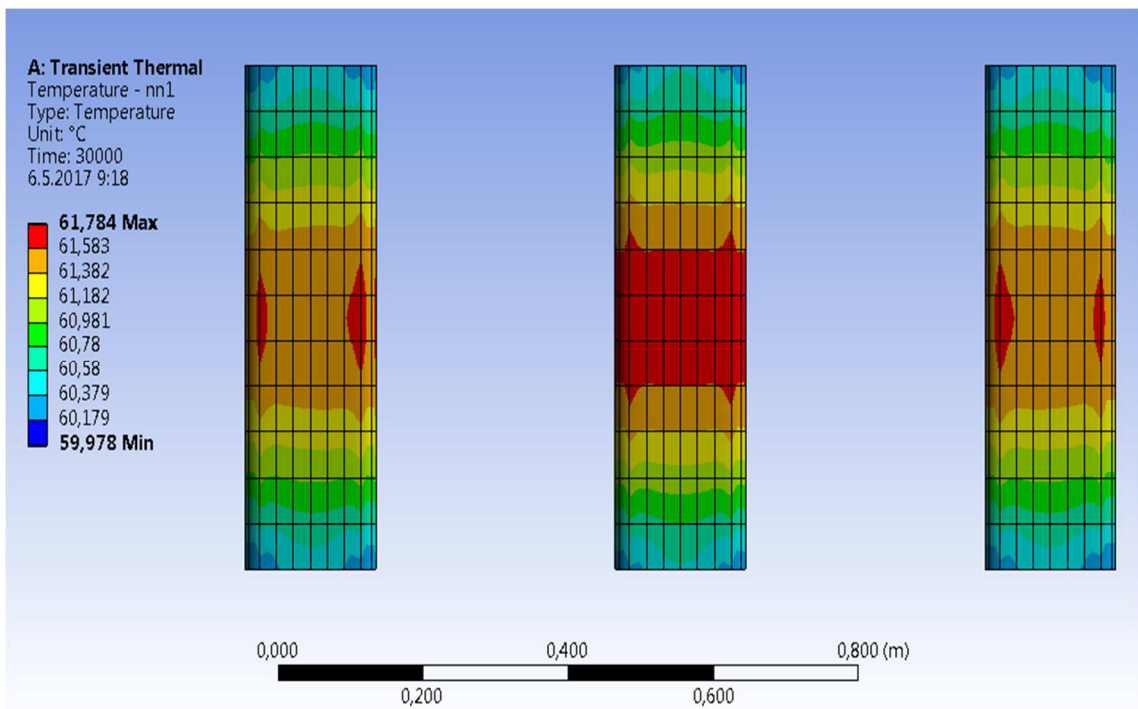
Obrázek 10.9: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.1



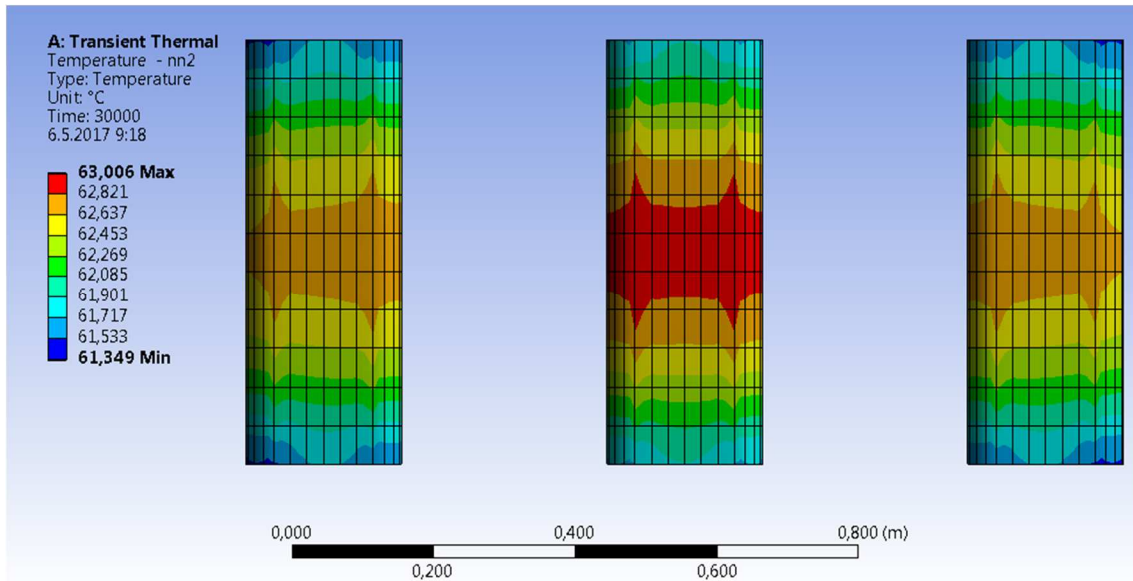
Obrázek 10.10: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.1



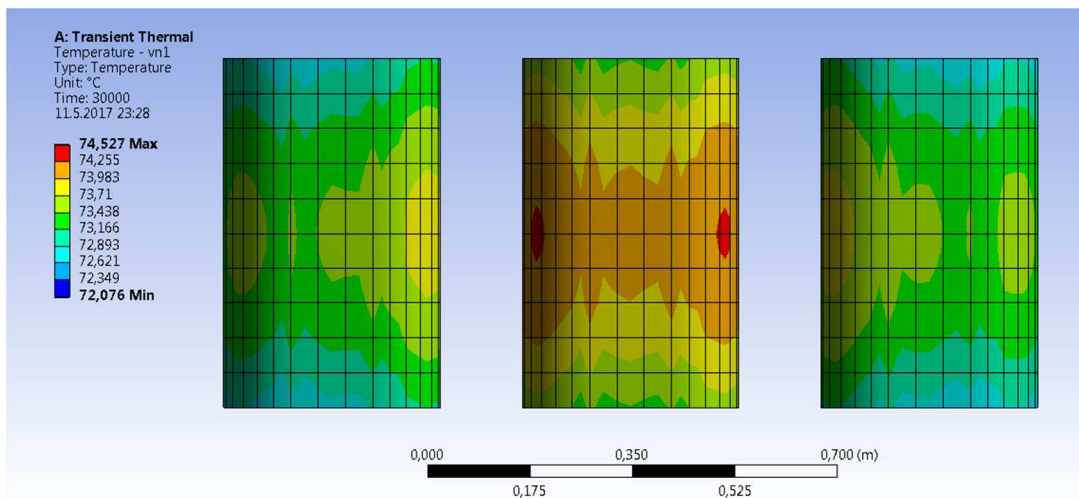
Obrázek 10.11: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.2



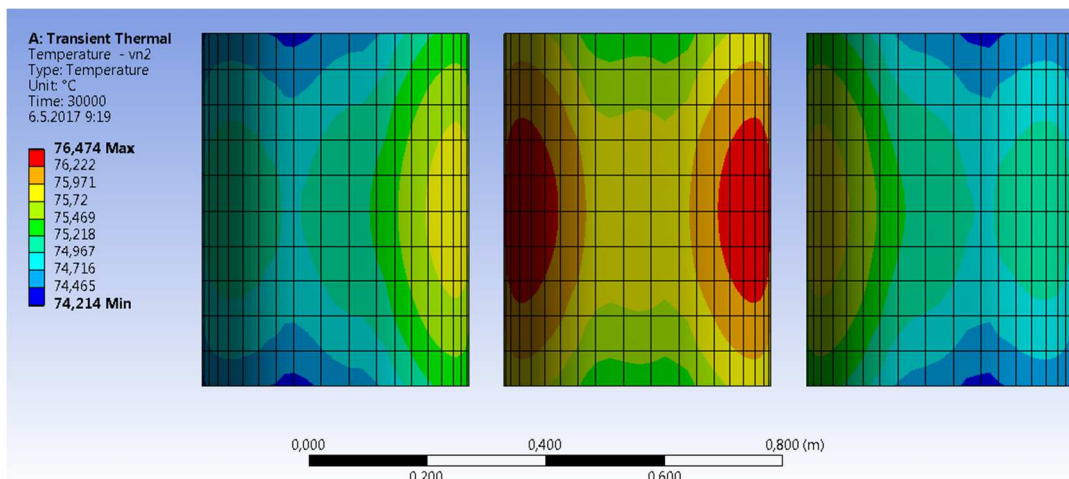
Obrázek 10.12: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.2



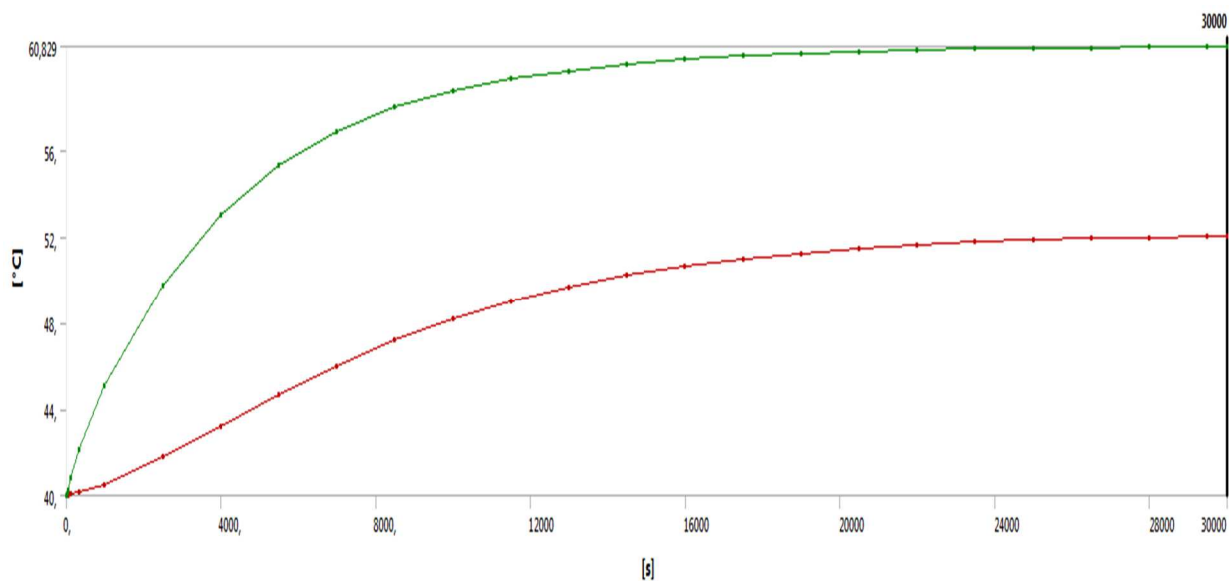
Obrázek 10.13: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.2



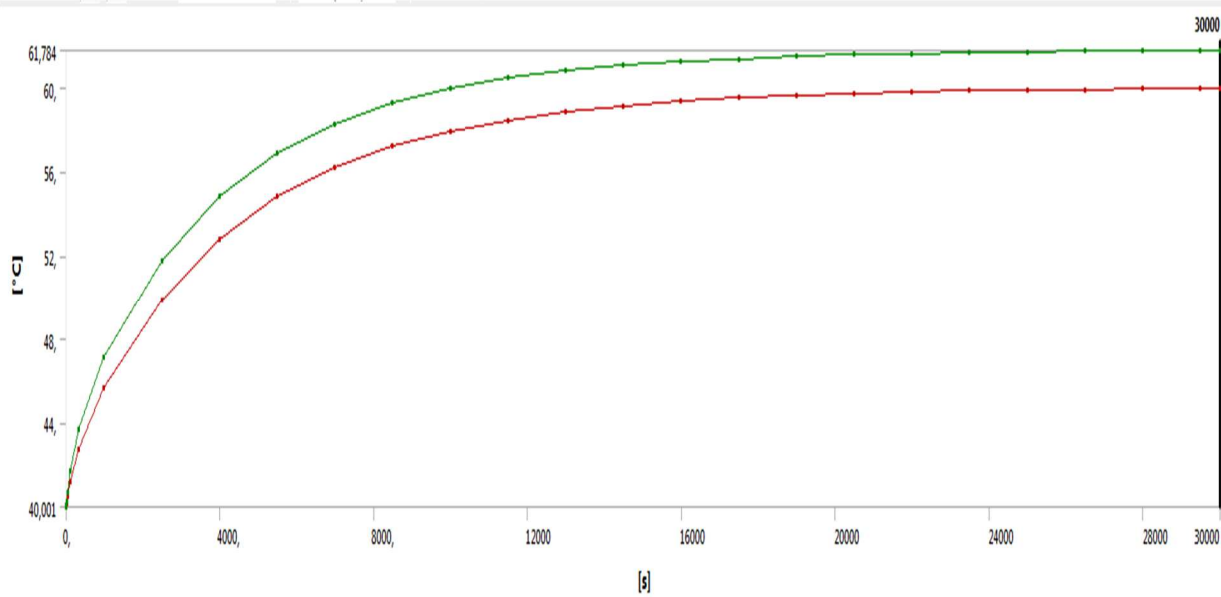
Obrázek 10.14: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.2



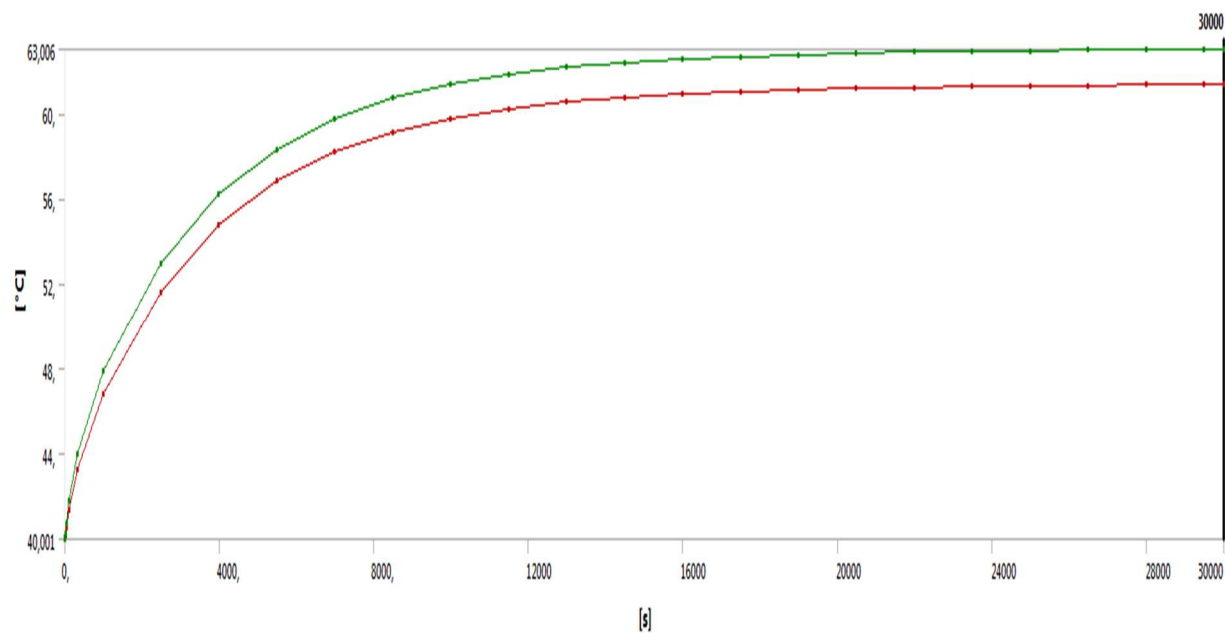
Obrázek 10.15: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.2



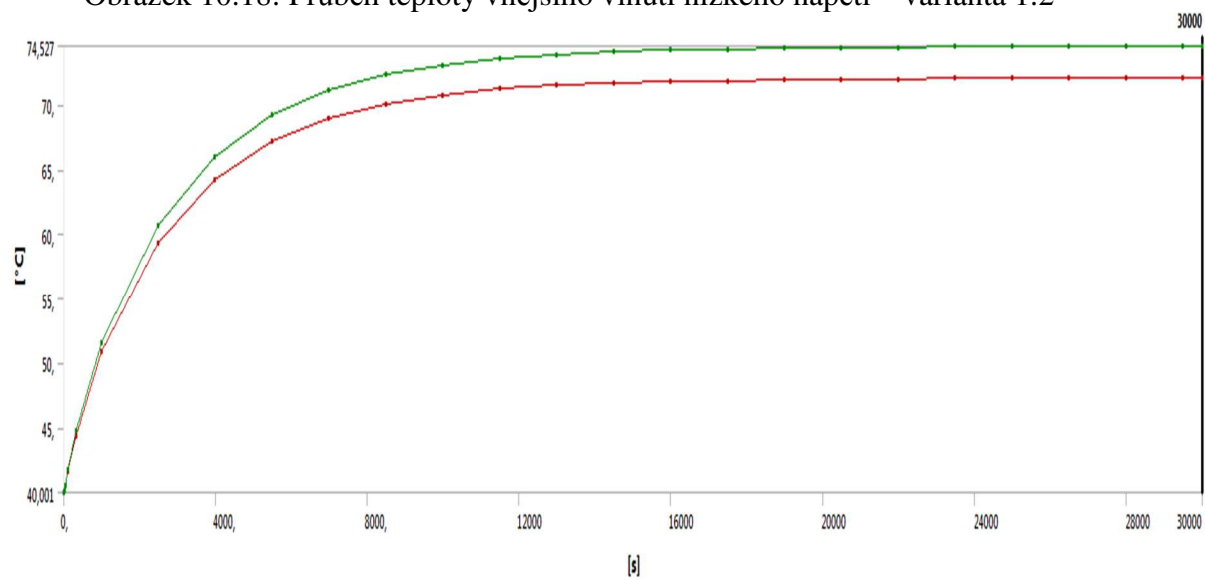
Obrázek 10.16: Průběh teploty jádra – varianta 1.2



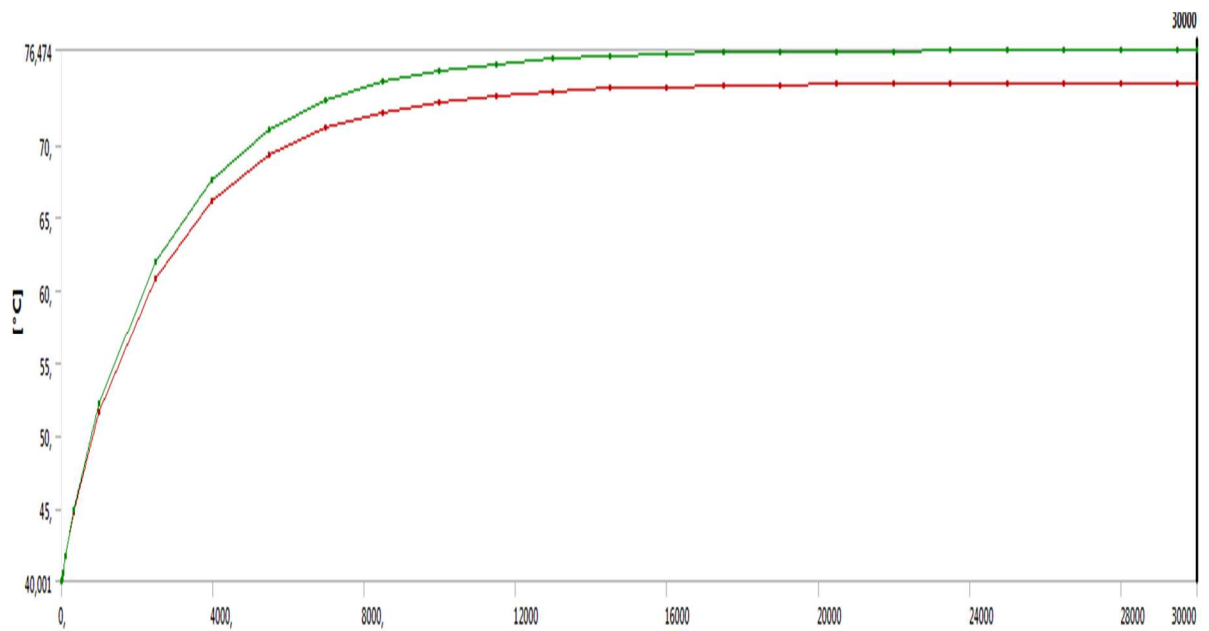
Obrázek 10.17: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.2



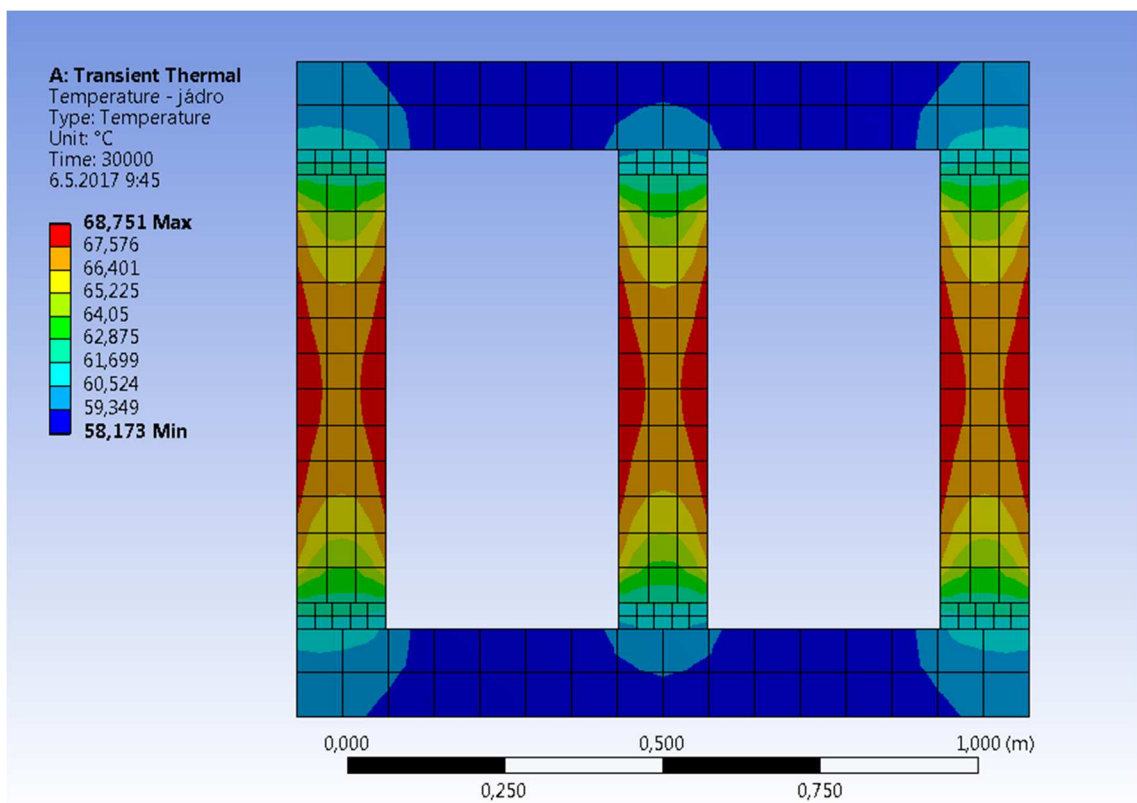
Obrázek 10.18: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.2



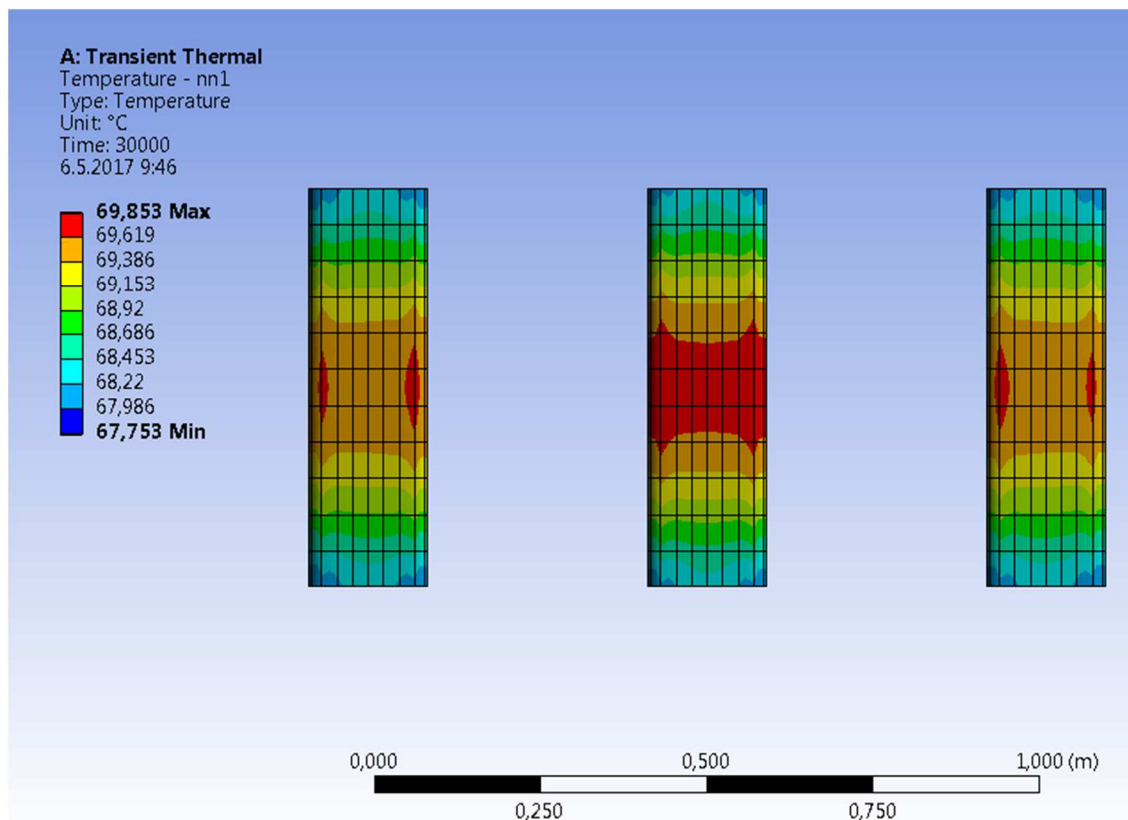
Obrázek 10.19: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.2



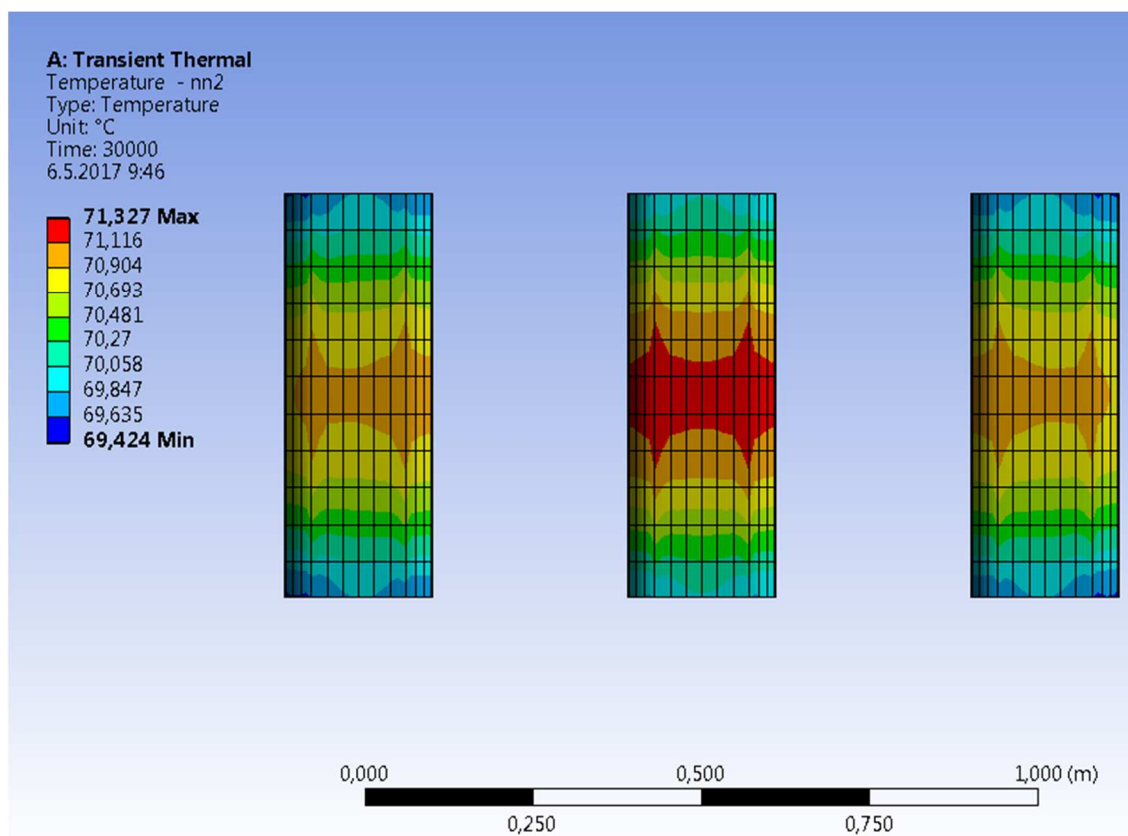
Obrázek 10.20: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.2



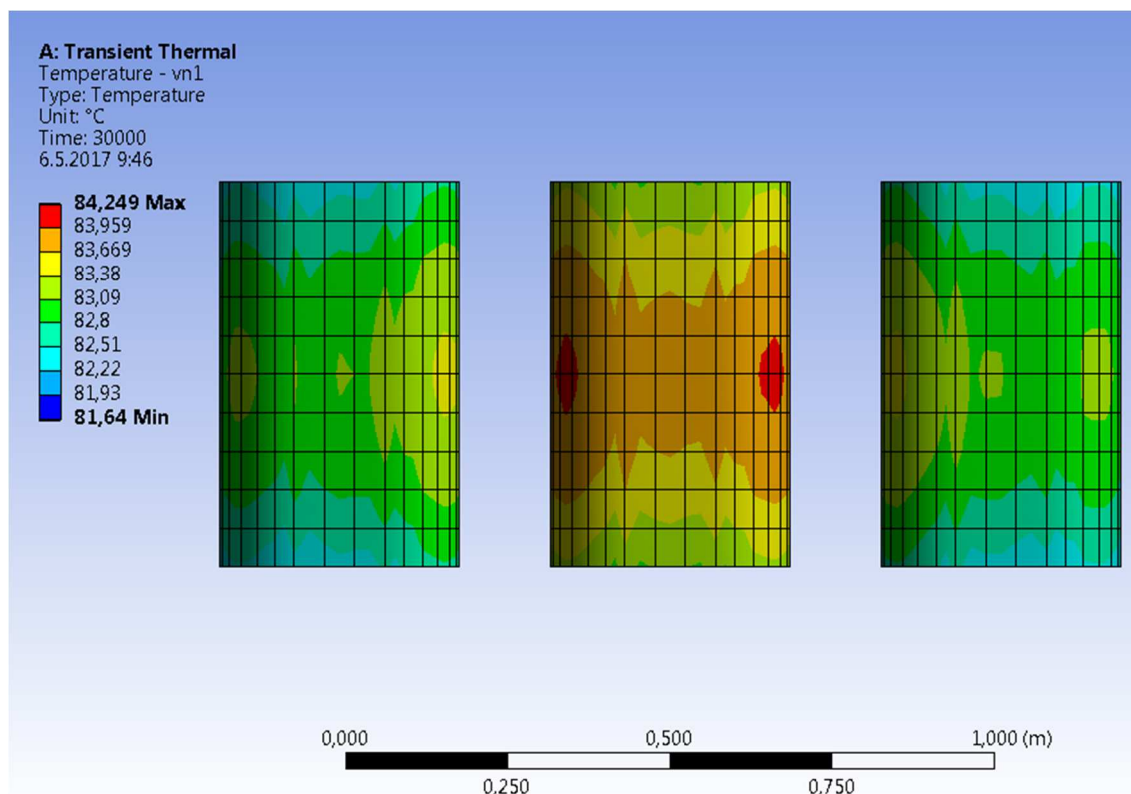
Obrázek 10.21: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.3



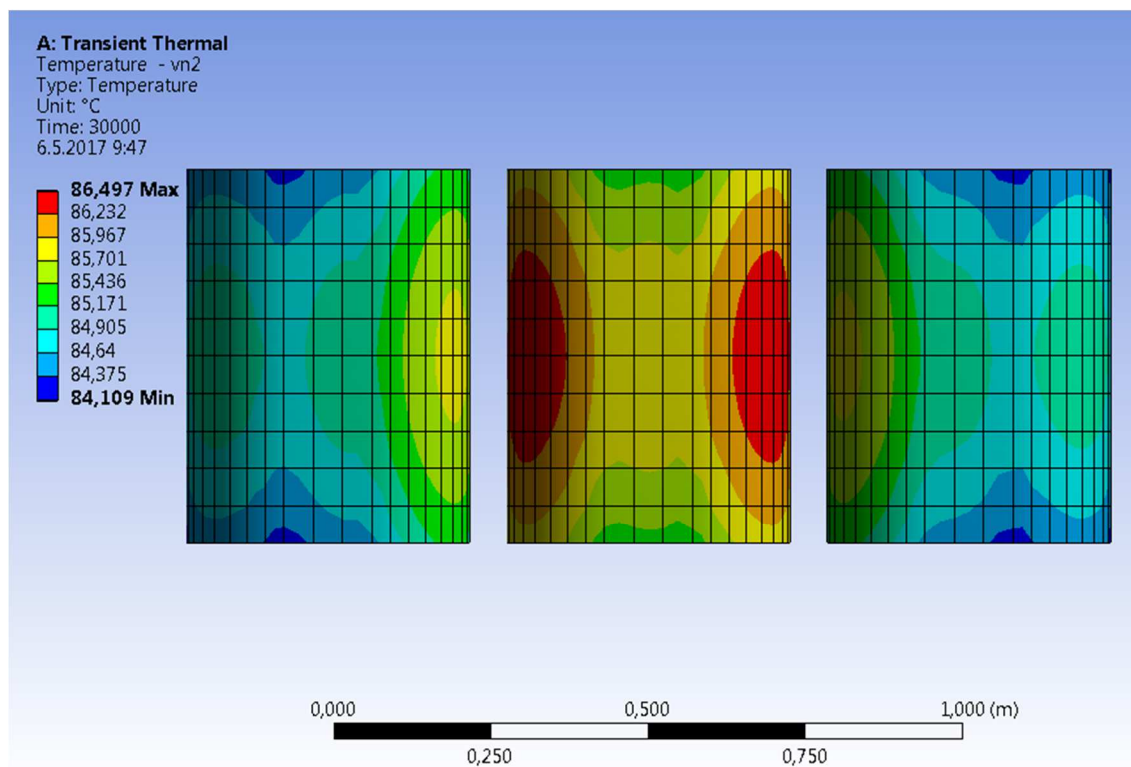
Obrázek 10.22: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.3



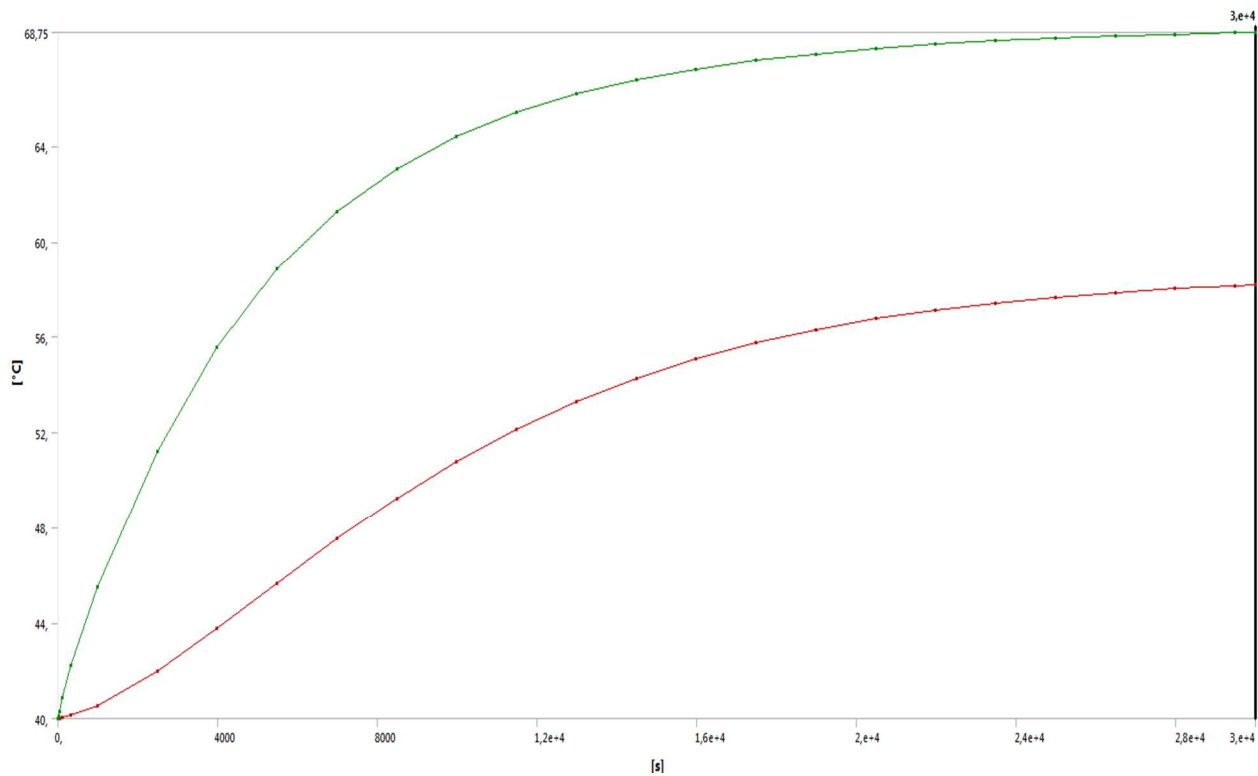
Obrázek 10.23: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.3



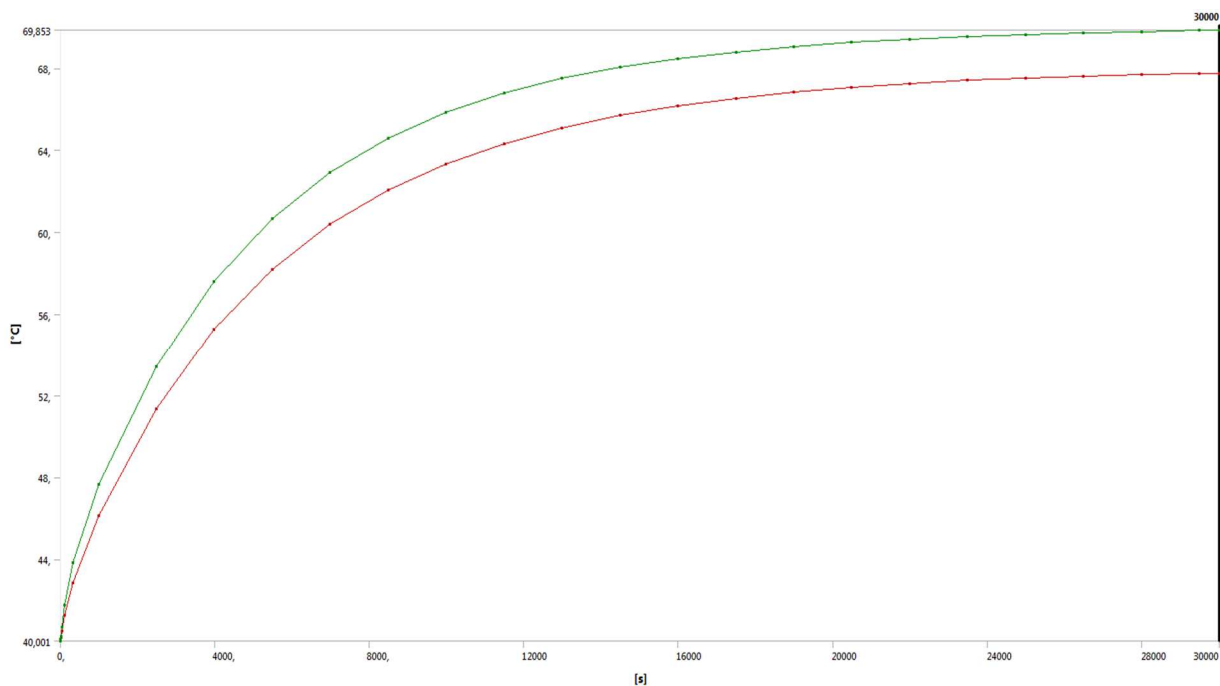
Obrázek 10.24: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.3



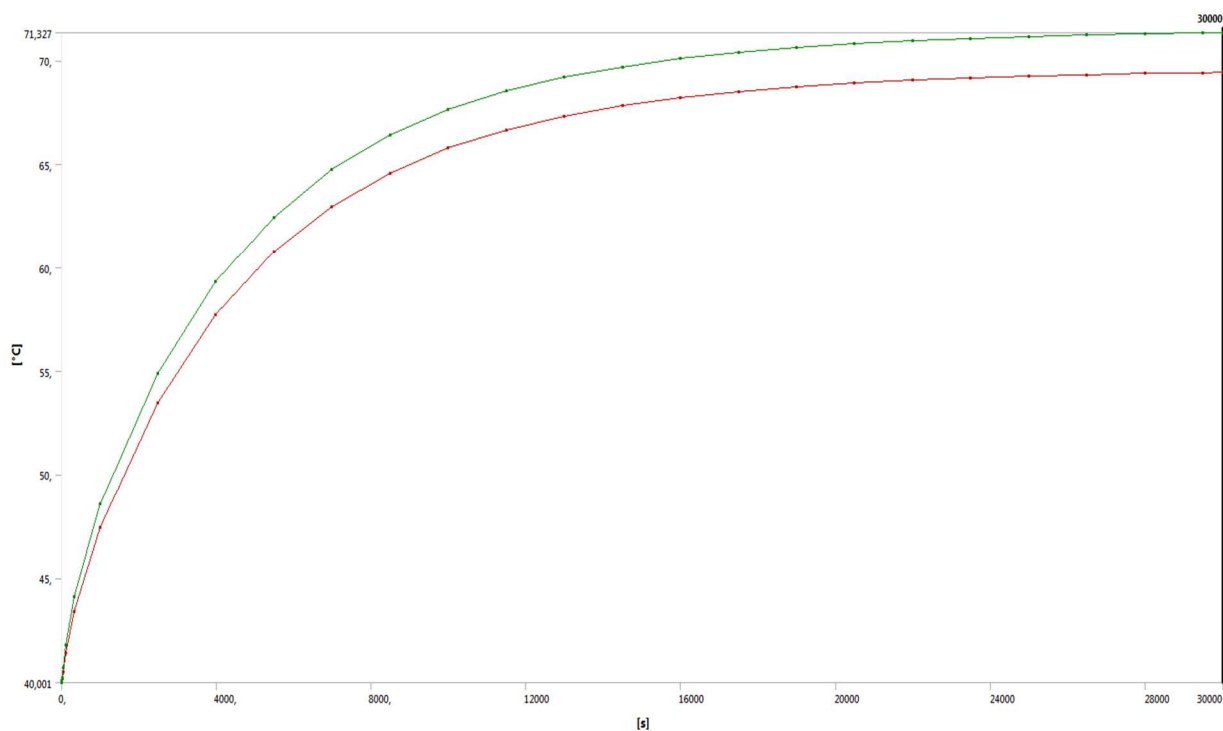
Obrázek 10.25: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.3



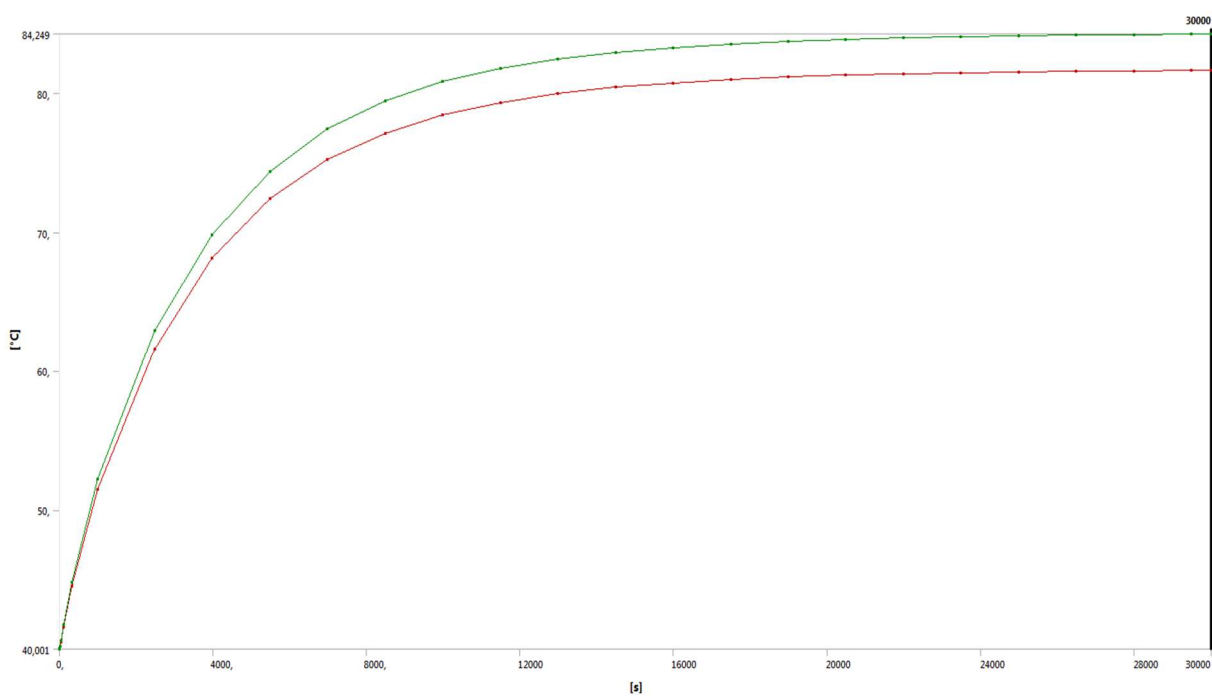
Obrázek 10.26: Průběh teploty jádra – varianta 1.3



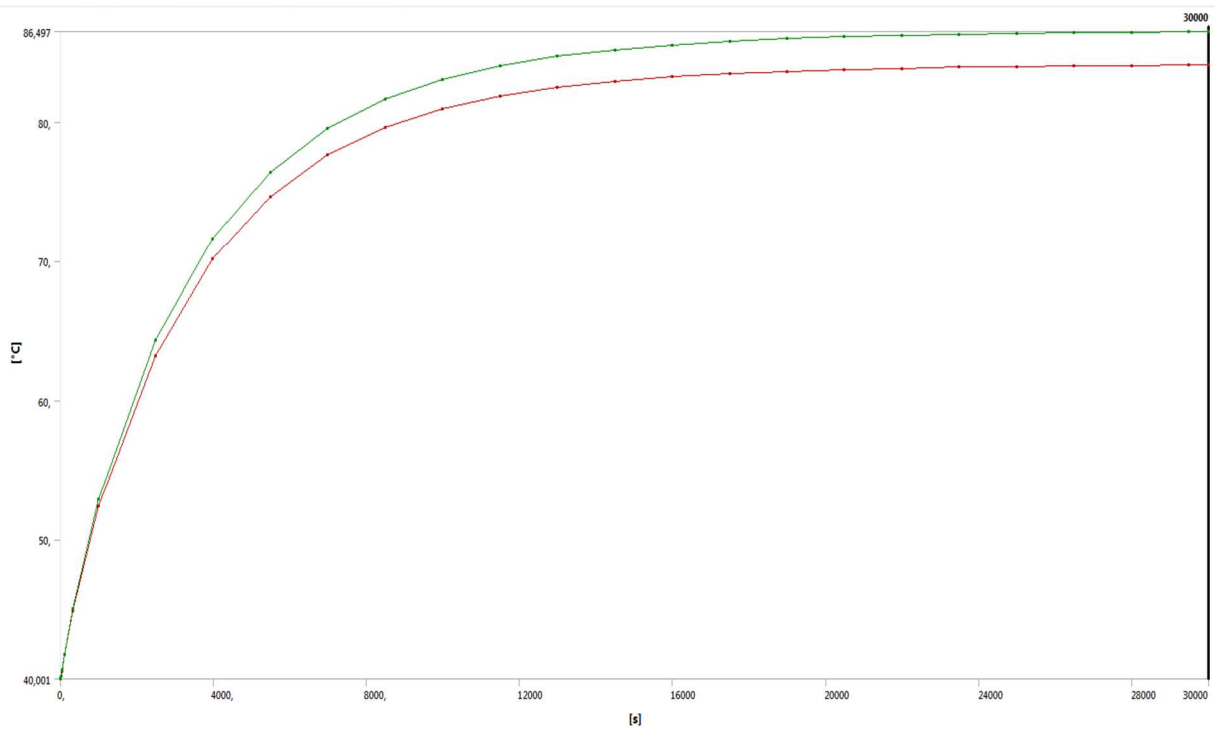
Obrázek 10.27: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.3



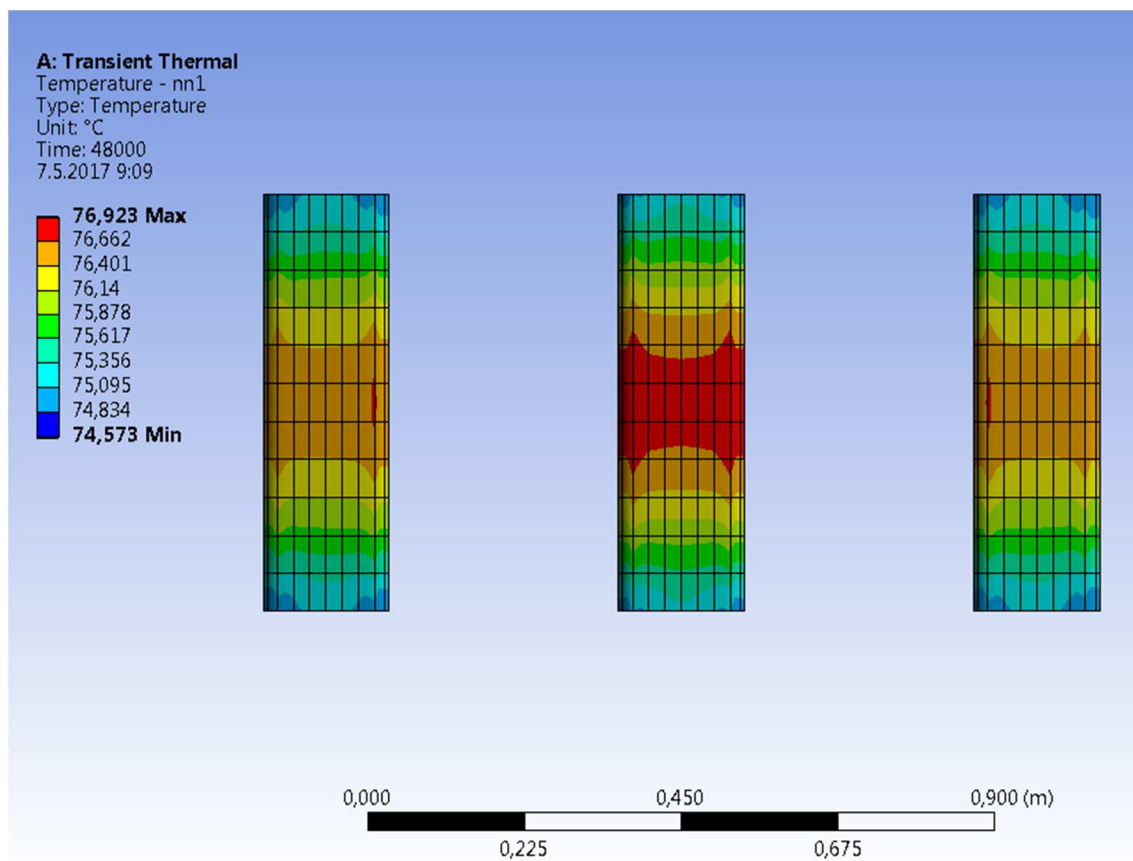
Obrázek 10.28: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.3



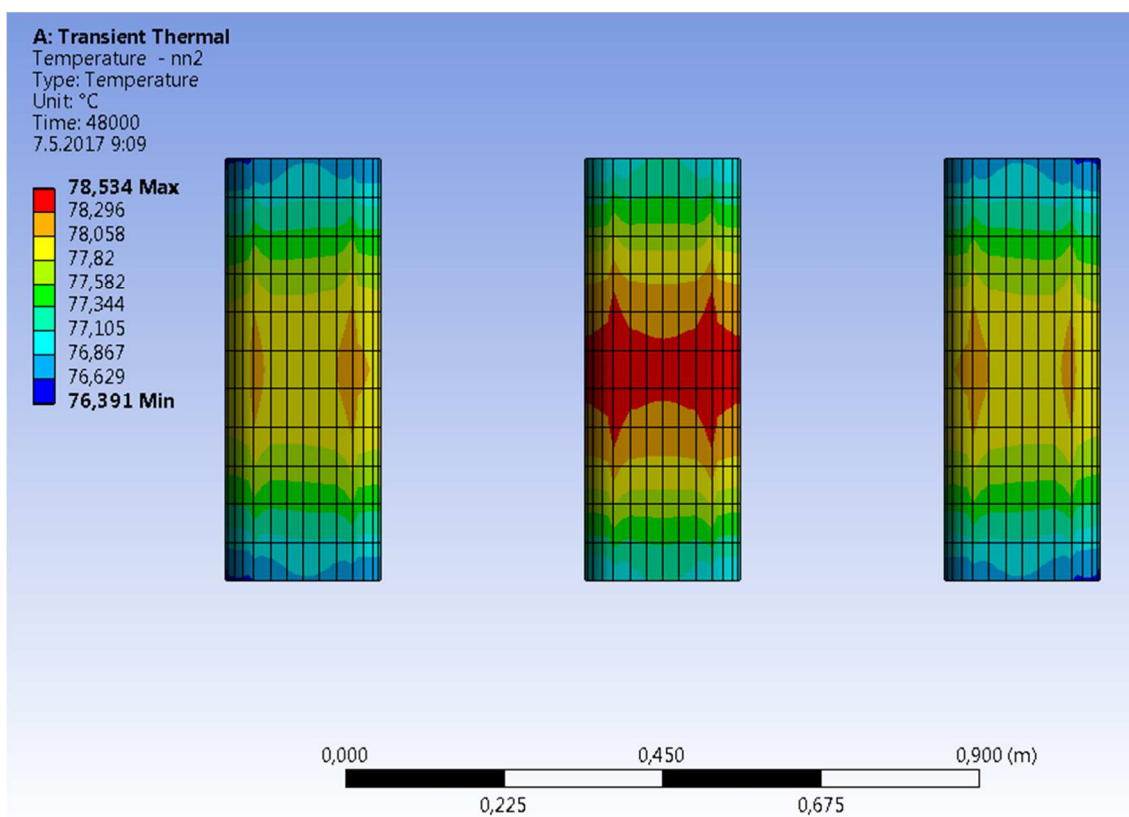
Obrázek 10.29: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.3



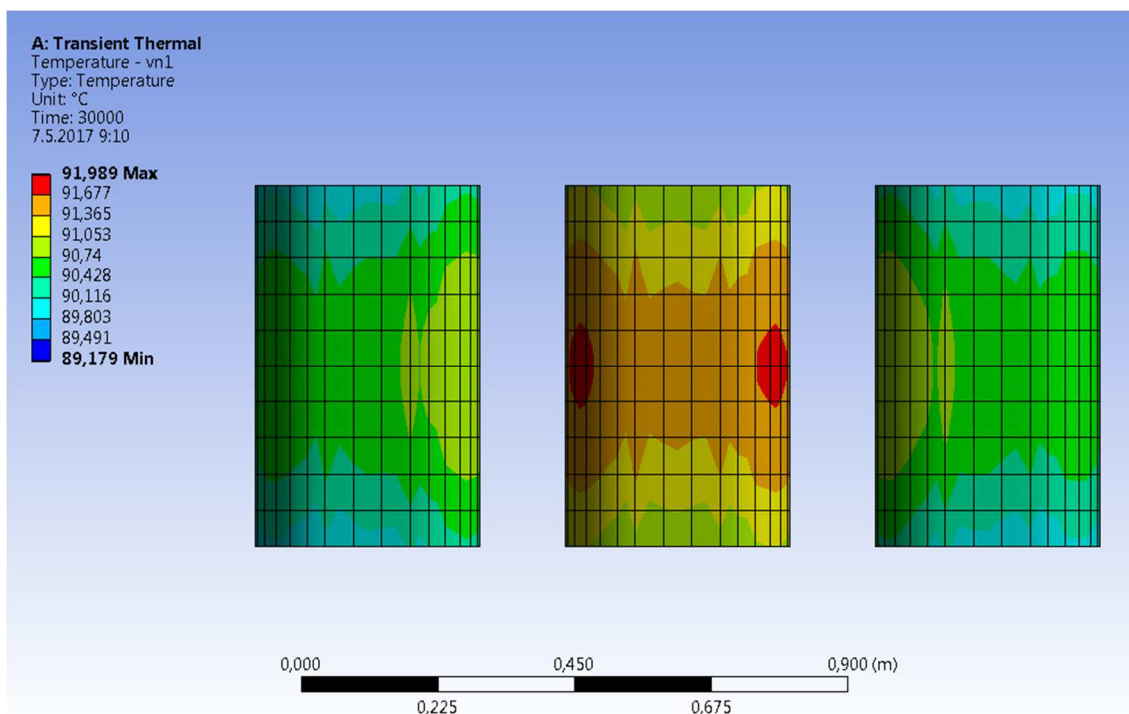
Obrázek 10.30: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.3



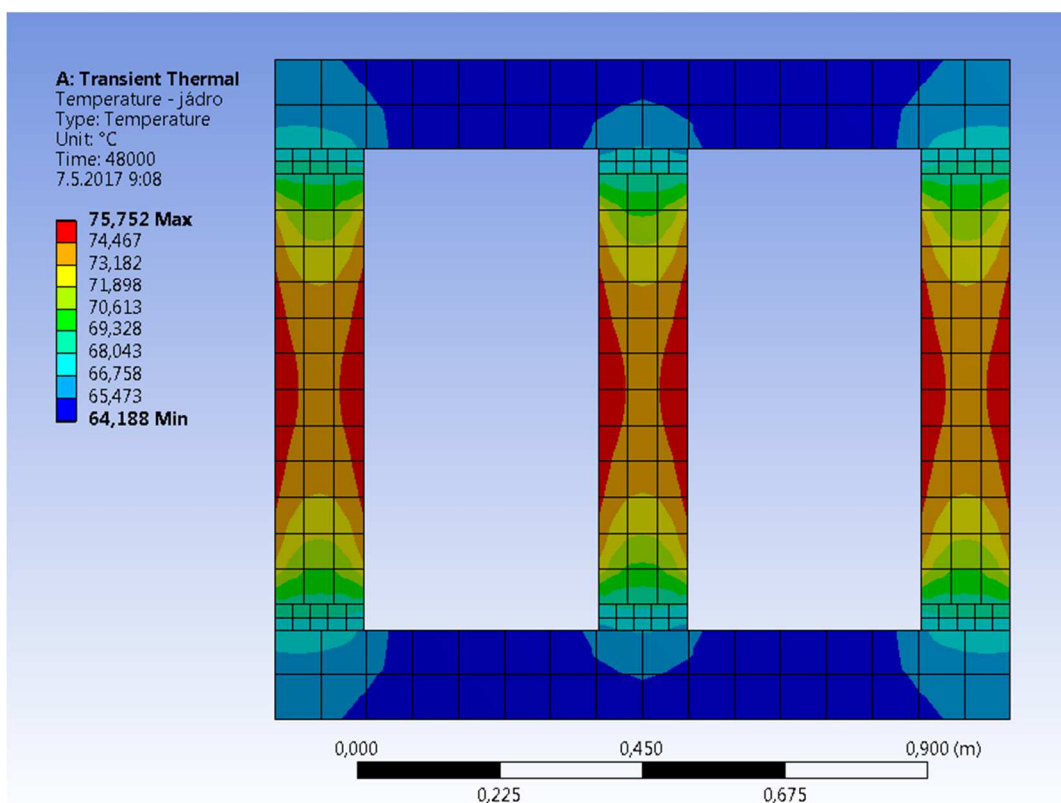
Obrázek 10.31: Rozložení teploty vinutí vnitřního nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.4



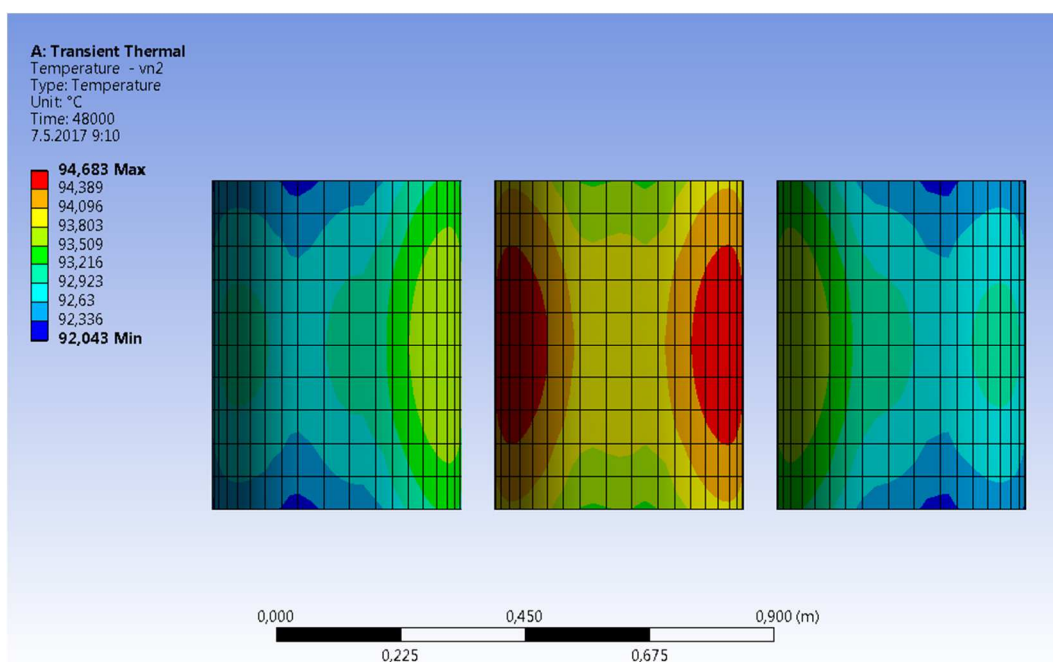
Obrázek 10.32: Rozložení teploty vnějšího vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 1.4



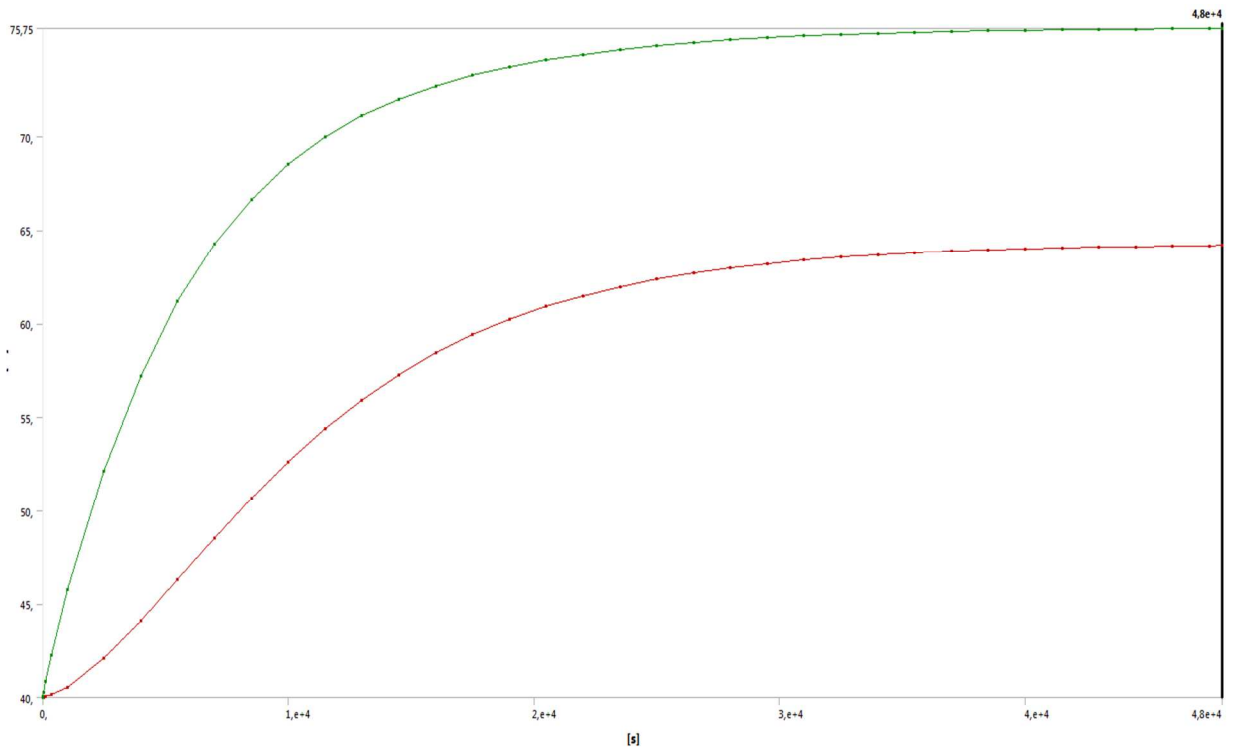
Obrázek 10.33: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.4



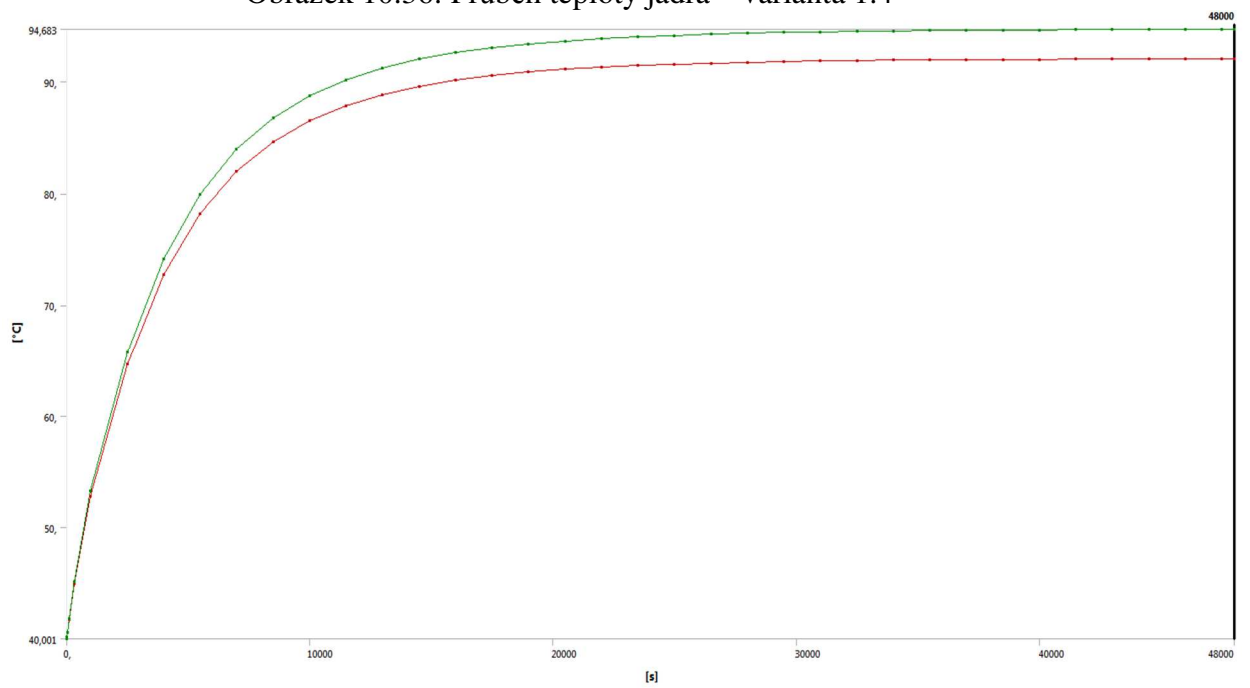
Obrázek 10.34: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 1.4



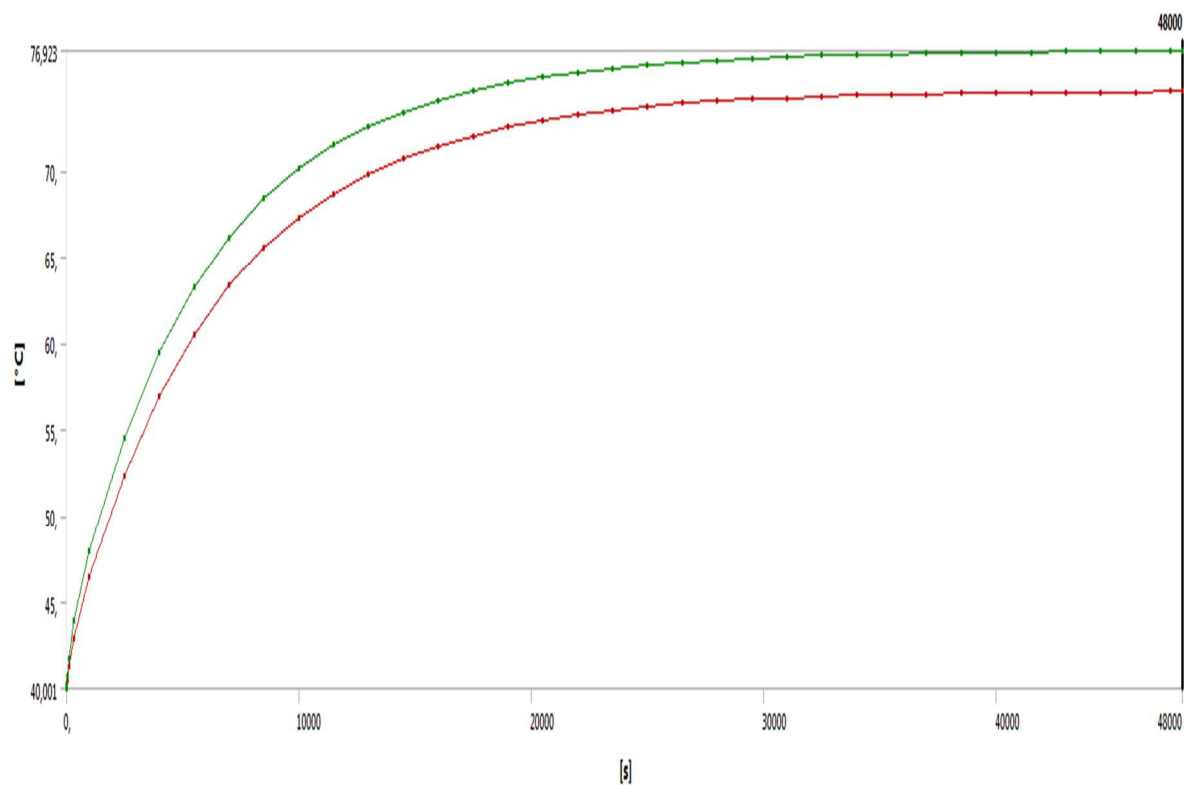
Obrázek 10.35: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 1.4



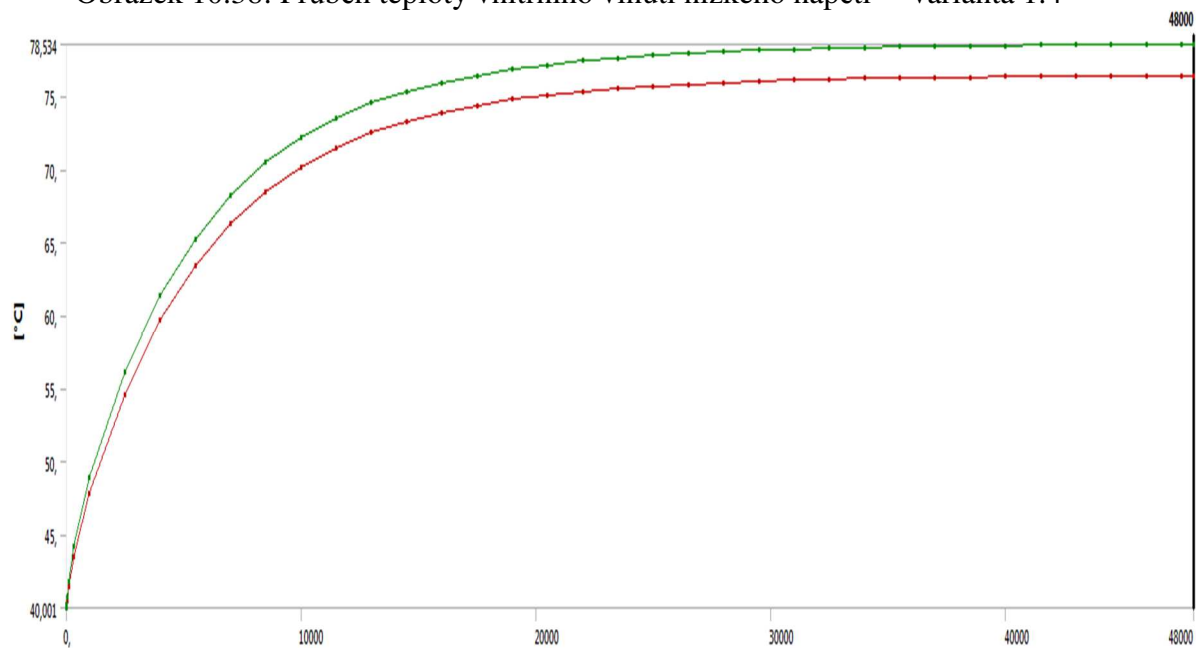
Obrázek 10.36: Průběh teploty jádra – varianta 1.4



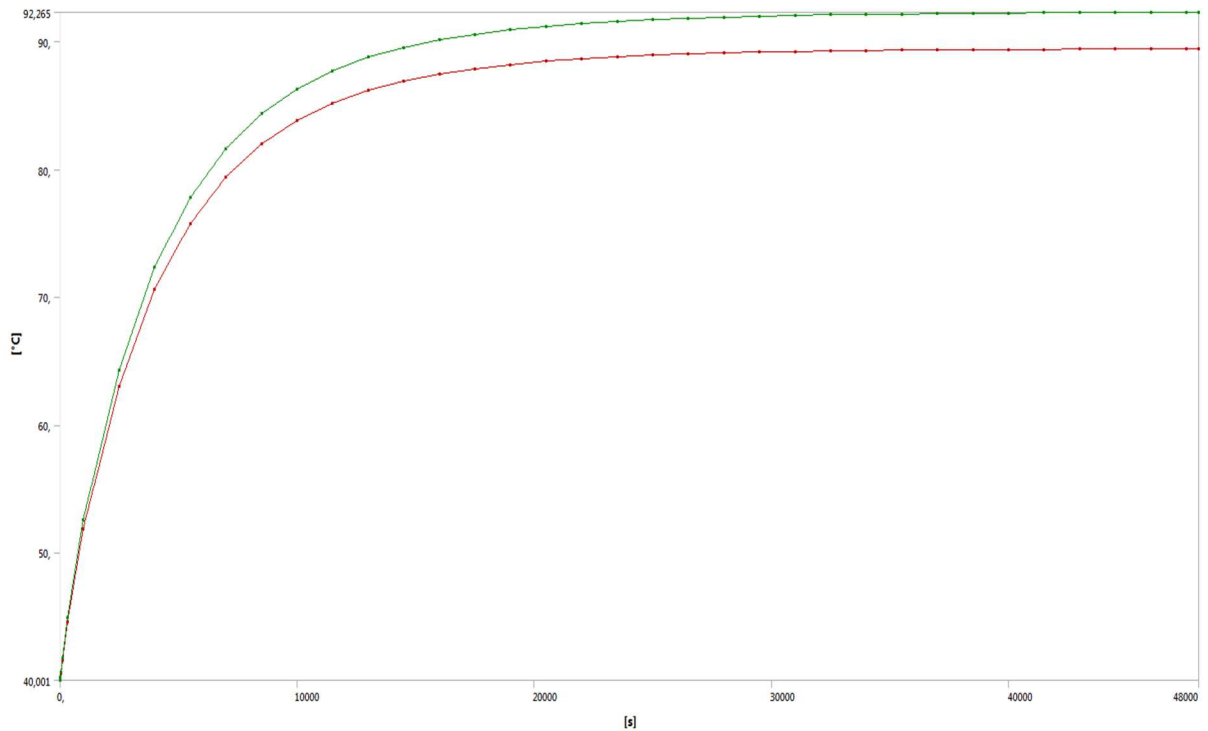
Obrázek 10.37: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 1.4



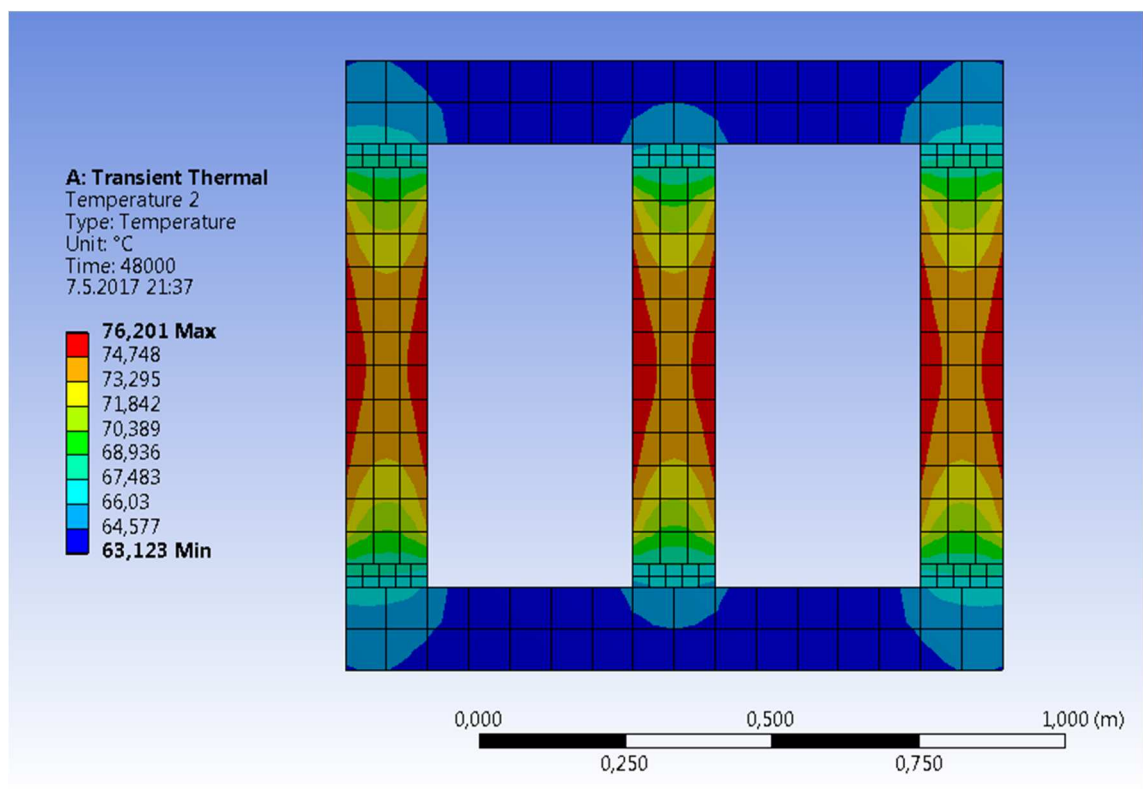
Obrázek 10.38: Průběh teploty vnitřního vinutí nízkého napětí – varianta 1.4



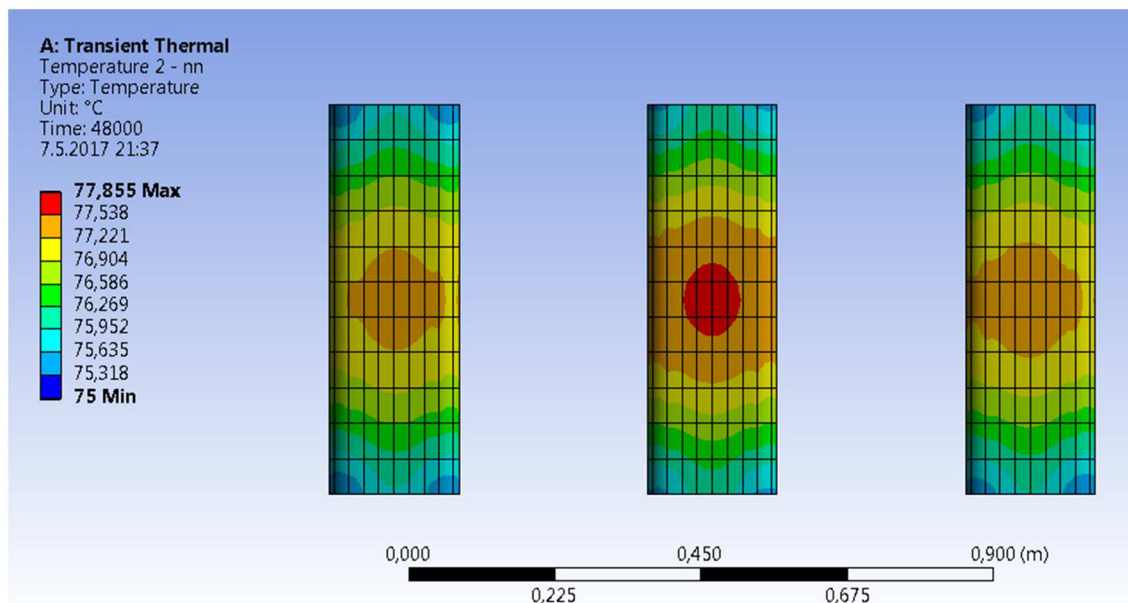
Obrázek 10.39: Průběh teploty vnějšího vinutí nízkého napětí – varianta 1.4



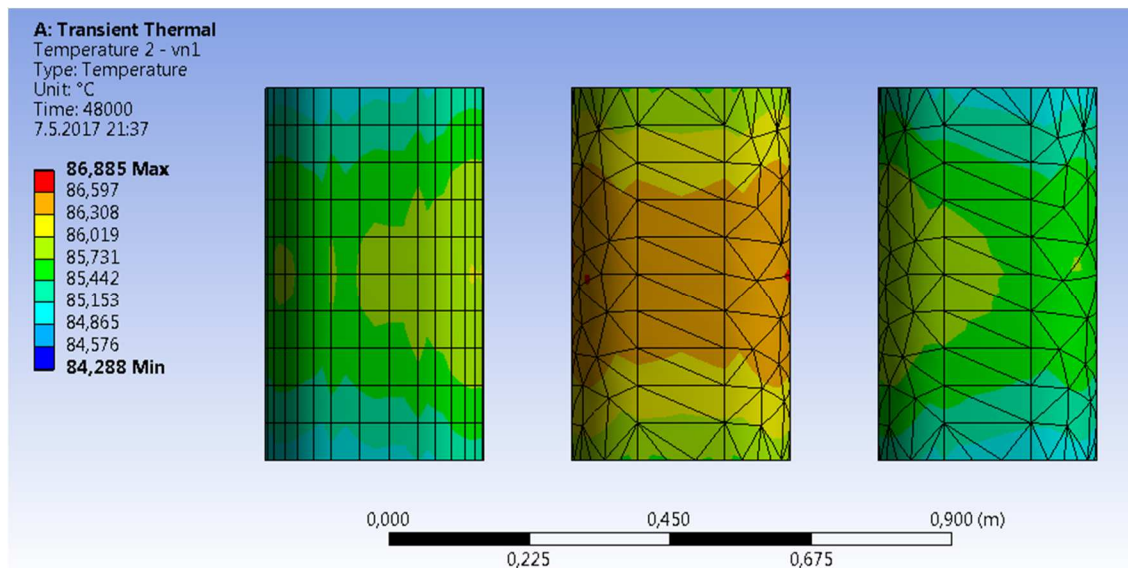
Obrázek 10.40: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 1.4



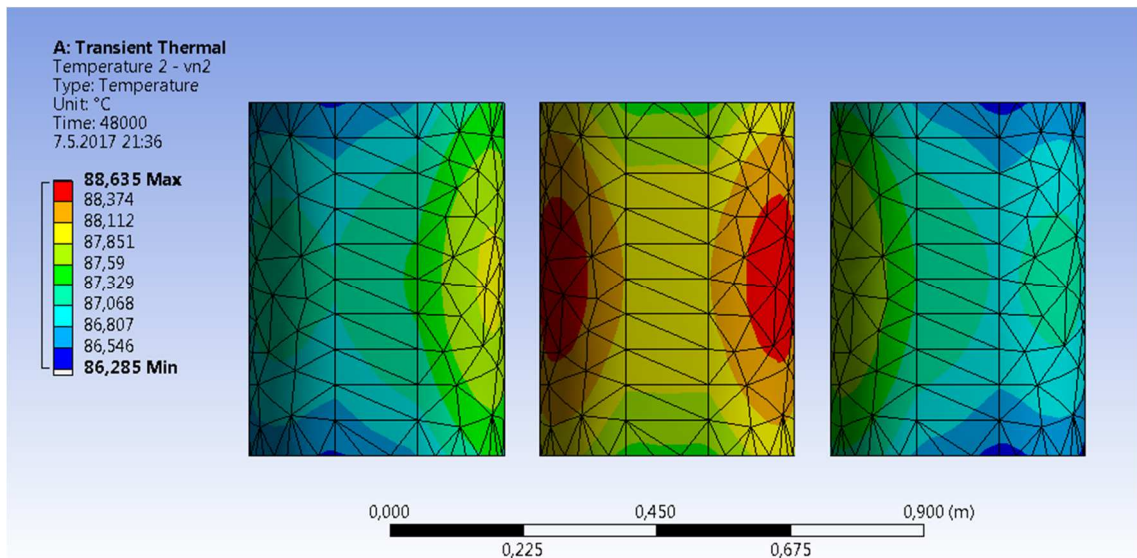
Obrázek 10.41: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 2.1



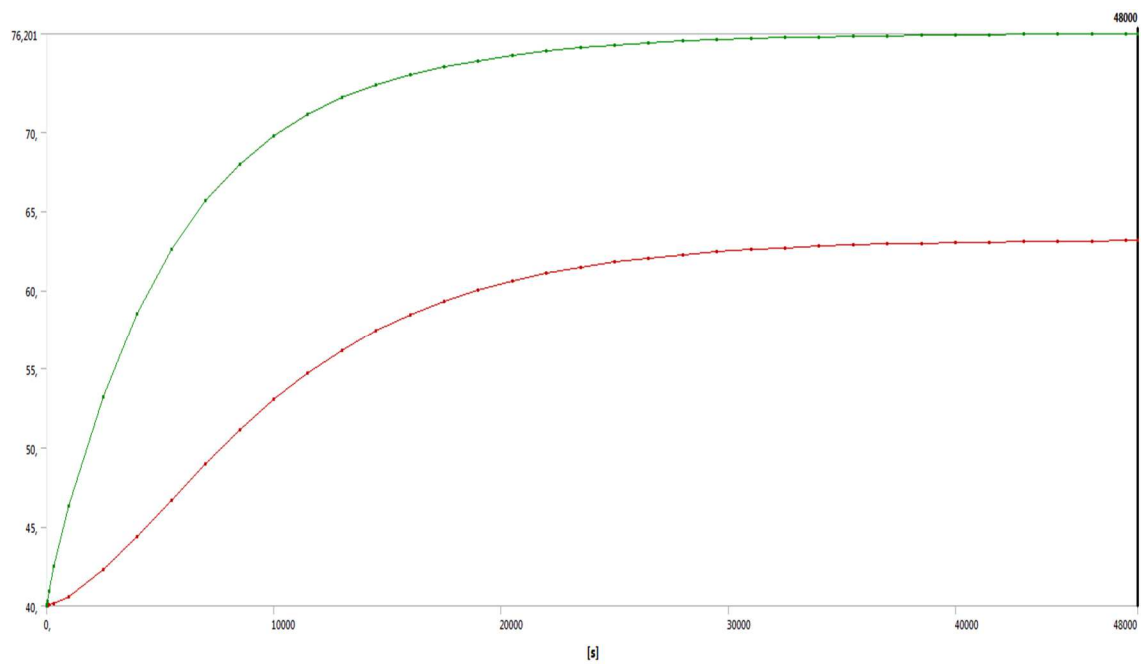
Obrázek 10.42: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 2.1



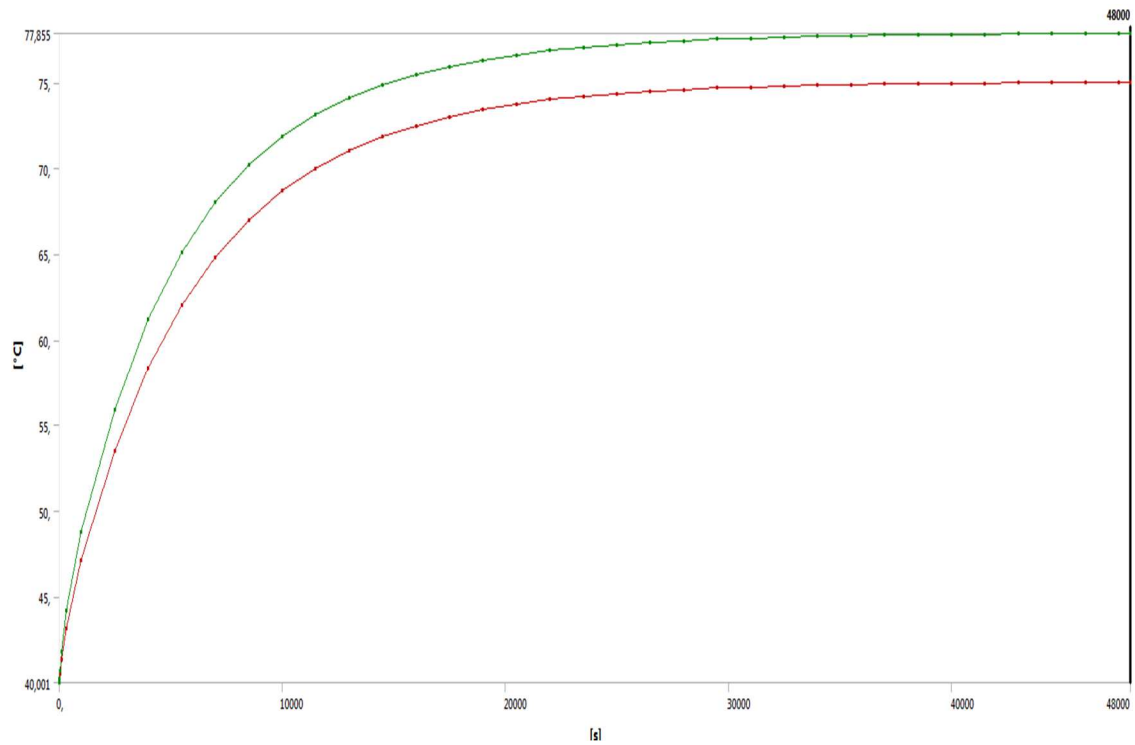
Obrázek 10.43: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.1



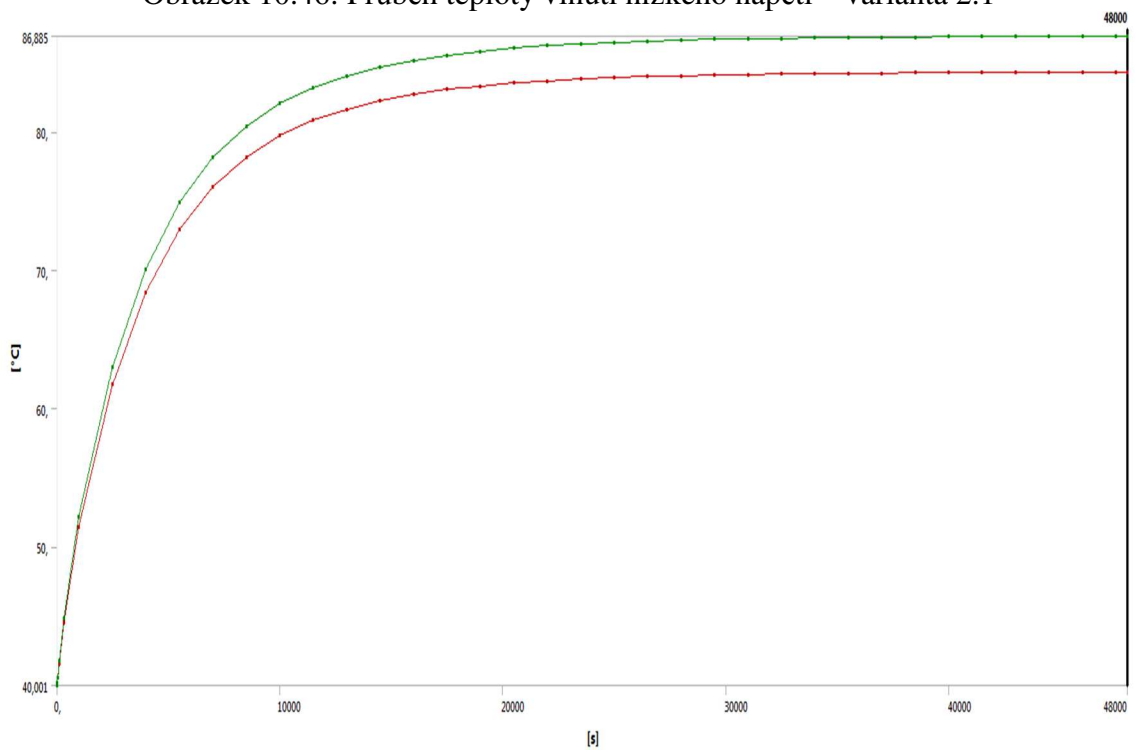
Obrázek 10.44: Rozložení teploty vnějšího vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.1



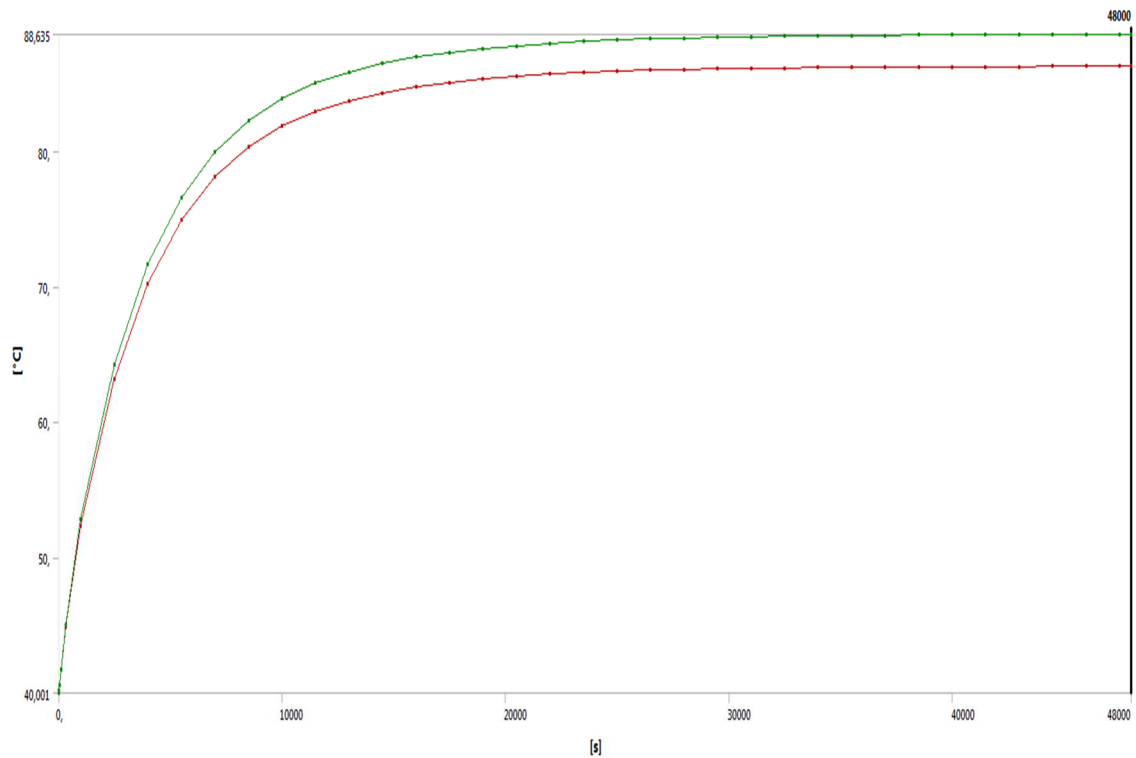
Obrázek 10.45: Průběh teploty jádra – varianta 2.1



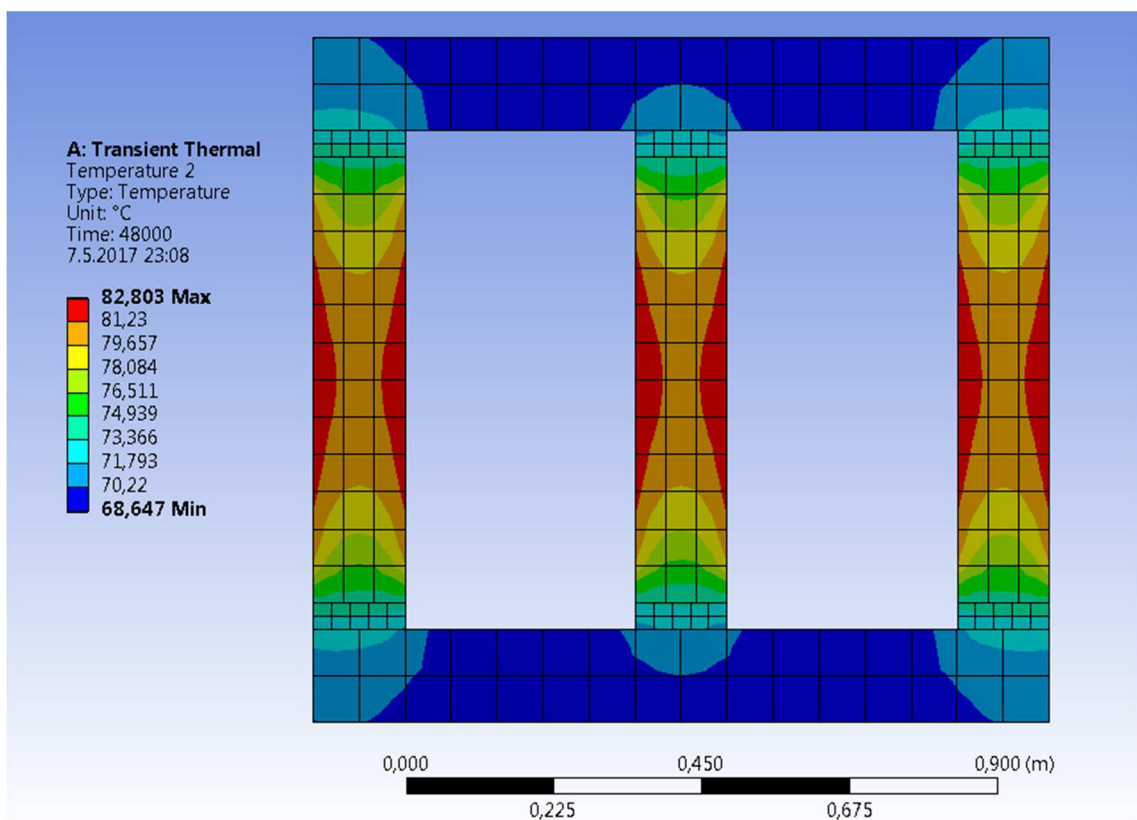
Obrázek 10.46: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 2.1



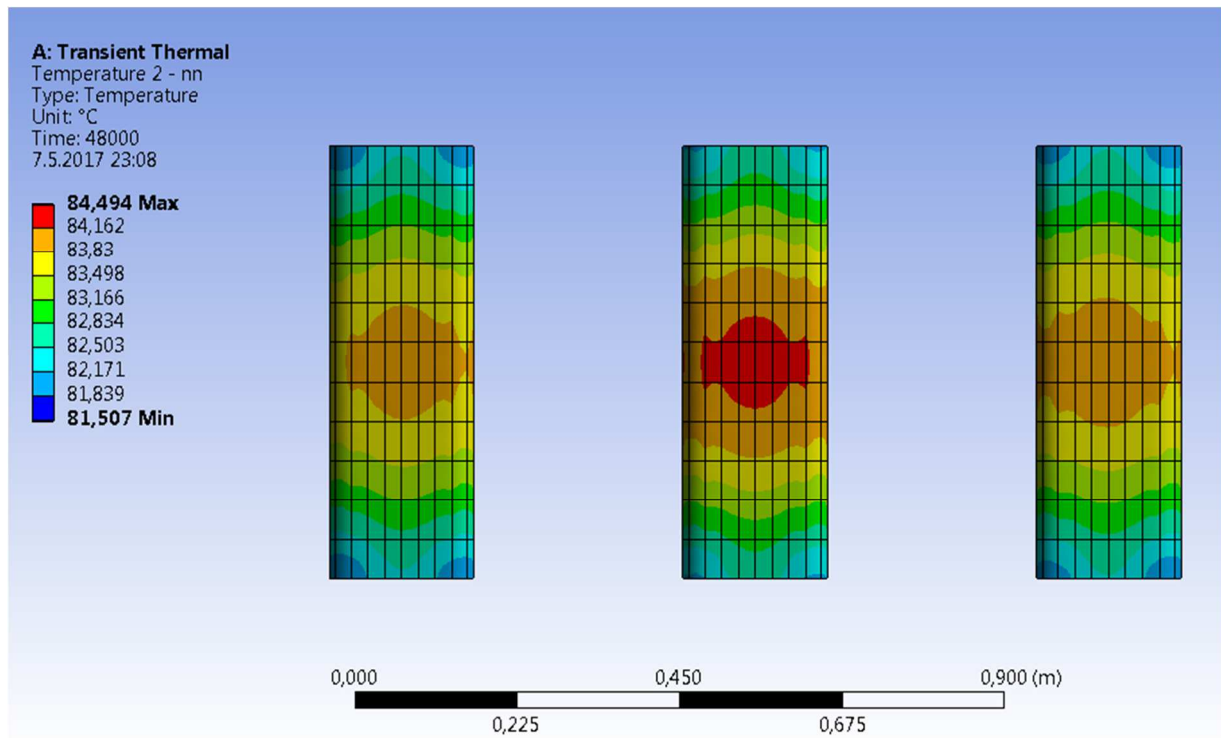
Obrázek 10.47: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 2.1



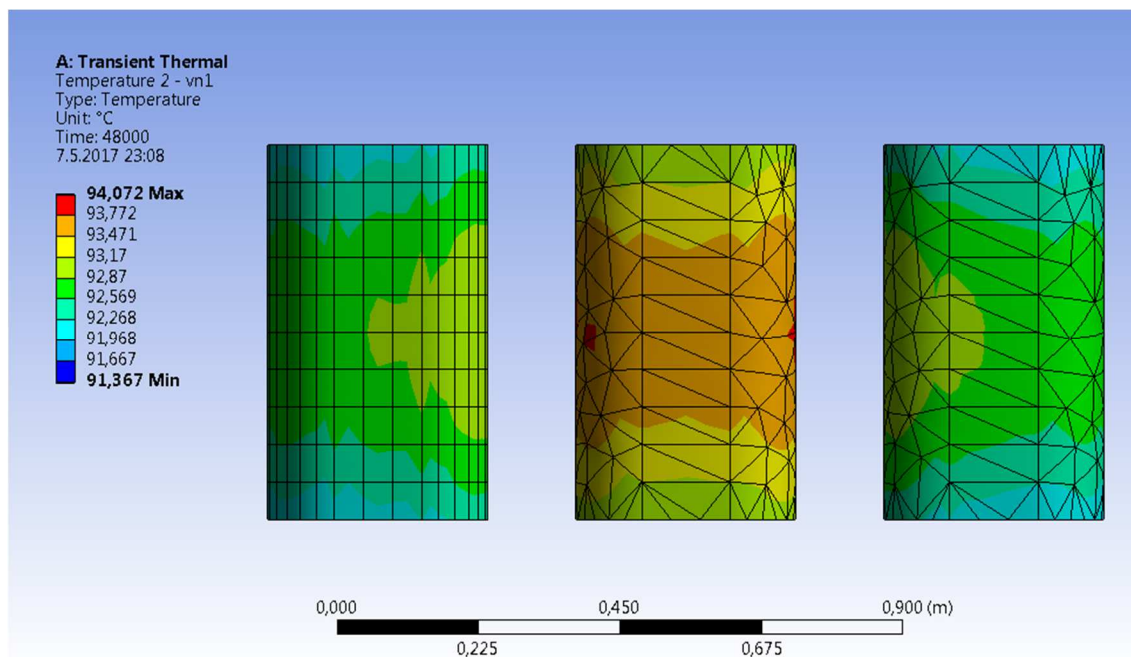
Obrázek 10.48: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 2.1



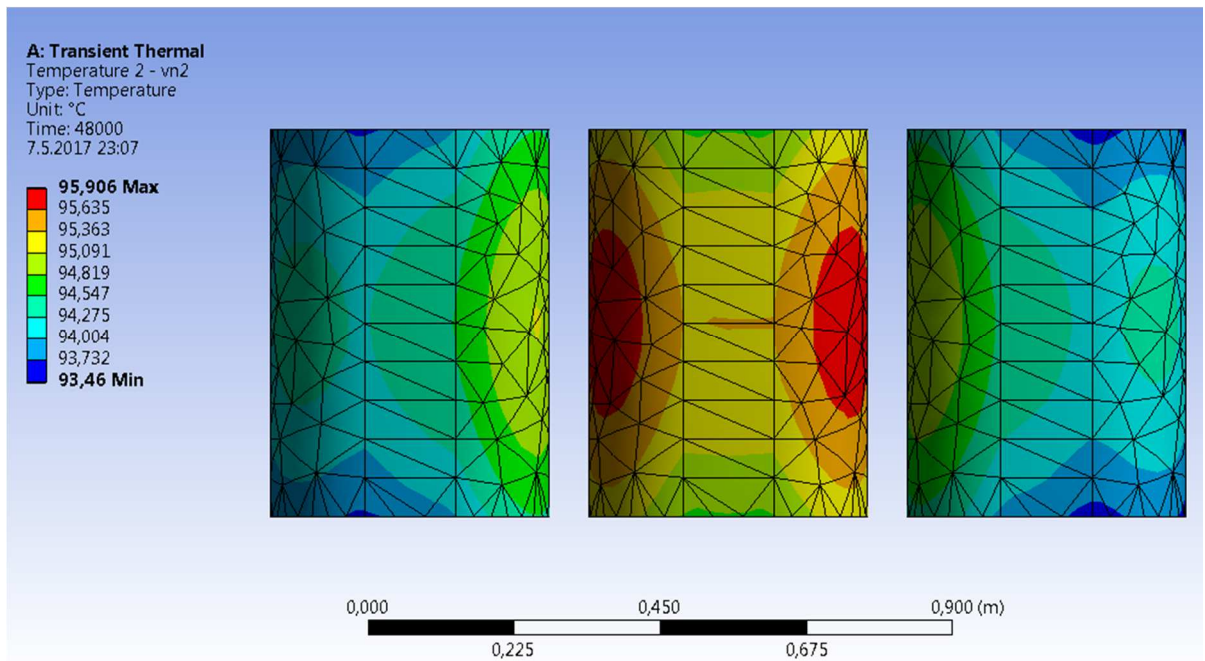
Obrázek 10.49: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 2.2



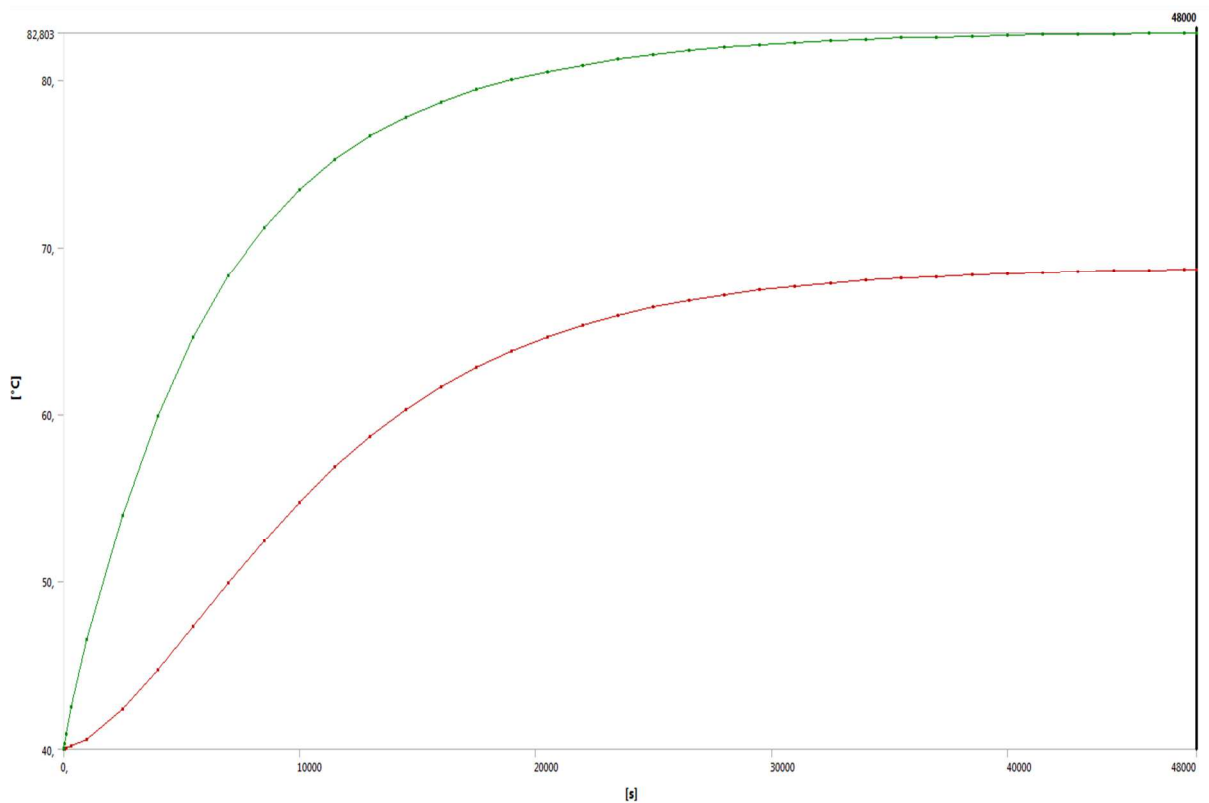
Obrázek 10.50: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 2.2



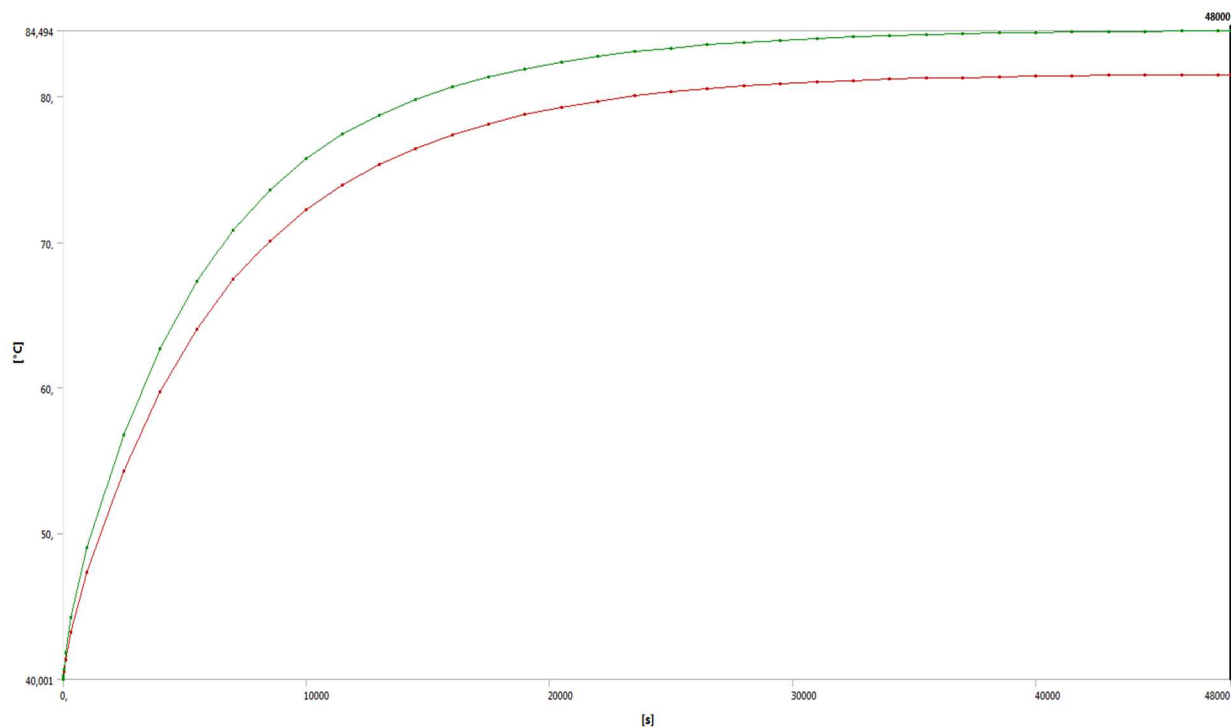
Obrázek 10.51: Rozložení teploty vnitřního vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.2



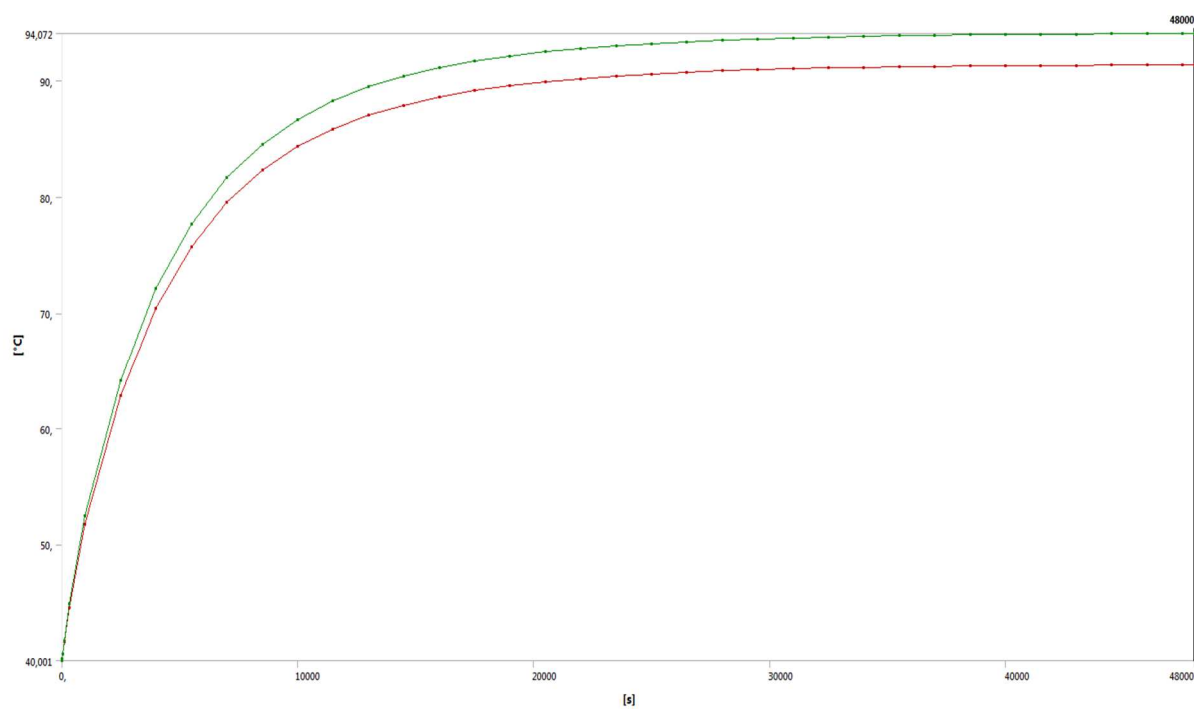
Obrázek 10.52: Rozložení teploty vinutí vnějšího vysokého napětí na konci simulace – varianta 2.2



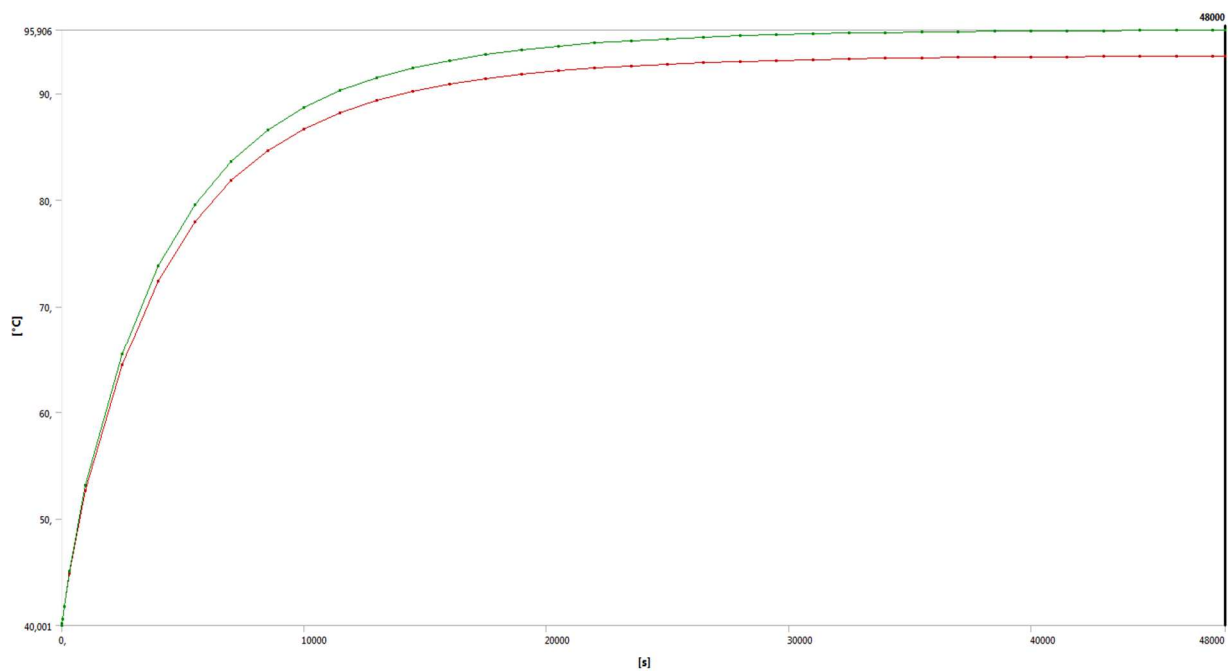
Obrázek 10.53: Průběh teploty jádra – varianta 2.2



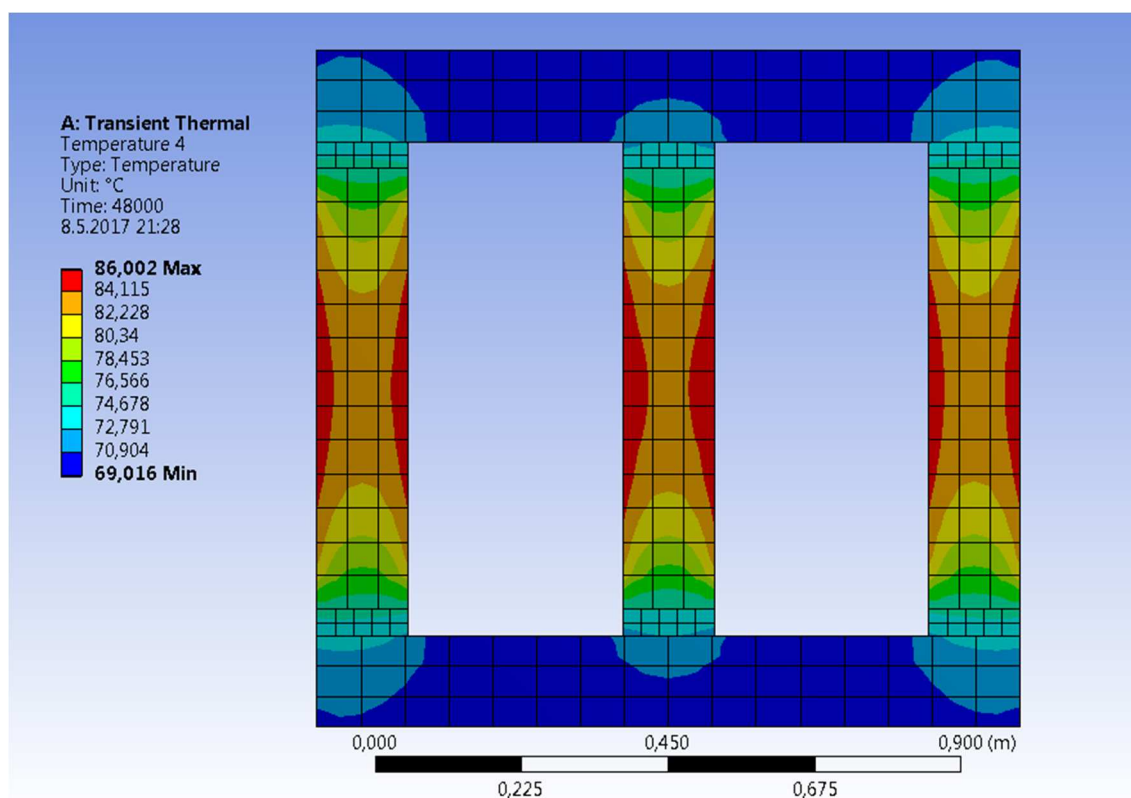
Obrázek 10.54: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 2.2



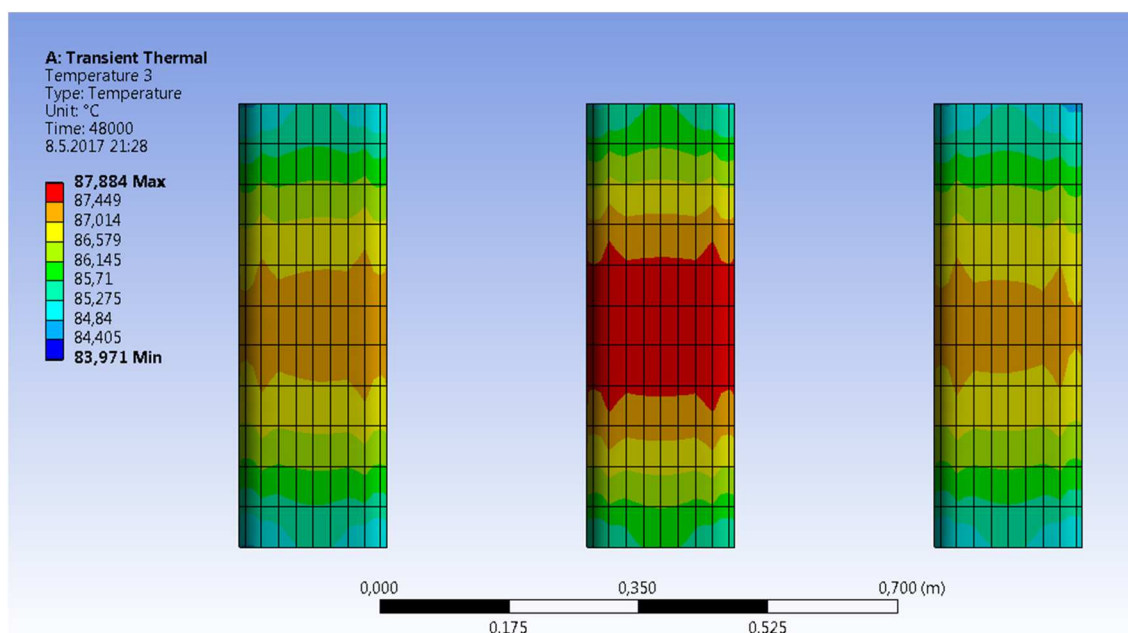
Obrázek 10.55: Průběh teploty vnitřního vinutí vysokého napětí – varianta 2.2



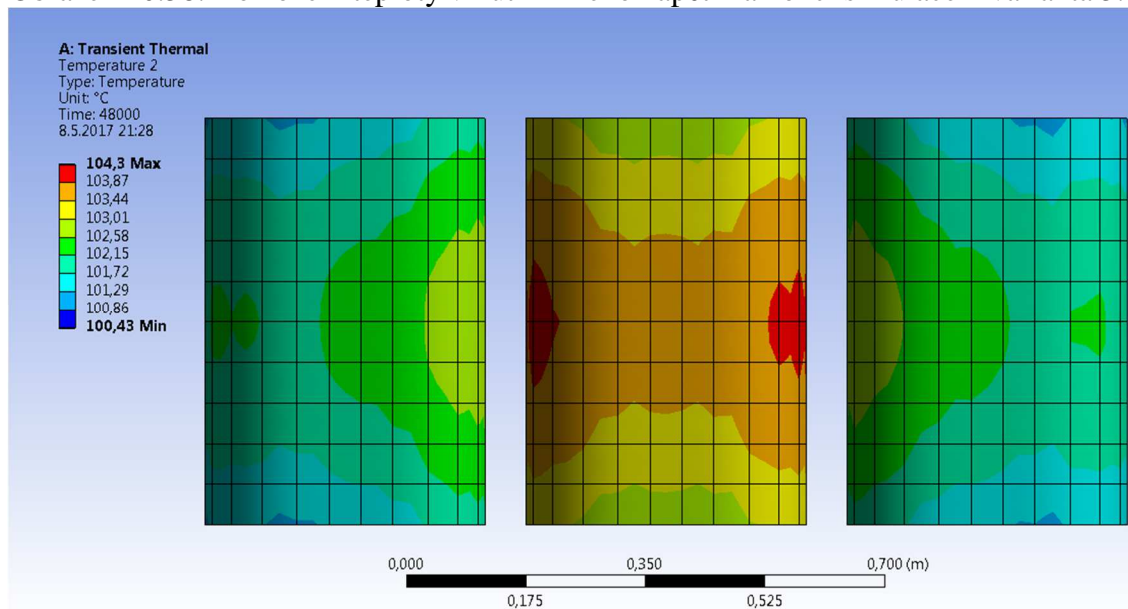
Obrázek 10.56: Průběh teploty vnějšího vinutí vysokého napětí – varianta 2.2



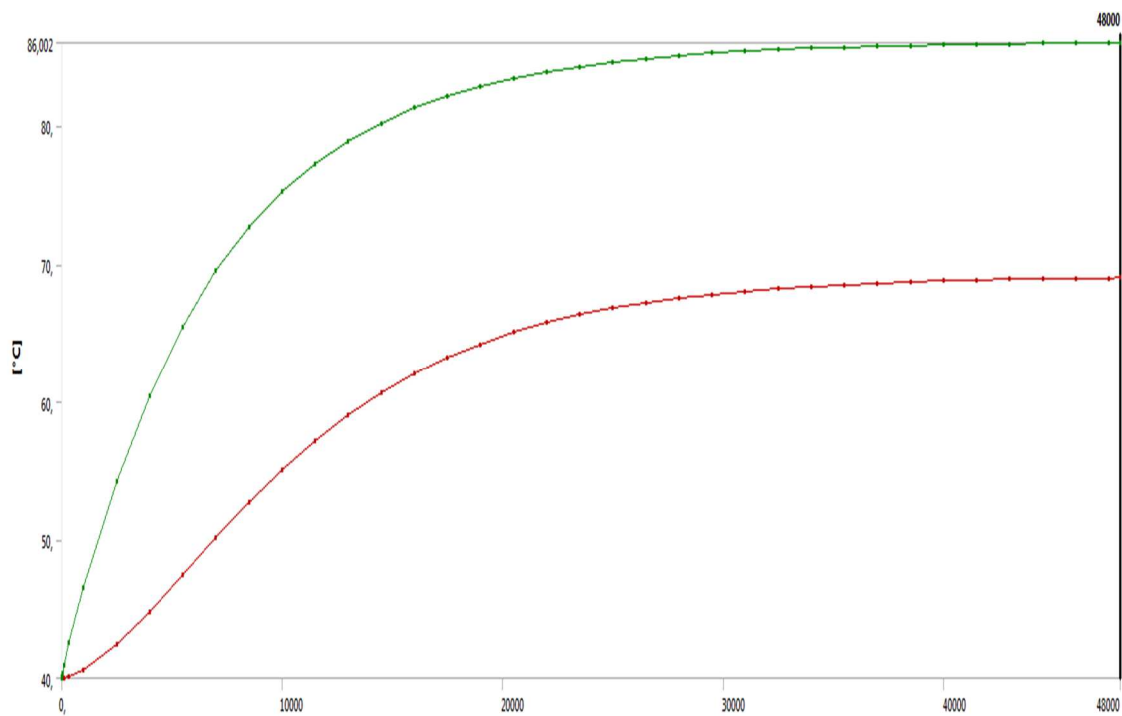
Obrázek 10.57: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 3.1



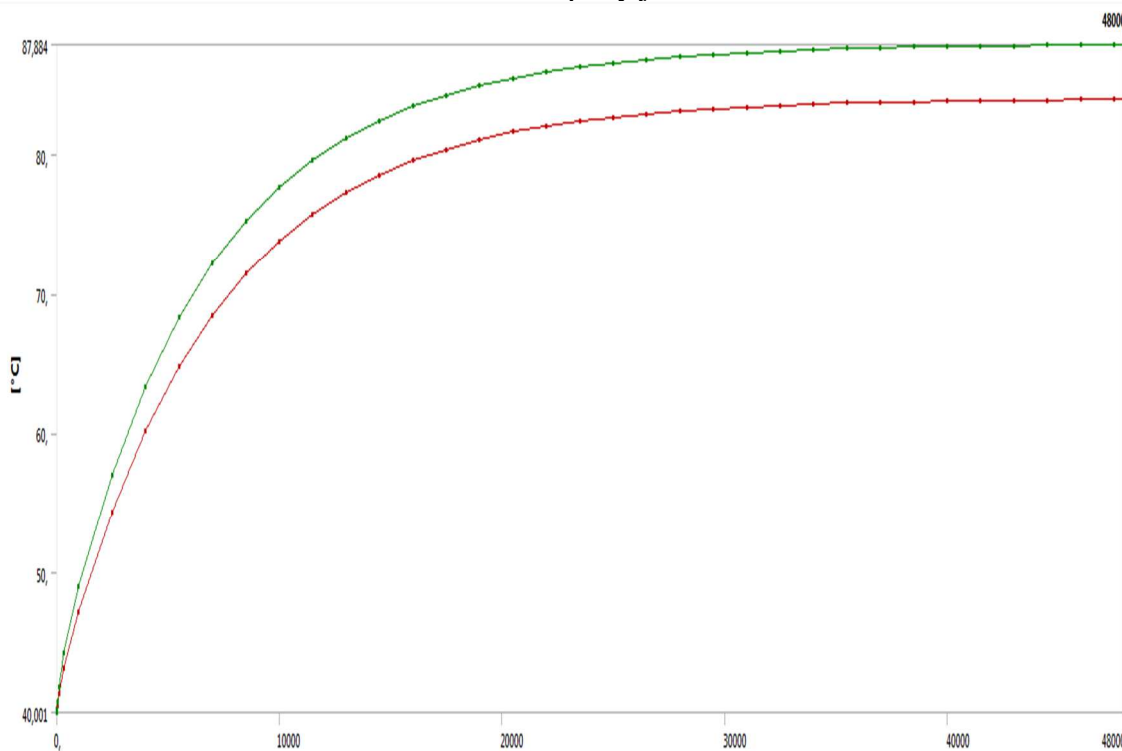
Obrázek 10.58: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 3.1



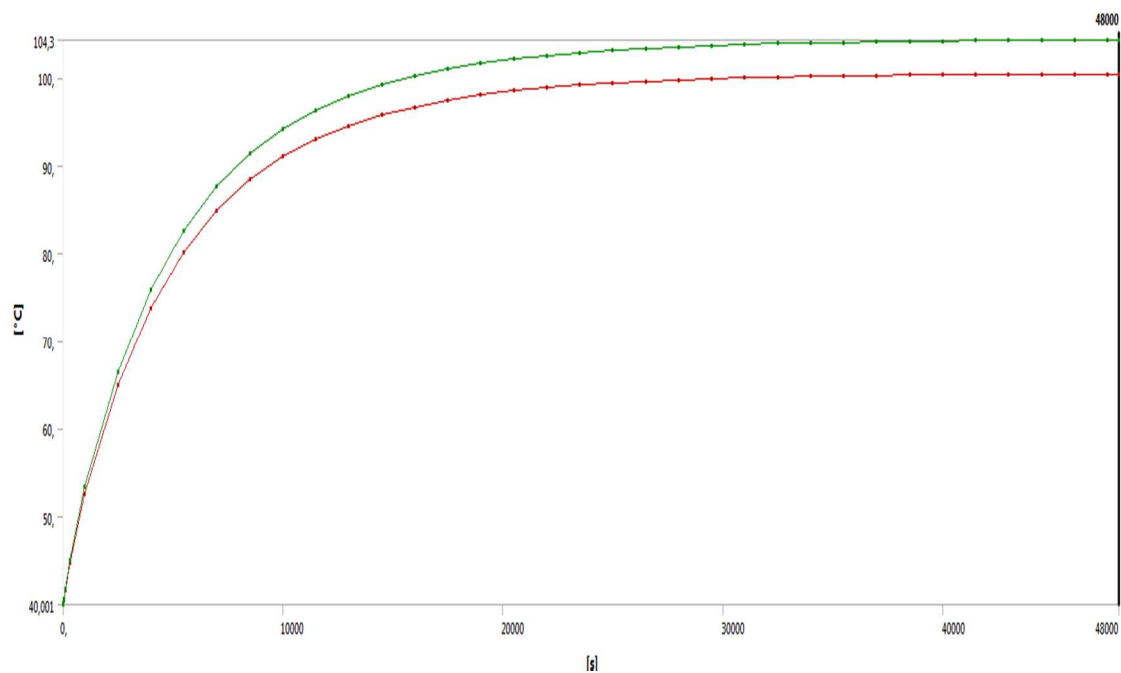
Obrázek 10.59: Rozložení teploty vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 3.1



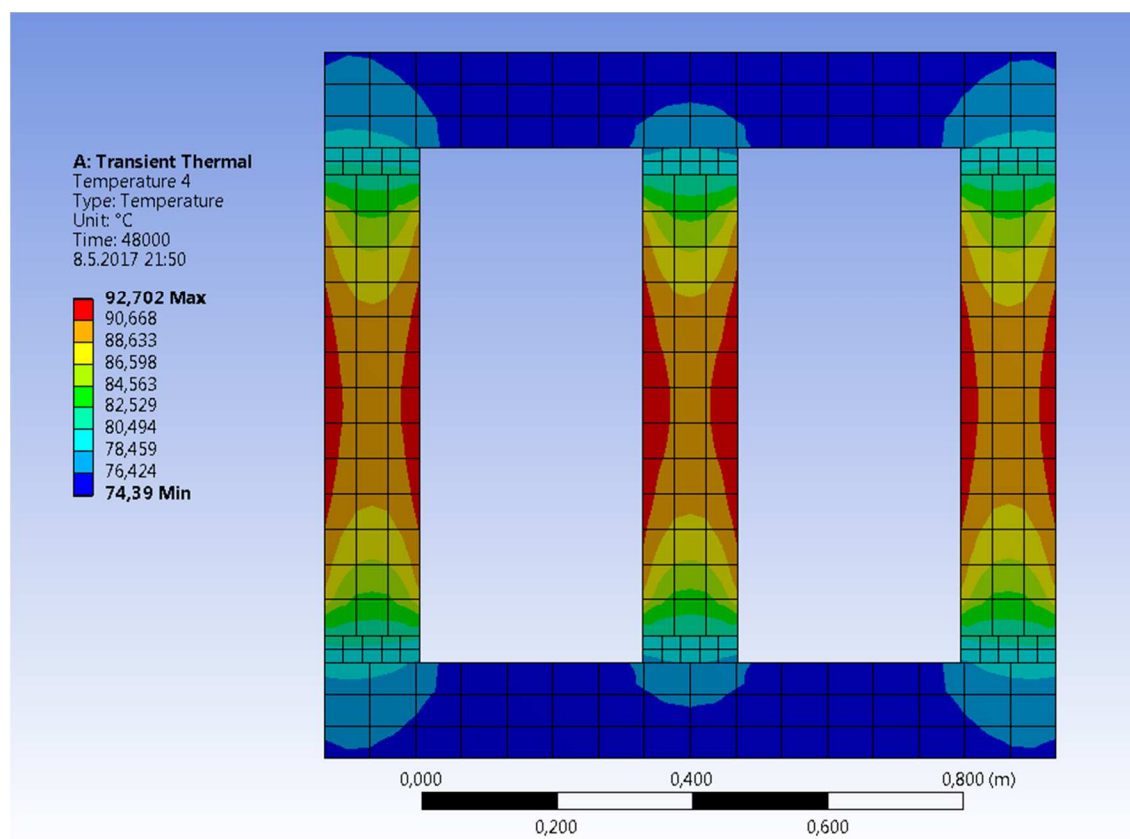
Obrázek 10.60: Průběh teploty jádra – varianta 3.1



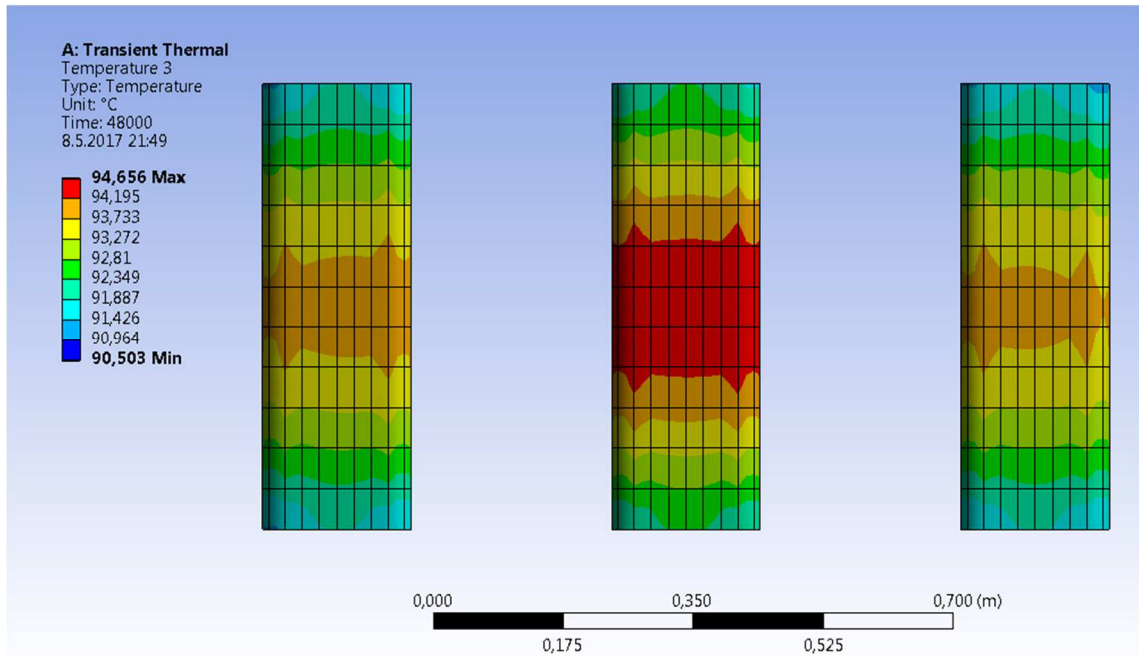
Obrázek 10.61: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 3.1



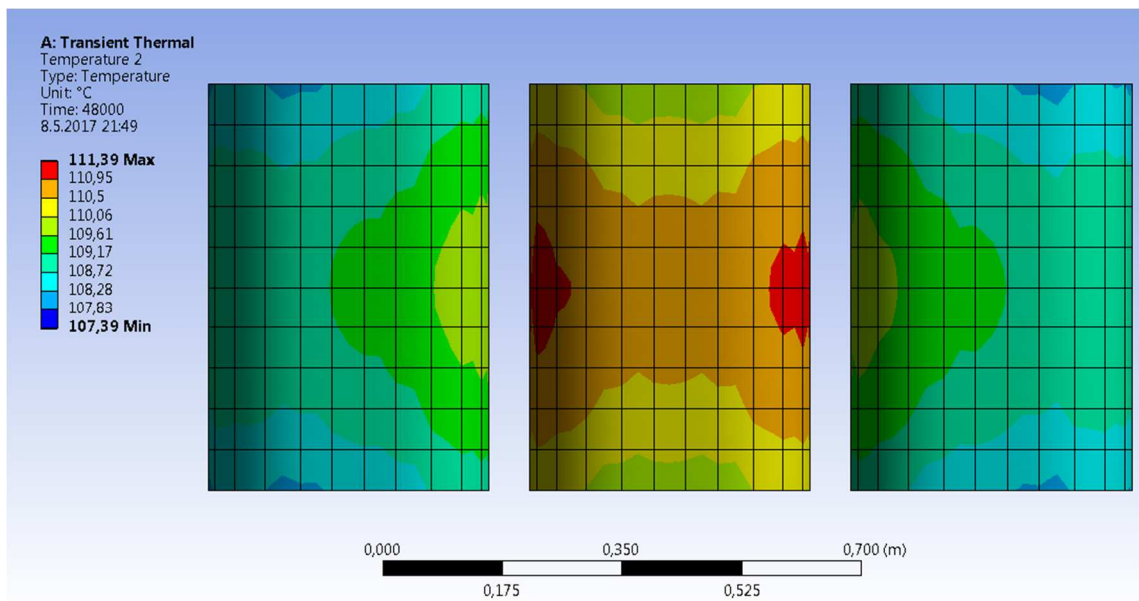
Obrázek 10.62: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 3.1



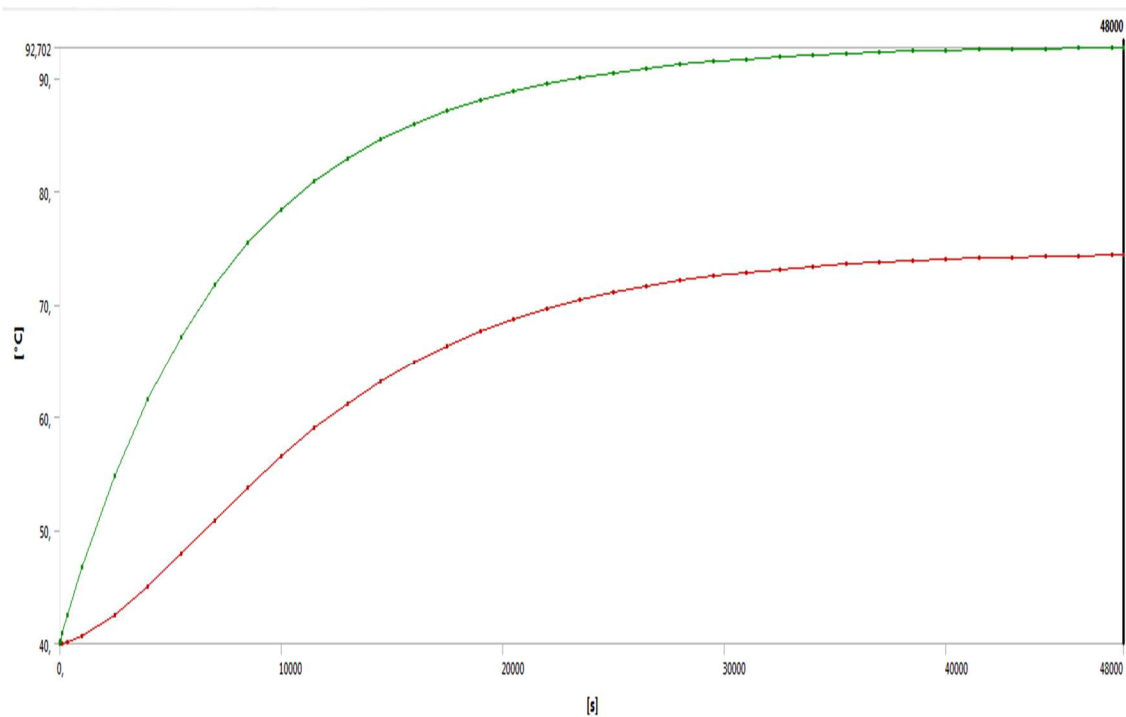
Obrázek 10.63: Rozložení teploty magnetického obvodu na konci simulace – varianta 3.2



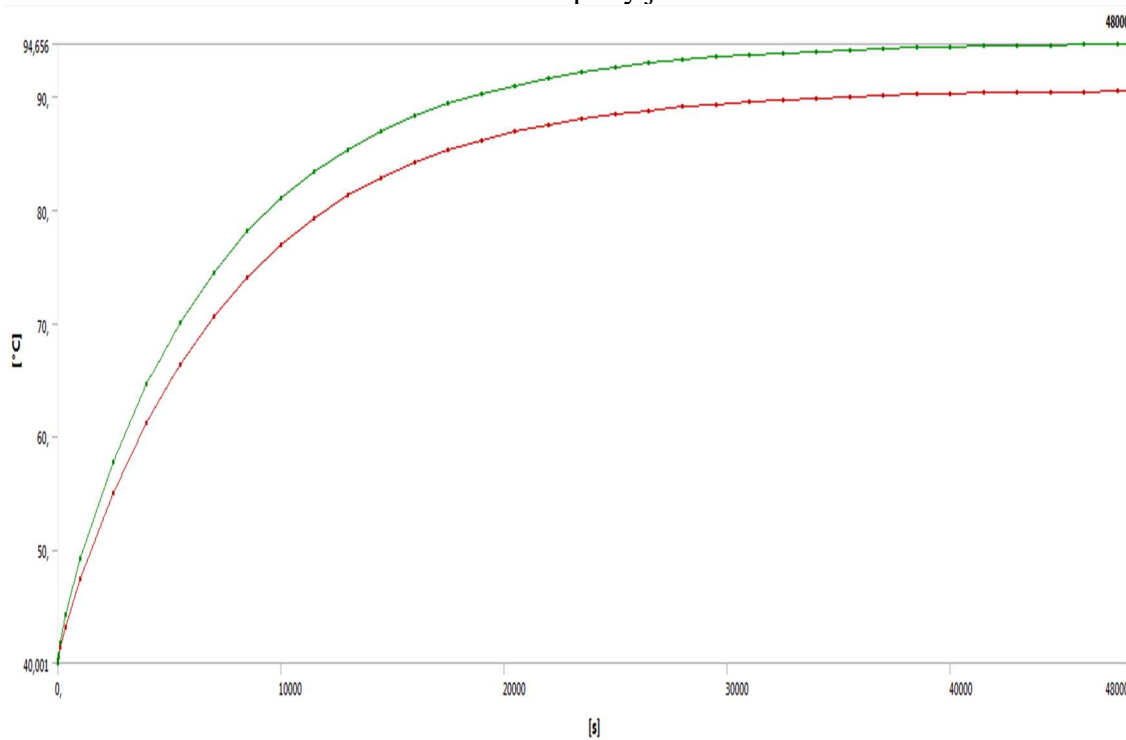
Obrázek 10.64: Rozložení teploty vinutí nízkého napětí na konci simulace – varianta 3.2



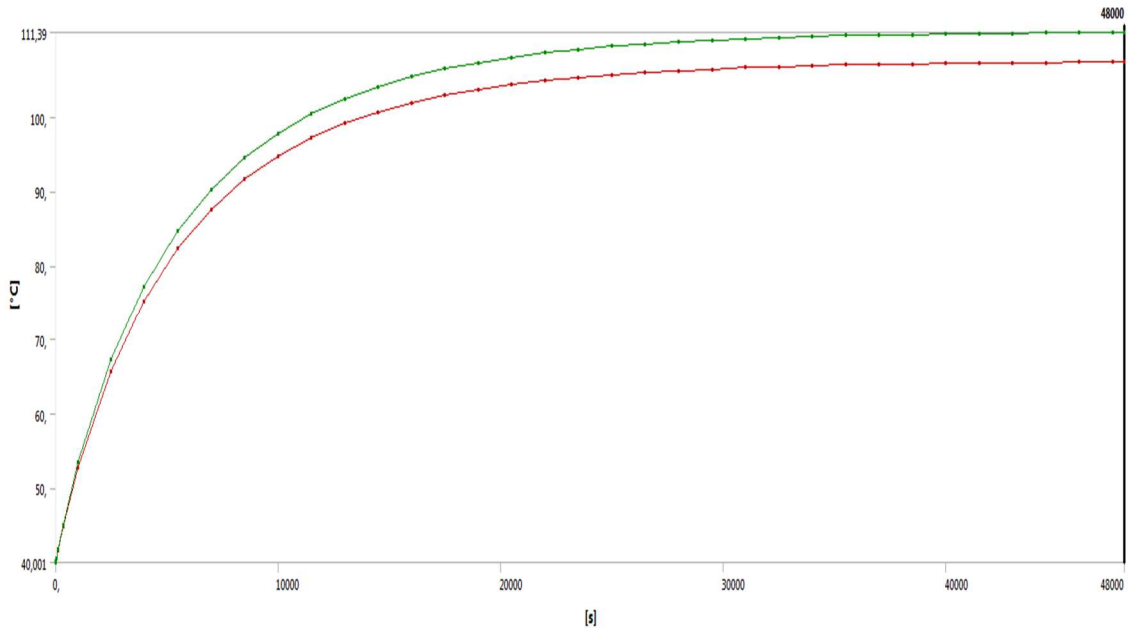
Obrázek 10.65: Rozložení teploty vinutí vysokého napětí na konci simulace – varianta 3.2



Obrázek 10.66: Průběh teploty jádra – varianta 3.2



Obrázek 10.67: Průběh teploty vinutí nízkého napětí – varianta 3.2



Obrázek 10.68: Průběh teploty vinutí vysokého napětí – varianta 3.2

Tabulka 10.5: Ztráty naprázdno P_0 a hladiny hluku L_{wA} pro distribuční transformátory s nominálním napětím $U_n \leq 24$ kV podle ČSN EN 50464-1

P_n [kVA]	E_0		D_0		C_0		B_0		A_0		Z_k [%]
	P_0 [W]	L_{wA} dB(A)	P_0 [W]	L_{wA} dB(A)	P_0 [W]	L_{wA} dB(A)	P_0 [W]	L_{wA} dB(A)	P_0 [W]	L_{wA} dB(A)	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	4
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44	
250	650	65	530	60	425	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	520	57	440	52	360	49	
400	930	68	750	63	610	58	520	53	430	50	
500	1100	69	880	64	720	59	610	54	510	51	
630	1300	70	1030	65	860	60	730	55	600	52	
630	1200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	6
800	1400	71	1150	66	930	61	800	56	650	53	
1000	1700	73	1400	68	1100	63	940	58	770	55	
1250	2100	74	1750	69	1350	64	1150	59	950	56	
1600	2600	76	2200	71	1700	66	1450	61	1200	58	
2000	3100	78	2700	73	2100	68	1800	63	1450	60	
2500	3500	81	3200	76	2500	71	2150	66	1750	63	

POZNÁMKA: P_0 = Ztráty naprázdno. L_{wA} = Hladina akustického výkonu,
 P_n = Jmenovitý výkon, Z_k = Impedance nakrátko

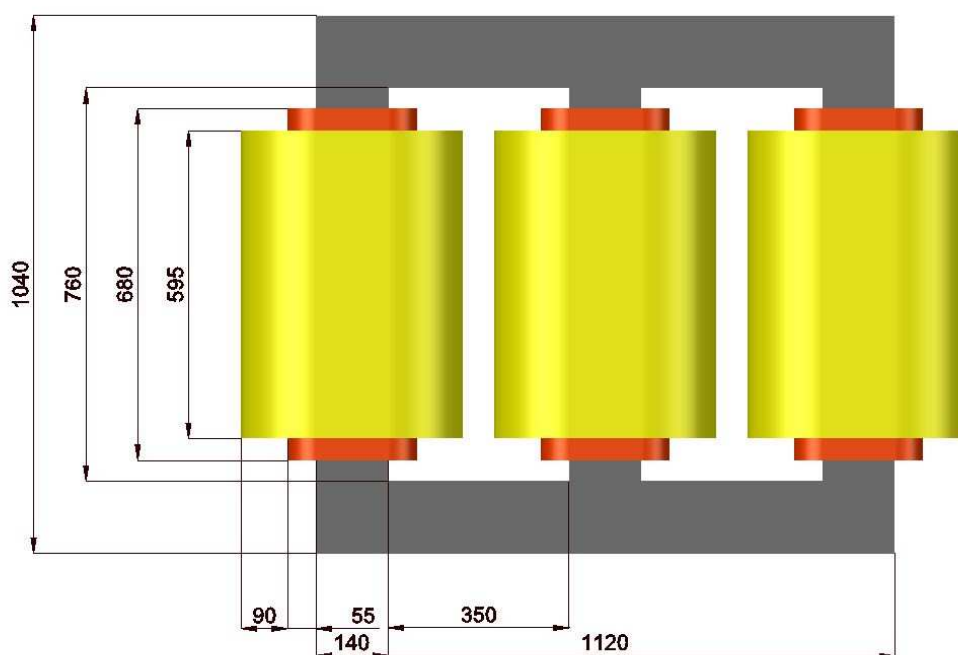
Tabulka 10.6: Ztráty nakrátko P_k a hladiny pro distribuční transformátory s nominálním napětím $U_n \leq 24 \text{ kV}$ podle ČSN EN 50464-1

Jmenovitý výkon [kVA]	D_k [W]	C_k [W]	B_k [W]	A_k [W]	Impedance nakrátko [%]
50	1350	1100	875	750	4
100	2150	1750	1475	1250	
160	3100	2350	2000	1700	
250	4200	3250	2750	2350	
315	5000	3900	3250	2800	
400	6000	4600	3850	3250	
500	7200	5500	4600	3900	
630	8400	6500	5400	4600	
630	8700	6750	5600	4800	6
800	10500	8400	7000	6000	
1000	13000	10500	9000	7600	
1250	16000	13500	11000	9500	
1600	20000	17000	14000	12000	
2000	26000	21000	18000	15000	
2500	32000	26500	22000	18500	

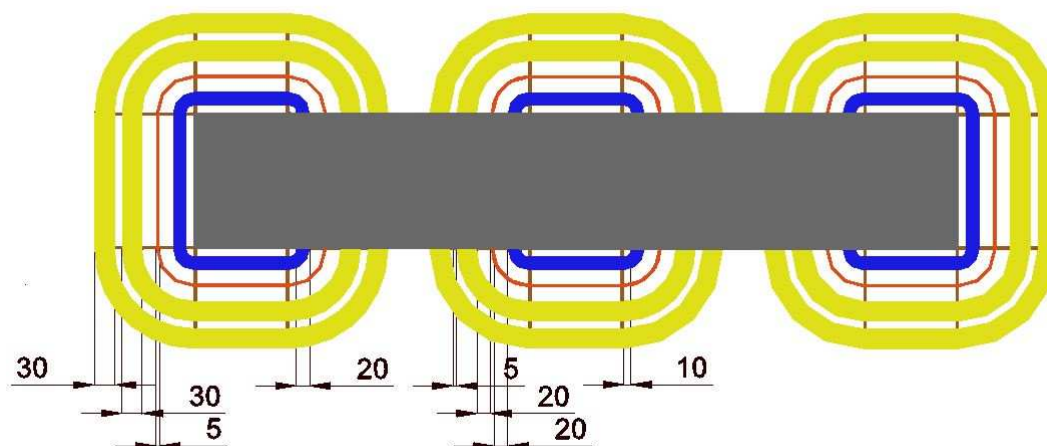
POZNÁMKA: P_k = Ztráty naprázdno

Tabulka 10.7: Meze oteplení vinutí podle ČSN EN 60076-11

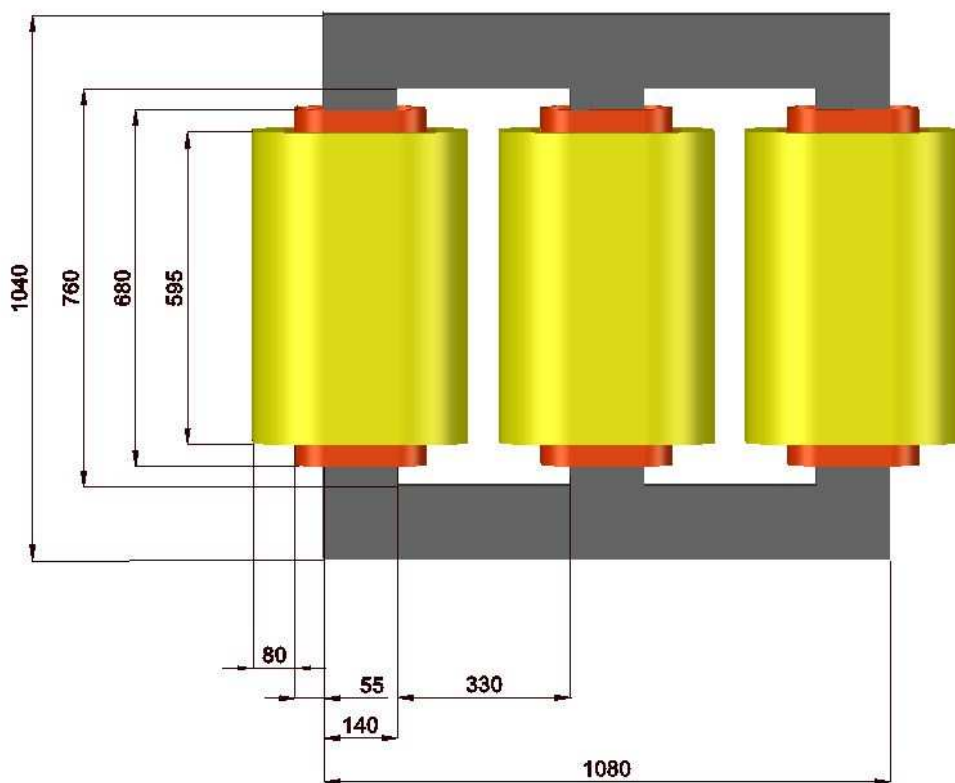
Třída vinutí	Teplota izolačního systému 40 [°C]	Střední oteplení vinutí při jmenovité proudě [K]
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	100
H	180	125
C	200	135
D	220	150



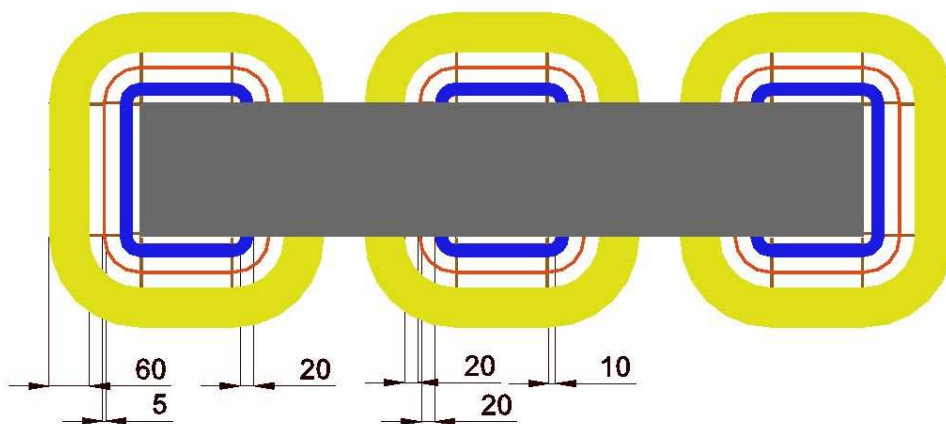
Obrázek 10.69: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého napětí



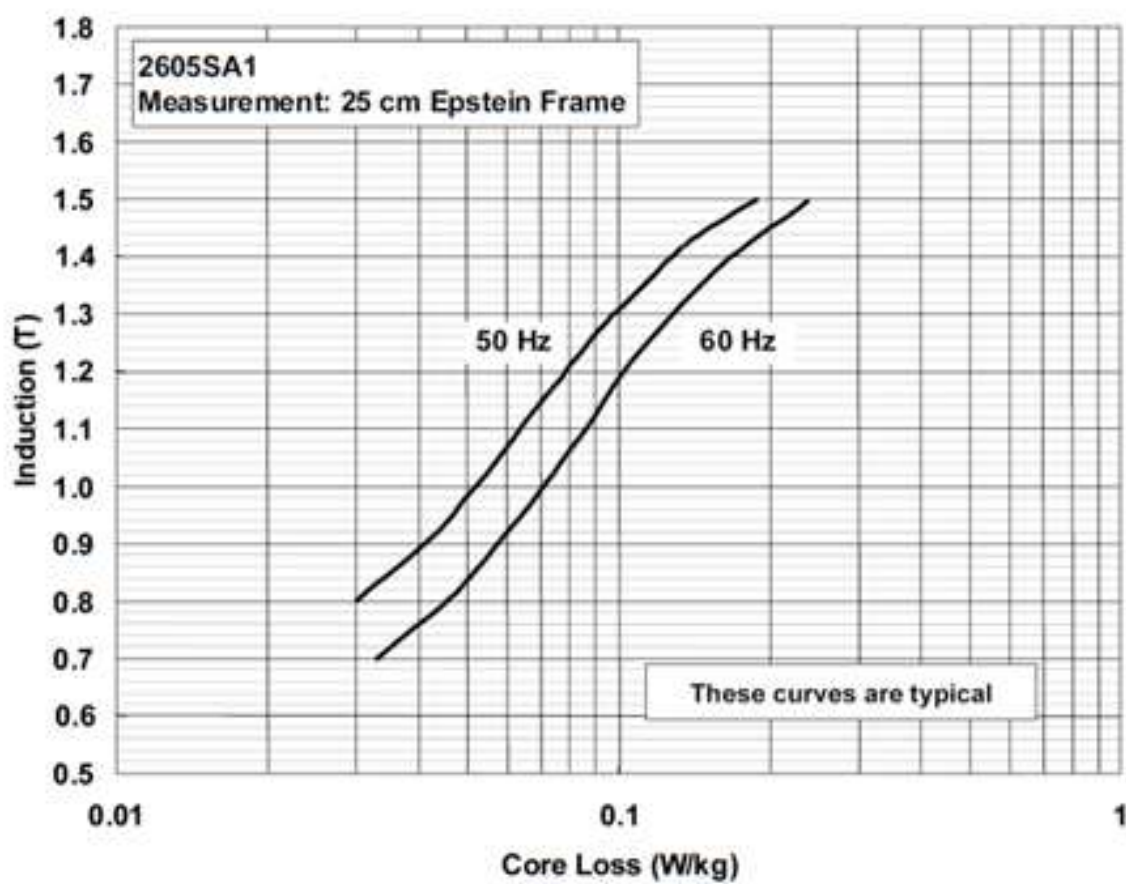
Obrázek 10.70: Model 250 kVA s rozděleným vinutím vysokého napětí



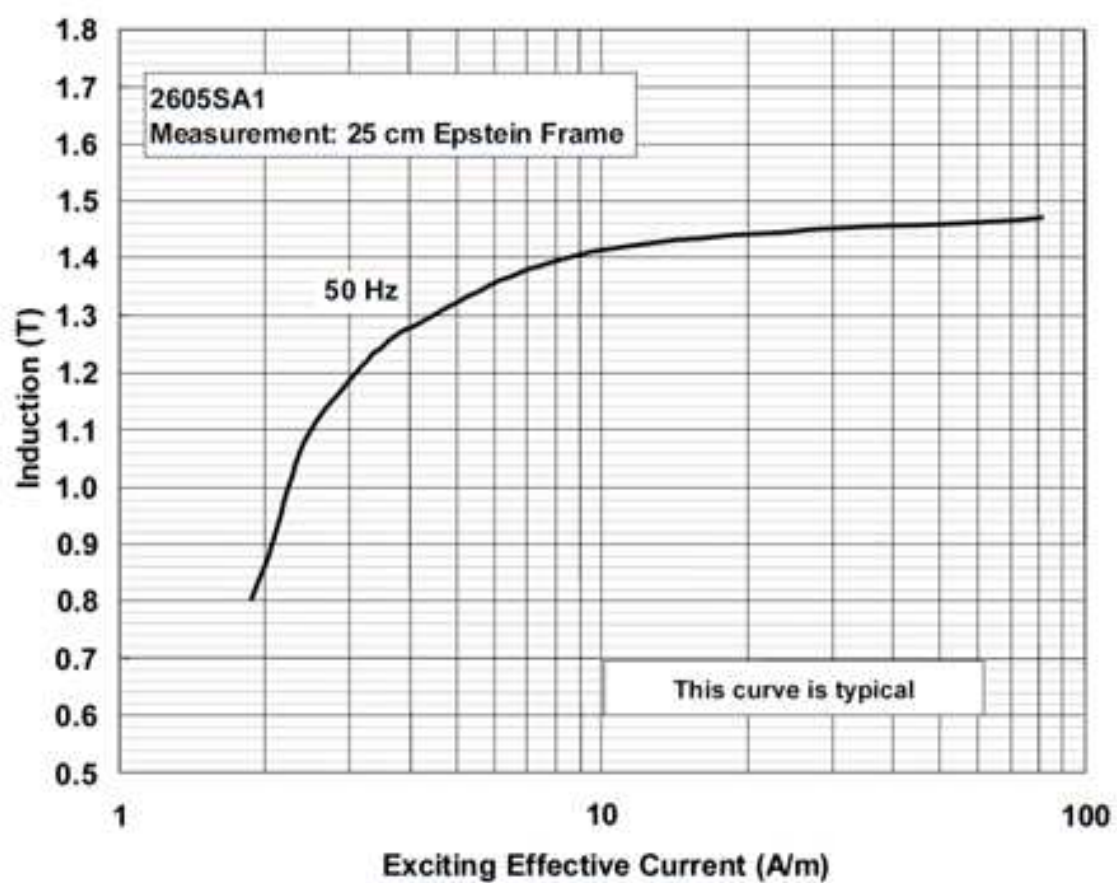
Obrázek 10.71: Model 250 kVA bez rozdělení vinutí



Obrázek 10.72: Model 250 kVA bez rozdělení vinutí



Obrázek 10.73: 2605SA1 ztrátová charakteristika [20]



Obrázek 10.74: 2605SA1 magnetizační charakteristika [20]