

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza magnetického pole v okolí venkovního vedení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David ŘEZÁČ**
Osobní číslo: **E13B0078P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Analýza magnetického pole v okolí venkovních vedení**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši používaných stožárů dvojitých vedení přenosové a distribuční soustavy.
2. Popište účinky zkratových proudů na vedení.
3. Vyšetřete rozložení magnetického pole ve vymezeném okolí vedení (vytvořte 3D mapu v časové oblasti) pro různé provozní a poruchové stavy.
4. Zhodnoťte získané výsledky a vyhodnoťte nebezpečnost jednotlivých poruchových stavů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Nazarčík**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jifí Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu magnetického pole v okolí venkovního vedení. V práci je provedena rešerše na používané typy stožárů dvojitého venkovního vedení a zkratů, včetně jeho vzniku, průběhu a účinků. Dále bylo cílem této práce provést analytické výpočty intenzity magnetického pole v okolí různých typů stožárů včetně různých napěťových hladin při provozním či poruchovém stavu venkovního vedení.

Klíčová slova

Stožár, Velmi vysoké napětí, Donau, Portál, Soudek, Výpočet intenzity magnetického pole, Zkrat, Konfigurace fází

Abstract

The bachelor thesis is focused on the analysis of the magnetic field in the vicinity of overhead lines. The work is carried out searches for using types of poles for double overhead lines and short-circuit, including its origin, course and effects. Furthermore, the aim of this work to perform a analytical calculations to perform a magnetic field intensity in the vicinity of different types of masts including various voltage levels during operation or fault condition overhead lines.

Key words

Pylon, Very high Voltage, Donau, Portál, Soudek, Calculation of magnetic field intensity, Short-circuit, Configuration of phases

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 24.5.2016

David Řezáč

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Nazarčíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	ÚVOD	12
2	STOŽÁRY VVN.....	13
2.1	FUNKČNÍ POŽADAVKY NA STOŽÁR VVN	13
2.1.1	<i>Stožáry VVN.....</i>	13
2.2	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ STOŽÁRŮ.....	14
2.2.1	<i>Stožárová konstrukce Donau 2x400 kV</i>	14
2.2.2	<i>Stožárová konstrukce Portál pro 2x 220 kV (Dvojitý portál)</i>	15
2.2.3	<i>Stožárová konstrukce tvaru Soudek 2x 110 kV</i>	16
2.2.4	<i>Stožárová konstrukce Donau 2 x 220 kV 1975</i>	17
3	ZKRATY NA VEDENÍ.....	18
3.1	ROZDĚLENÍ ZKRATŮ	18
3.1.1	<i>Souměrný zkrat</i>	18
3.2	ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU	20
3.2.1	<i>Rázový zkratový proud.....</i>	20
3.2.2	<i>Nárazový zkratový proud.....</i>	20
3.2.3	<i>Ekvivalentní oteplovací proud</i>	20
3.3	OMEZENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU	21
4	ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	22
4.1	INTENZITA MAGNETICKÉHO POLE PŘI PROVOZNÍCH STAVECH.....	24
4.1.1	<i>Závislost intenzity magnetického pole na konfiguraci fází</i>	25
4.1.2	<i>Závislost intenzity magnetického pole na proudovém zatížení a průvěsu</i>	36
4.2	INTENZITA MAGNETICKÉHO POLE PŘI PORUCHOVÝCH STAVECH	45
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>OBR. 1 - DONAU 2x400 - NOSNÝ STOŽÁR.....</i>	<i>14</i>
<i>OBR. 2 - DONAU 2x400 - KOTEVNÍ STOŽÁR.....</i>	<i>14</i>
<i>OBR. 3 - PORTÁL 2x220 - NOSNÝ STOŽÁR.....</i>	<i>15</i>
<i>OBR. 4 - SOUDEK 2x110 - NOSNÝ STOŽÁR.....</i>	<i>16</i>
<i>OBR. 5 - PORTÁL 2x110 - KOTEVNÍ STOŽÁR</i>	<i>16</i>
<i>OBR. 6 - DONAU 2x220 - KOTEVNÍ STOŽÁR.....</i>	<i>17</i>
<i>OBR. 7 - DONAU 2x220 - NOSNÝ STOŽÁR.....</i>	<i>17</i>
<i>OBR. 8 - PRŮBĚH SOUMĚRNÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....</i>	<i>19</i>
<i>OBR. 9 - PRŮBĚH NESOUMĚRNÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU VČETNĚ STEJNOSMĚRNÉ SLOŽKY</i>	<i>21</i>
<i>OBR. 10 - ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE.....</i>	<i>22</i>
<i>OBR. 11 ČASOPROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ (3D MAPA) DONAU ABC-CAB.....</i>	<i>26</i>
<i>OBR. 12 ČASOVÁ PROJEKCE INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE DONAU ABC-CAB.....</i>	<i>26</i>
<i>OBR. 13 ČASOPROSTOROVÁ PROJEKCE INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE DONAU ABC-CAB.....</i>	<i>27</i>
<i>OBR. 14 PROSTOROVÁ PROJEKCE INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE DONAU ABC-CAB.....</i>	<i>27</i>
<i>OBR. 15 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 1.....</i>	<i>46</i>
<i>OBR. 16 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 2.....</i>	<i>46</i>
<i>OBR. 17 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 3.....</i>	<i>46</i>
<i>OBR. 18 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 4.....</i>	<i>47</i>
<i>OBR. 19 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 1.....</i>	<i>50</i>
<i>OBR. 20 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 2.....</i>	<i>51</i>
<i>OBR. 21 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 1.....</i>	<i>53</i>
<i>OBR. 22 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 2.....</i>	<i>54</i>
<i>OBR. 23 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PRO 3.....</i>	<i>54</i>

SEZNAM TABULEK

TAB. 4-1 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ KONFIGURACE FÁZÍ - DONAU 2x400 kV.....	25
TAB. 4-2 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ DONAU 2x400 kV.....	28
TAB. 4-3 PROSTOROVÁ A ČASOPROSTOROVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ DONAU 2x400 kV	29
TAB. 4-4 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ KONFIGURACE FÁZÍ - PORTÁL 2x220 kV.....	30
TAB. 4-5 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ PORTÁL 2x220 kV.....	31
TAB. 4-6 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ PORTÁL 2x220 kV	32
TAB. 4-7 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ KONFIGURACE FÁZÍ - SOUDEK 2x110 kV.....	33
TAB. 4-8 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ SOUDEK 2x110 kV.....	34
TAB. 4-9 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO OSTATNÍ KONFIGURACE FÁZÍ SOUDEK 2x110 kV	35
TAB. 4-10 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY - DONAU 2x400 kV.....	36
TAB. 4-11 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY DONAU 2x400 kV.....	37
TAB. 4-12 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY DONAU 2x400 kV..	38
TAB. 4-13 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY - PORTÁL 2x220 kV.....	39
TAB. 4-14 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY PORTÁL 2x220 kV.....	40
TAB. 4-15 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY PORTÁL 2x220 kV.	41
TAB. 4-16 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY - SOUDEK 2x110 kV.....	42
TAB. 4-17 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY SOUDEK 2x110 kV.....	43
TAB. 4-18 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO ZVLÁŠTNÍ STAVY SOUDEK 2x110 kV.	44
TAB. 4-19 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ PORUCHOVÉ STAVY - DONAU 2x400 kV.....	46
TAB. 4-20 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY DONAU 2x400 kV.....	48
TAB. 4-21 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY DONAU 2x400 kV	49
TAB. 4-22 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ PORUCHOVÉ STAVY - PORTÁL 2x220 kV.....	50
TAB. 4-23 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY PORTÁL 2x220 kV.....	50
TAB. 4-24 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY PORTÁL 2x220 kV	51
TAB. 4-25 MAXIMÁLNÍ HODNOTY PRO RŮZNÉ PORUCHOVÉ STAVY - SOUDEK 2x110 kV.....	52
TAB. 4-26 3D MAPA A ČASOVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY SOUDEK 2x110 kV.....	52
TAB. 4-27 ČASOPROSTOROVÁ A PROSTOROVÁ PROJEKCE PRO PORUCHOVÉ STAVY SOUDEK 2x110 kV	53

Seznam symbolů a zkratek

R	Činný odpor	$[\Omega]$
L_k	Zkratová indukčnost	$[H]$
i_k''	Rázový zkratový proud	$[A]$
U_n	Jmenovité napětí	$[V]$
Z_k	Celková zkratová impedance	$[\Omega]$
i_p	Rázový zkratový proud	$[A]$
i_{ke}	Ekvivalentní oteplovací proud	$[A]$
α	Okamžik vzniku zkratu	$[-]$
φ_k	Fázový posuv zkratové impedance	$[-]$
x_i	x-ová souřadnice i-tého fázového vodiče	$[-]$
y_i	y-ová souřadnice i-tého fázového vodiče	$[-]$
x_M	x-ová souřadnice zkoumaného bodu M	$[-]$
y_M	y-ová souřadnice zkoumaného bodu M	$[-]$
r_i	poloměr mezi bodem M a i-tým fázovým vodičem	$[-]$
H	Intenzita magnetického pole	$[Am^{-1}]$
B	Magnetická indukce	$[T]$
μ	Permeabilita	$[Hm^{-1}]$
t	čas	$[s]$
A	Fázový vodič s fázovým posuvem 0°	$[-]$
B	Fázový s fázovým posuvem -120°	$[-]$
C	Fázový s fázovým posuvem -120°	$[-]$

1 Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na analýzu magnetického pole v okolí venkovního vedení. Text je rozdělen do tří částí, první část textu je rozdělena do dvou hlavních kapitol, kde se problematika zabývá stožáry velmi vysokého napětí. Konkrétněji jsou zde popsány typy stožárů, jejich konstrukce a použití. Tato kapitola také obsahuje podrobnější popisy typů stožáru Donau 2x400 kV, 2x220 kV, Portál 2x220 kV a Soudek 2x110 kV. Druhá část bakalářské práce se zabývá zkratovou poruchou, která je rozdělena do tří hlavních kapitol. Je zde podrobný popis rozdělení zkratových poruch, včetně jejich průběhů, rovnic a účinků. Třetí část bakalářské práce popisuje vlastní analýzu, která byla provedena za pomoci softwaru MATLAB, kdy se použily tři typy stožárů na různých napěťových hladinách a pro každý stožár bylo vypočteno rozložení intenzity magnetického pole v jeho okolí při různých provozních stavech. Dané typy stožárů byly nejdříve vyšetřeny pro provozní stavy, kdy se zkoumal vliv konfigurace fází na magnetické pole. Dále byla provedena analýza pro zvláštní stavy, kdy se zavedl průvės vodičů a zvýšil se proud na maximální hodnotu, kterou je schopné venkovní vedení přenést. Jako poruchový stav byl zvolen jednofázový zkrat, přičemž se zkoumal vliv zkratového proudu na rozložení magnetického pole. Cílem této práce bylo prozkoumání rozložení magnetického pole v okolí venkovního vedení při různých provozních stavech a po provedení výpočtů určit, která konfigurace fází je nejnepříznivější a tím pádem nejhorší pro přenos elektrické energie. Dalším cílem je podle předchozích analýz stanovit, který z typů stožárů se nejvíce hodí pro přenos elektrické energie s ohledem na rozložení magnetického pole.

2 Stožáry VVN

2.1 Funkční požadavky na stožár VVN

2.1.1 Stožáry VVN

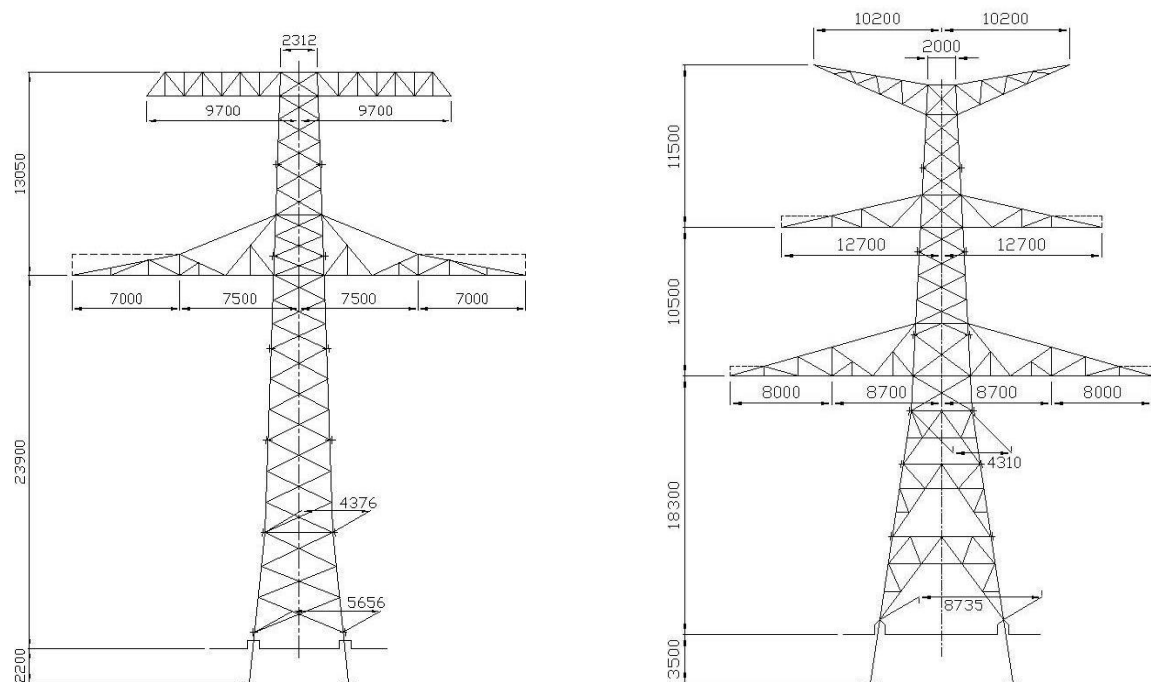
Slouží jako kostra přenosové sítě venkovního vedení. Vyrobené jsou z ocelových ostrohranných válcovaných profilů. Dle přenášeného výkonu a napětí vyplynou hlavní parametry vedení. Při napěťových hladinách velmi vysokého napětí kdy napětí dosahuje 110 kV, 220 kV, 400 kV nebo 750 kV rozdělujeme vedení na jednoduché, dvojité a vícesystémové. Pro přenos daných napěťových hladin a přenášených výkonů se musí dimenzovat určitý počet vodičů a zemních lan. To však má za následek podmíněný tvar hlavy stožáru, ale i jeho výšku a dané rozestupy stožárů od sebe. Stožáry velmi vysokého napětí jsou stavěny od sebe v rozmezí 300-500 metrů (vzdálenost 300m se nejvíce využívá při 110 kV, při použití vyšší napěťové hladiny je použita vzdálenost větší). Výška stožáru se dimenzuje podle výšky vodiče, který je nejnižší od země, podle průřezu, délky izolátorových závěsů a armatur a uspořádání vodičů a zemních lan. Konstrukční řešení hlavy stožáru jsou ovlivněny také použitím různých druhů a tvarů použitelných izolátorů a izolátorových závěsů.[1]

Na rozvodných trasách se převážně používají nosné stožáry. Minimálně po 3 kilometrech (nejsou-li stožáry navrženy tak, aby vydržely kroucení, které nastane následkem přetržení jednoho z vodičů), nebo po 5 kilometrech (jsou-li stožáry navrženy tak, aby vydržely kroucení, které nastane následkem přetržení jednoho z vodičů) musí být postaven výztužný stožár. Ve výjimečných případech se primárně využívá výztužných stožárů a to například při velkém převýšení, ve složitém terénu, nebo při použití v důležitých oblastech jako například křižovatkové úseky, průmyslové areály apod. Nosné stožáry jsou mezilehlé stožáry, které jsou umístěny na přímých trasách. Vodiče jsou umístěny ve svislých izolátorových závěsech. Výztužné (kotevní) stožáry jsou pevnými body na lince. Zde jsou vodiče ukotveny pomocí kotevních izolátorových závěsů. Tento typ stožáru se používá i pro napínání vodičů na celé trase. Dalším typem stožárů je rohový stožár. Používá se v lomech tras, kde se může použít buď jako nosný, nebo jako výztužný. Dále se využívají stožáry koncové, odbočné, nebo křižovatkové. [1] [2]

2.2 Konstrukční řešení stožárů

Konstrukce stožárů byla navržena tak, aby byla schopna přenášet svislé a vodorovné zatížení s určitými kroutícími momenty. Z toho plyne rozdělení konstrukcí stožárů na jednodřívkové s konzolami, portálové konstrukce (využívá se dvou dřívků, které jsou spojené příčnickem), kotvené stožáry (jednodřívková nebo portálová konstrukce stabilizována kotevními lany) a prostorové prutové konstrukce s různým uspořádáním. [1]

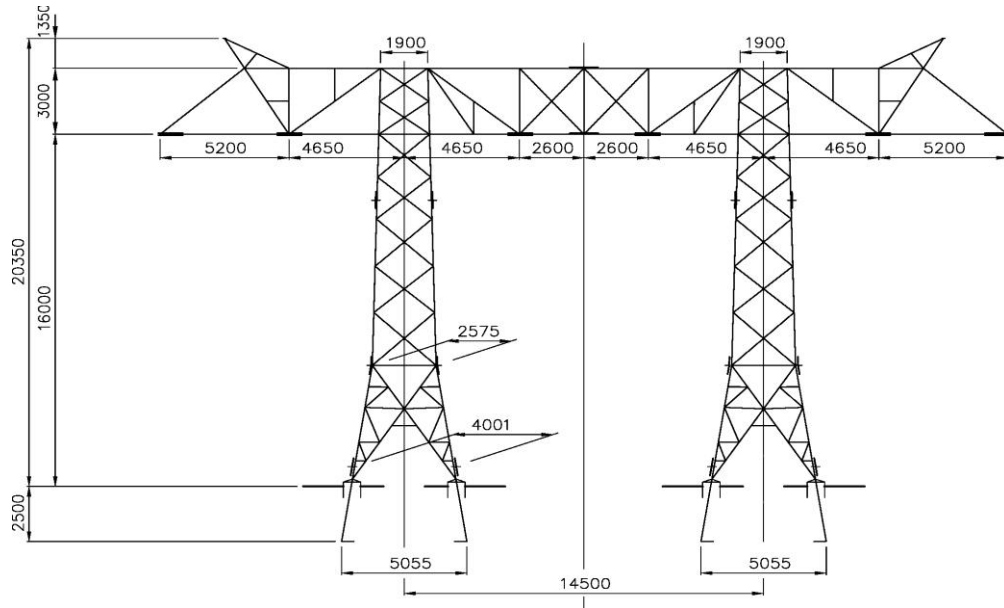
2.2.1 Stožárová konstrukce Donau 2x400 kV



Obr. 1 - Donau 2x400 - Nosný stožár^[11] Obr. 2 - Donau 2x400 - Kotevní stožár^[11]

Konstrukce stožáru Donau je jednodřívková. Konstrukce tohoto stožáru je tvořena z dřívku, na jehož vrcholu jsou připevněny dvě konzole pro zemní lana. Hlava stožáru je zkonstruována tak, aby uspořádané vodiče byly do rovnoramenného trojúhelníka a je tvořena horní a dolní konzolí. U novějších stožárových konstrukcí typu Donau je vrchní konzole společná pro fázové vodiče, které jsou umístěny zespoda této konzole, a zemnicí lana, které jsou umístěny seshora konzole. Při použití vodičových lan jsou tyto stožáry určeny pro 2x3x3 sdružené fázové vodiče ležící ve dvou vodorovných rovinách a pro dvě zemnicí lana. Nosné stožáry typu Donau dosahují výšky v rozmezí od 23-23,9 m, přičemž základní výška závěsu spodního vodiče je 20m. Kotevní stožáry dosahují výšky od 17,5 do 18,3 m a základní výška závěsu izolátorového řetězce je 15,6m.

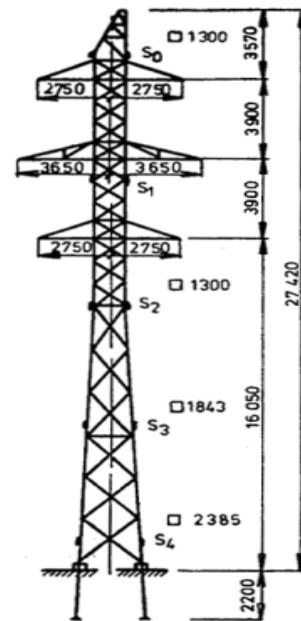
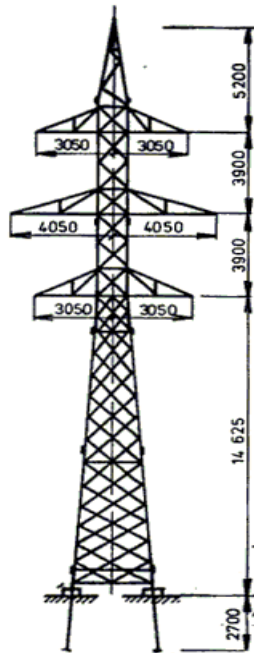
2.2.2 Stožárová konstrukce Portál pro 2x 220 kV (Dvojitý portál)



Obr. 3 - Portál 2x220 - Nosný stožár^[11]

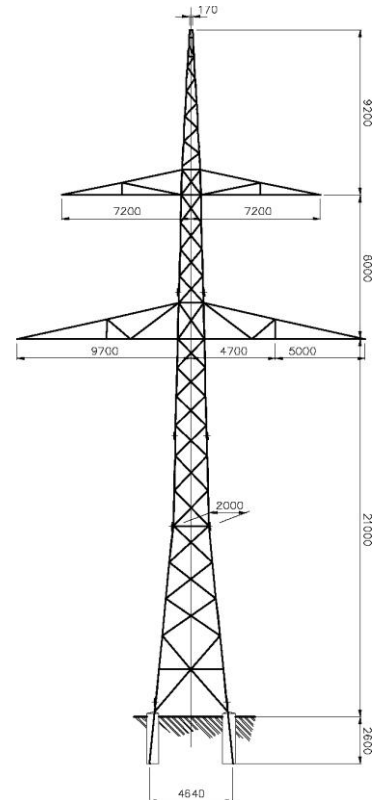
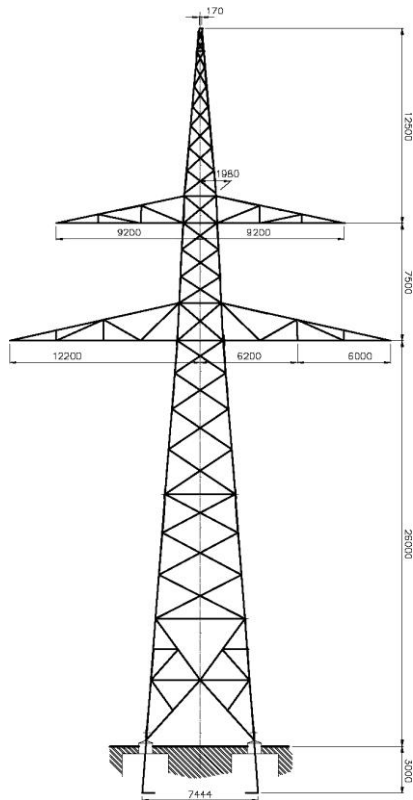
V tomto případě se jedná o příhradovou, dvoudříkovou, prostorovou, samonosnou konstrukci. Stožár typu Portál je zkonstruován ze dvou dřívů, které jsou spojeny příčnickem. Rozdíl mezi nosným a kotevním stožárem se liší v použití rozdílného rozkročného dílu nad základem. Zde je umístění fázových vodičů v jedné rovině, které jsou umístěny ve stejné výšce.

2.2.3 Stožárová konstrukce tvaru Soudek 2x 110 kV

Obr. 4 - Soudek 2x110 - Nosný stožár ^[3]Obr. 5 - Portál 2x110 - Kotevní stožár ^[3]

Stožáry typu Soudek jsou jednodřívkové, samonosné, příhradové, prostorové konstrukce. Nosný stožár je celkem úzký, kotevní má rozkročný díl nad základem. Spodní pas konzolí dosahuje základní výšky u nosných stožárů 14,625m a u kotevních 16,05m. Spodní pas konzolí dosahuje základní výšky u nosných stožárů 23m a u kotevních 21m. Celkově je stožár typu Soudek užší, což má za následek umístění fází blíže k ose stožáru, než tomu bylo u předchozích stožárů.

2.2.4 Stožárová konstrukce Donau 2 x 220 kV 1975



Obr. 6 - Donau 2x220 - Kotevní stožár ^[11] Obr. 7 - Donau 2x220 - Nosný stožár ^[11]

Jedná se o příhradovou, jednodříkovou, prostorovou, samonosnou konstrukci, která je vyrobená z ocelových úhelníků a „U“ profilů. Jednotlivé díly konstrukce jsou sešroubované nebo svařené. Stožár se skládá z dříku, čtvercového průřezu (kotevní) nebo obdélníkového (nosný) průřezu, který je rozkročený nad základem. Hlava stožáru se dělá s uspořádáním vodičů do rovnoramenného trojúhelníka, kterou tvoří dolní a horní konzole a dřík. U stožárů typu Donau 1975 je základní výška spodního pasu konzol u nosných 21m a u kotevních 18m.

3 Zkratky na vedení

Zkrat je elektromagnetický přechodný děj, který vznikne v elektrizační soustavě náhodným, nebo úmyslným galvanickým spojením dvou nebo více vodivých částí. Je to závažná porucha způsobující velké nadproudy při současném snížení napětí (téměř na nulu). Do místa zkratu směřují poruchové proudy ze všech zdrojů, přičemž nastávají velké úbytky napětí, vyvolané zkratovou poruchou, které navyšují svou hodnotu od zdrojů do místa poruchy.[7] Nejčastěji vzniká vzájemným spojením fází nebo spojením některých fází se zemí. Velikost zkratového proudu je závislá na řadě faktorů. Mezi nejhlavnější patří velikost činného odporu, reaktance generátorů, transformátorů, vedení a místo samotného zkratu, přičemž platí, že čím dále je místo zkratu od zdroje, tím víc roste zkratová impedance a tím je menší výsledný zkratový proud.[4] Zkrat může vzniknout na základě mnoha příčin. Mezi hlavní příčiny patří mechanické poškození izolace (roztržení vodiče nebo jiné jeho poškození), chybná manipulace (chybné sepnutí přípojek a přípojnic), vyšší tepelné a dynamické namáhání způsobené špatným dimenzováním, znehodnocení izolace (navlhnutí izolace) a posledním jsou poruchy elektrických zařízení (vzniklé chybnou montáží, zničením izolátorů nebo špatnými a opálenými kontakty). Nejčastěji je tento poruchový stav vyvolán přepětím ať už atmosférickým nebo provozním. [8][9]

3.1 Rozdělení zkratů

Zkratky rozdělujeme na souměrné nebo nesouměrné. Dále mohou být zkratky bezodporové a odporové. Bezodporový zkrat vznikne při vzájemném spojení dvou fází. Odporový zkrat obvykle způsobí nějaký předmět, který zkratuje dané fáze, například spadlá vlhká větev.[4] Dalším rozdělením zkratů může být na dokonalé a na nedokonalé. Dokonalý zkrat vznikne dokonalým kovovým spojením, který má zanedbatelný přechodový odpor. Nedokonalý zkrat je způsoben obloukem, nebo nedokonalým kovovým spojením, které ohrožují své okolí možnostmi vzniku požáru.[10]

3.1.1 Souměrný zkrat

Souměrný zkrat je zpravidla třífázový. Jedná se o soudobé spojení všech tří fázových vodičů v jednom místě vedení. Tento zkrat má největší hodnotu zkratového proudu, ale pravděpodobnost, že k němu dojde je minimální díky značně oddáleným fázovým vodičům. Tento poruchový zkrat nesmíme vypustit kvůli dimenzování, protože se vedení dimenzuje na nejvyšší zkratový proud, který vzniká právě při třífázovém spojení. Souměrný zkrat

disponuje pouze střídavou složkou. Matematické vyjádření souměrného zkratu vyplývá z řešení diferenciální rovnice:

$$R * i_k(t) + L_k * \frac{di_k}{dt} = U_m * \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

Toto řešení se skládá z obecného a partikulárního řešení.

Obecné řešení je dáno ve tvaru:

$$i_{kv}(t) = K * e^{-\frac{R}{L_k} * t} \quad (2)$$

Partikulární pak ve tvaru:

$$i_{ku}(t) = \frac{U_m}{Z_k} * \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (3)$$

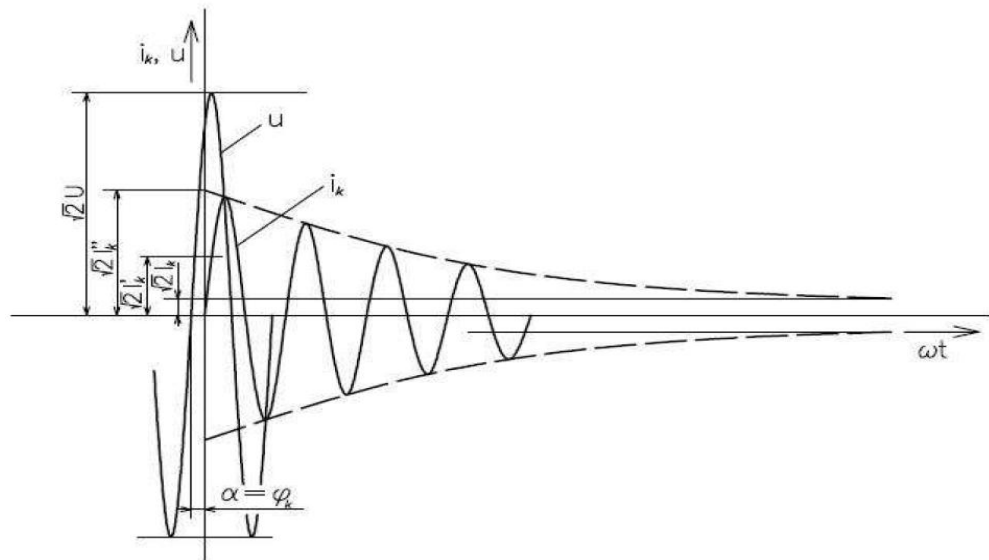
kde:

$$Z_k = \sqrt{R^2 + (\omega * L_k)^2} \quad (4) \quad \varphi_k = \arctg \frac{\omega * L_k}{R} = \arctg \frac{X_k}{R} \quad (5)$$

Výsledná rovnice zkratového proudu vychází ve tvaru:

$$i_k(t) = \left[i(0) - \frac{U_m}{Z_k} * \sin(\alpha - \varphi_k) \right] * e^{-\frac{R}{L_k} * t} + \frac{U_m}{Z_k} * \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (6)$$

Počáteční hodnota poruchového zkratového proudu závisí na okamžiku vzniku zkratu (ten je reprezentován úhlem α) a na úhlu impedance zkratového okruhu (ten je reprezentován úhlem φ_k). V případě, že se $\alpha = \varphi_k$, je počáteční hodnota nulová. Nejvyšší je pak při $\alpha = \varphi_k \pm \frac{\pi}{2}$. [6]



Obr. 8 - průběh souměrného zkratového proudu [10]

3.2 Účinky zkratového proudu

Účinky zkratového proudu jsou především dynamické a tepelné. Z průběhu zkratového proudu můžeme definovat důležité složky zkratového proudu. Jedná se o rázový zkratový proud I_k'' , nárazový zkratový proud I_p a ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} .

3.2.1 Rázový zkratový proud

Rázový zkratový proud I_k'' , je efektivní hodnotou střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu a vypočítá se ze vzorce:

$$I_k'' = k * \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * Z_k} \quad (6)$$

kde k je součinitel pro různé druhy zkratu, c je napěťový součinitel, U_n je jmenovité napětí a Z_k je celková impedance.[8] Nejvyšší hodnotu tohoto proudu potřebujeme znát kvůli dimenzování sítě, aby nemohlo dojít k poškození zařízení. Na nejmenší hodnotu tohoto proudu se nastavují elektrické ochrany, aby spolehlivě a rychle vypnuly poškozenou část.

3.2.2 Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud je nejvyšší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t=0,01s$ po vzniku zkratu a vypočítá se jako:

$$I_p = k * \sqrt{2} * I_k'' \quad (8)$$

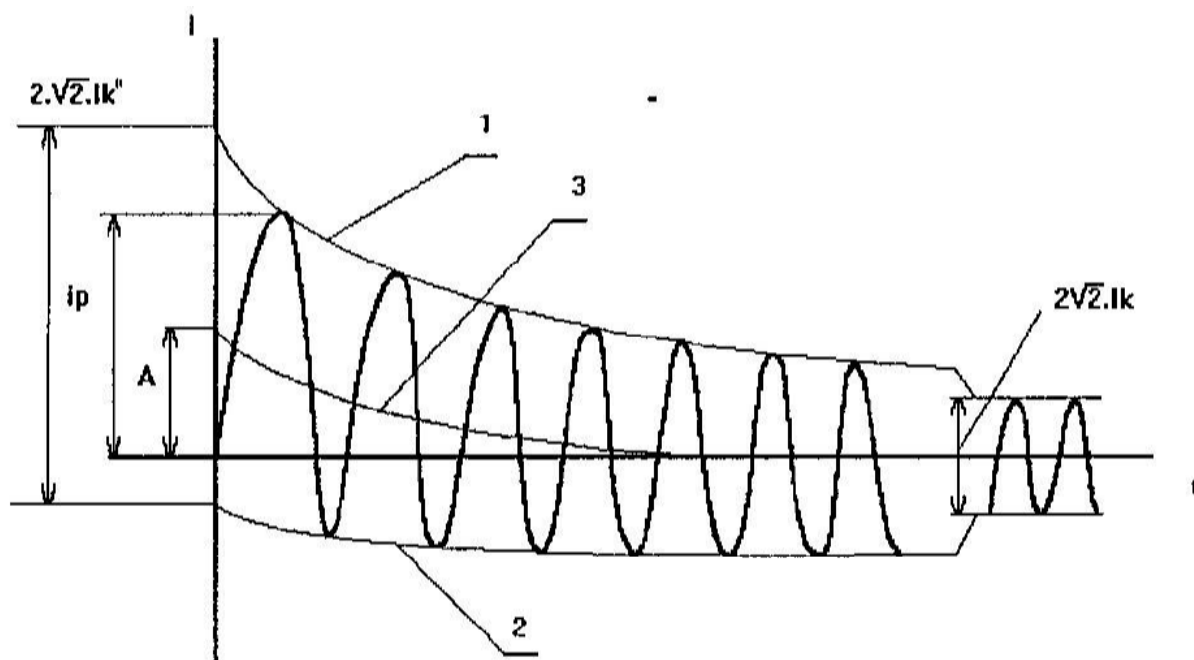
kde k je činitel útlumu a I_k'' je rázový zkratový proud. Zkoumáme ho kvůli jeho silovému a mechanickému působení z hlediska dimenzování elektrických zařízení. [5]

3.2.3 Ekvivalentní oteplovací proud

Ekvivalentní oteplovací proud je efektivní hodnota fiktivního zkratového sinusového proudu s konstantní amplitudou, který za dobu zkratu vyvine stejné množství tepla, které vyvine zkratový proud s maximální stejnosměrnou složkou.[5] Vypočítá se jako:

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{\int i_k^2(t) dt}{t_k}} = k_e * I_k'' \quad (9)$$

kde k_e je koeficient pro výpočet oteplovacího proudu. Jeho důležitost vyplývá z jeho tepelných účinků. Slouží k vhodnému návrhu a dimenzování elektrických zařízení a převážně kvůli dimenzování kabelových vedení, kde zvýšená teplota degraduje izolační schopnosti izolace. [6]



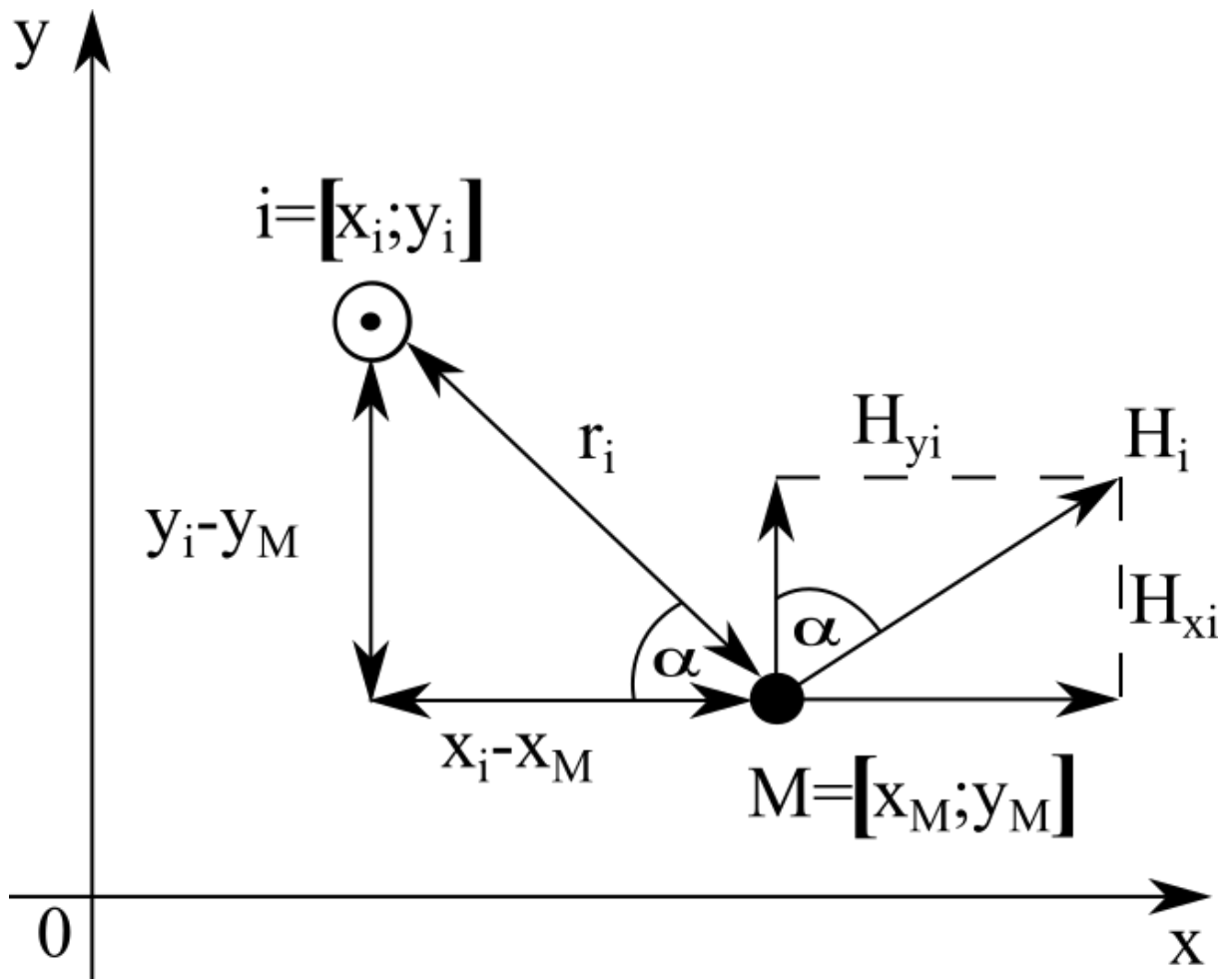
Obr. 9 - průběh nesouměrného zkratového proudu včetně stejnosměrné složky^[12]

3.3 Omezení zkratového proudu

Velikost zkratového proudu můžeme omezit tak, že zvýšíme velikost zkratové impedance, nebo zmenšíme výkon zdrojů. Ke zvýšení zkratové impedance se používají transformátory s vyšší impedancí, nebo reaktory. Reaktory jsou cívky s vysokou indukčností, díky kterým vzroste celková zkratová impedance. Zmenšení výkonu zdrojů se provádí použitím příčných a podélných přípojníc. Tohoto způsobu se využívá jen tehdy, je-li zkratový obvod napájen z více zdrojů. Doba trvání zkratu vychází z rychlosti působení elektrických ochranných zařízení, které dávají popud vypínačům a jeho vypínací době. Samotné vypnutí zkratu na vedení se provádí pomocí vypínacích přístrojů a zařízení, které jsou určeny pro vypnutí nadproudů. Mezi nevýznamnější patří pojistky nebo systém opětovného zapnutí OZ. [4]

4 Analýza magnetického pole v okolí venkovního vedení

Analýza intenzity magnetického pole vychází z první Maxwellovy rovnice, podle které se v okolí vodiče, protékaného proudem, vytvoří magnetické pole. Pro náš výpočet byly uvažovány rovnoběžné dlouhé vodiče, které měly harmonické průběhy všech proudů a byly v ustáleném stavu. Pro získání výsledného magnetického pole v okolí venkovního vedení se musí provést superpozice všech intenzit magnetického pole vybuzeného od jednotlivých vodičů, která musí být provedena po složkách.



Obr. 10 - Rozložení magnetického pole

Výpočet x-ové složky fázoru intenzity magnetického pole, které je vybuzené vodičem označeným i , v námi zvoleném bodě M se souřadnicemi $[x_M; y_M]$ je daný vztahem:

$$H_{xi} = \frac{i_i}{2 * \pi * r_i} * \frac{y_i - y_M}{r_i} \quad (10)$$

Výpočet y-ové složky fázoru intenzity magnetického pole se provádí obdobně:

$$H_{yi} = \frac{i_i}{2 * \pi * r_i} * \frac{x_i - x_M}{r_i} \quad (11)$$

kde r_i je poloměr mezi vodičem i a bodem M, který je dán vztahem:

$$r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

Pro zjištění velikosti fázorů v každé ze složek se musí provést superpozice složek daná jednotlivými vodiči:

$$H_{xM} = \sum_i H_{xi}(M) \quad H_{yM} = \sum_i H_{yi}(M) \quad (13)$$

Výsledek velikosti fázoru intenzity magnetického pole vychází ze vztahu:

$$H_m = \sqrt{|H_{xM}|^2 + |H_{yM}|^2} \quad (14)$$

Pro výpočet magnetické indukce v bodě M se využívá vztahu mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí:

$$B_M = H_M * \mu \quad (15)$$

kde μ je permeabilita vzduchu, která je rovná $\mu = 4\pi * 10^{-7} [H/m]$ (16)

Celý tento dosavadní postup výpočtu je pouze pro jeden bod. Proto byl použit software MATLAB, ve kterém jsme nejdříve určili tento jediný bod. Poté se určí intenzita magnetického pole pro bod, který je ve stejné výšce, vedle předchozího bodu. Takto se vypočte horizontální linie v rozmezí od -40 do 40 metrů. Po výpočtu této linie se tato linie zdiskretizuje v čase. Z toho plyne, že pro každý časový okamžik a bod, bude vypočtena hodnota intenzity magnetického pole. Tímto způsobem vznikne 3D mapa rozložení intenzity magnetického pole. 3D mapa se skládá z prostorové osy, časové osy a třetím rozměrem je výsledná hodnota intenzity magnetického pole. Následně pro přehlednější odečtení průběhů se z 3D map získají tři následující grafy. Časová projekce, která je projekcí závislosti intenzity magnetického pole v čase. Dalším je časoprostorová projekce, která zobrazuje intenzitu magnetického pole v závislosti vzdálenosti a čase. Poslední projekcí je prostorová projekce, která je závislostí intenzity magnetického pole na vzdálenosti x.

4.1 Intenzita magnetického pole při provozních stavech

Námi provedené výpočty intenzity magnetického pole byly provedeny na stožárech typu Donau 2x400 kV, Portál 2x220 kV a Soudek 2x110 kV. Tyto stožáry byly zvoleny kvůli různým rozměrům a tím pádem různým vzdálenostem k výpočetnímu bodu M a také kvůli napěťovým hladinám velmi vysokého napětí, které se u nás používají v praxi pro přenos energie. Výpočty byly prováděny pro 6 různých konfigurací fází při klasickém provozním stavu, kdy se brala v potaz pouze okolnost, že vodiče jsou rovnoběžné, bez průvěsu ve výškách, které odpovídají konstrukčním rozměrům daných typů stožárů. V praxi se používají svazkové vodiče, které daný fázový vodič rozdělí do více vodičů menšího průřezu v jednom svazku. Svazkové vodiče bychom brali v úvahu pouze pro vyšetření magnetického pole v blízkosti těchto vodičů, kde by se projevil jejich vliv. Vzhledem k tomu, že se výpočetní bod nachází ve velké vzdálenosti od výpočetního bodu M, se svazkový vodič neprojeví a tak ho můžeme zanedbat. Konfigurace fází byly označeny písmeny A (první fáze bez fázového posunu), B (druhá fáze s fázovým posunem o -120°) a C (třetí fáze s fázovým posunem o 120°). Další zjednodušující okolností byla zatíženost vedení, kdy jsme brali v potaz pouze klasické denní zatížení nikoliv maximální přenášený výkon. Tyto výjimečné stavy jsou do výpočtů zahrnuty proto, abychom dokázali, že na velikost a rozložení intenzity magnetického pole má největší vliv nejen konfigurace fází, ale i průhyb a zvýšený zátěžný proud. Výsledky těchto výpočtů jsou popsány v další podkapitole v níž se řeší rozložení magnetického pole v okolí stožáru typu Donau 2x400 kV, Portál 2x220 kV a Soudek 2x110 kV. Protékané proudy daným vedením jsme pro naše výpočty zvolili v okolí stožáru typu Donau 2x400 kV efektivní hodnotu proudu 1000 A, přičemž maximální zatížení bylo zvoleno 2500 A. Pro provozní zatížení u stožáru typu Portál 2x220 kV byla použita efektivní hodnota proudu 500 A, při maximálním zatížení jsme zvolili efektivní hodnotu 1000 A. Pro stožár typu Soudek 2x110 kV byla použita efektivní hodnota proudu 300 A a maximální efektivní hodnota zatížení byla zvolena 600 A. Tyto zvolené hodnoty proudu jsou typické pro danou napěťovou hladinu.

4.1.1 Závislost intenzity magnetického pole na konfiguraci fází

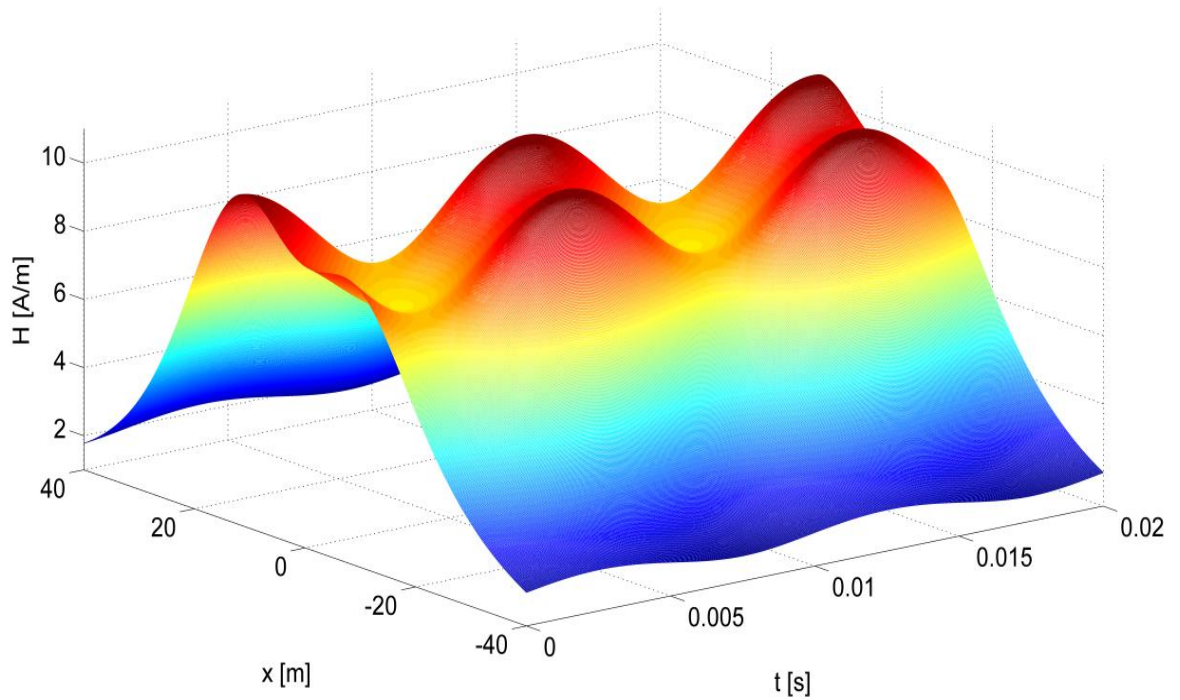
Stožár typu Donau 2x400 kV

Tab. 4-1 Maximální hodnoty pro různé konfigurace fází - Donau 2x400 kV

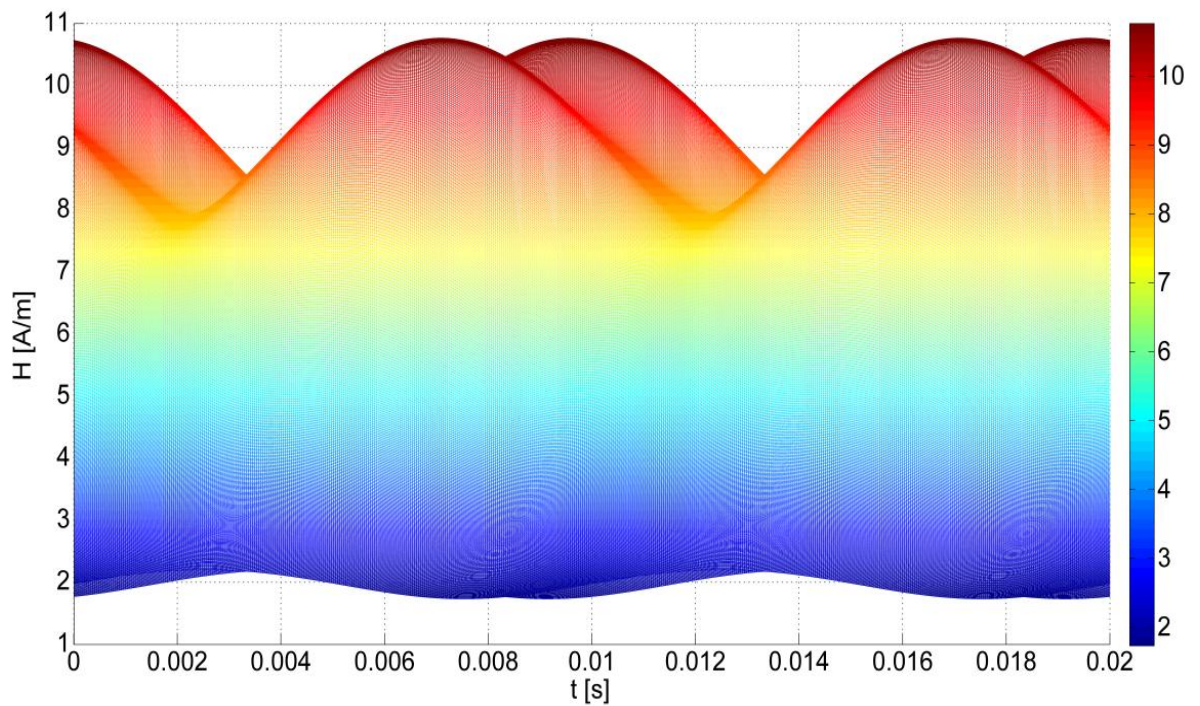
Konfig.	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	ABC - ABC	7,5129	9,4410
2.	ABC - ACB	10,0766	12,6626
3.	ABC - BAC	10,0766	12,6626
4.	ABC - BCA	7,0162	8,8168
5.	ABC - CAB	10,7636	13,5259
6.	ABC - CBA	10,5211	13,2212

Z vypočtených hodnot vyplývá, že nejnepříznivější konfigurací fází je konfigurace 5. ABC-CAB. Tato konfigurace vykazuje dle tabulky 4-1 nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole a to hodnotu 10,7636 A/m. Ostatní konfigurace fází zejména 6.ABC-CBA zaostala za nejvyšší hodnotou pouze o 0,2 A/m. Hodnota intenzity magnetického pole v případě 2. ABC-ACB a 3.ABC-BAC konfigurace se rovnala, přičemž zaostala za nejvyšší hodnotou téměř o 0,7 A/m. Nejpriznivější konfigurací je konfigurace 4. ABC-BCA, kde byla zjištěna nejnižší hodnotu a to 7,0162 A/m. Tato nejnižší vypočtená hodnota může být způsobena vhodným rozmístěním fází tak, aby se vlivy jednotlivých fází vykompenzovaly mezi sebou.

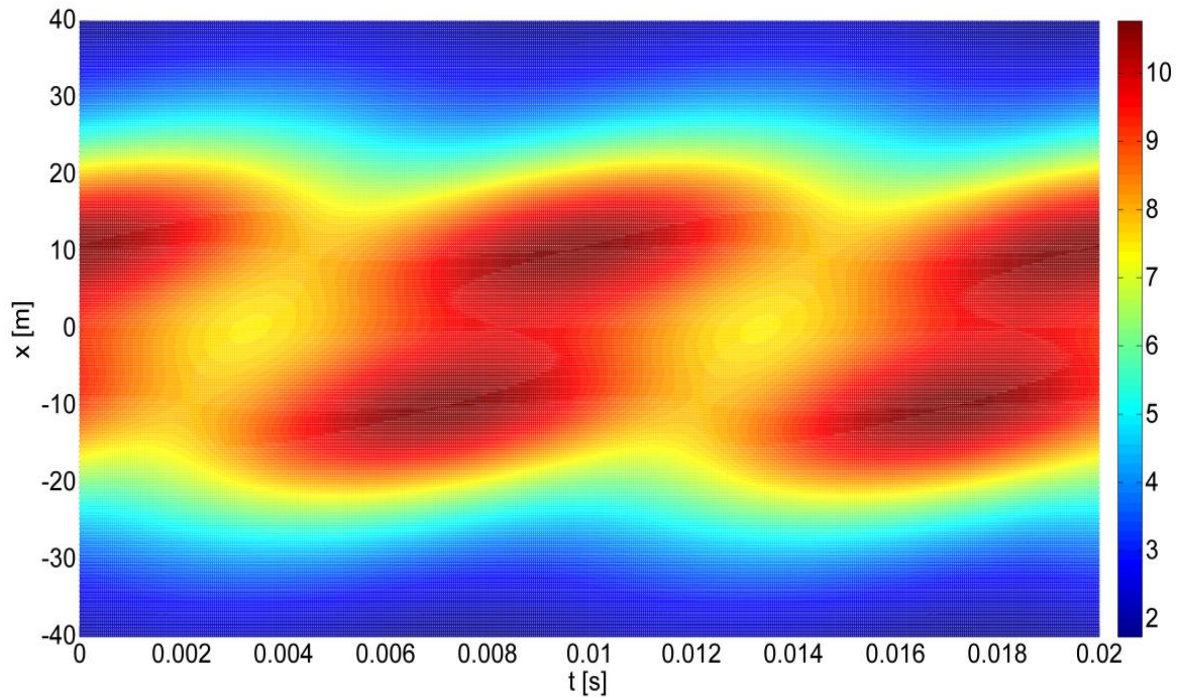
V následujících stranách se nachází časoprostorové rozložení (3D mapa), která řeší rozložení intenzity magnetického pole, a z ní vykreslené projekce pro stožár typu Donau 2x400kV. Nejprve je poukázáno na časoprostorové rozložení intenzity magnetického pole. V zápětí je pro snáší přehlednost vykreslena časová projekce, časoprostorová projekce a prostorová projekce intenzity magnetického pole pro nejnepříznivější konfiguraci fází. Poté je v tabulkách vykreslena 3D mapa a další grafy vybraných konfigurací, se kterými lze porovnat nejnepříznivější výsledky konfigurace ABC-CAB.



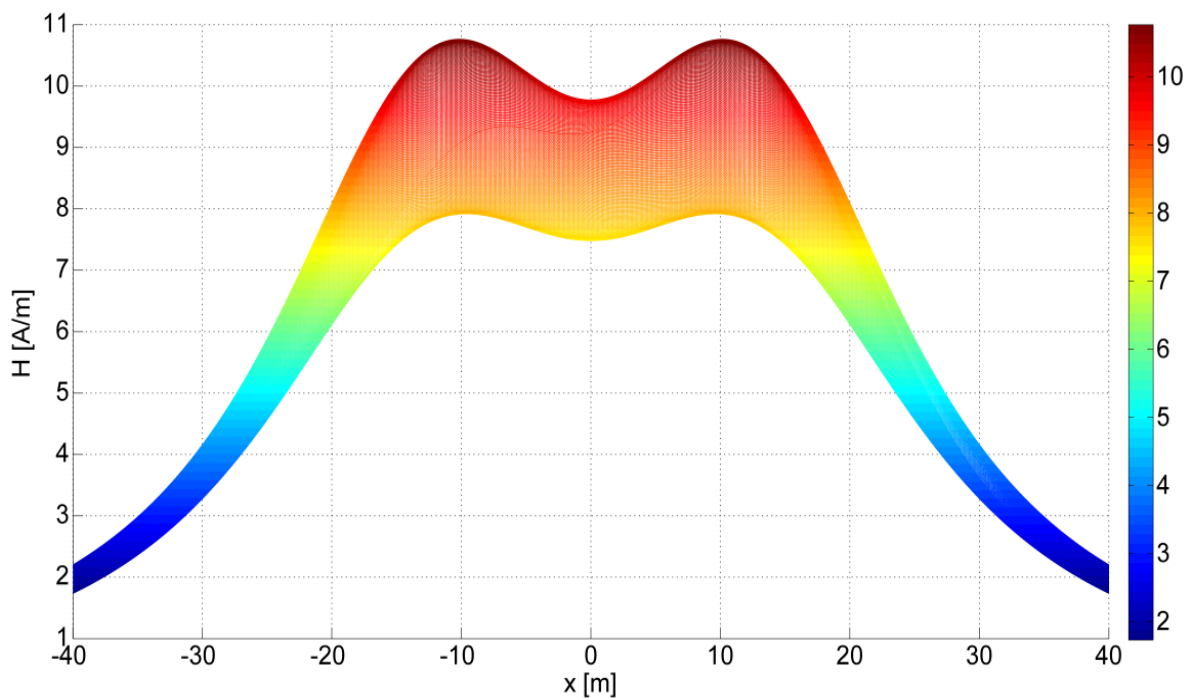
Obr. 11 Časoprostorové rozložení (3D mapa) Donau ABC-CAB



Obr. 12 Časová projekce intenzity magnetického pole Donau ABC-CAB

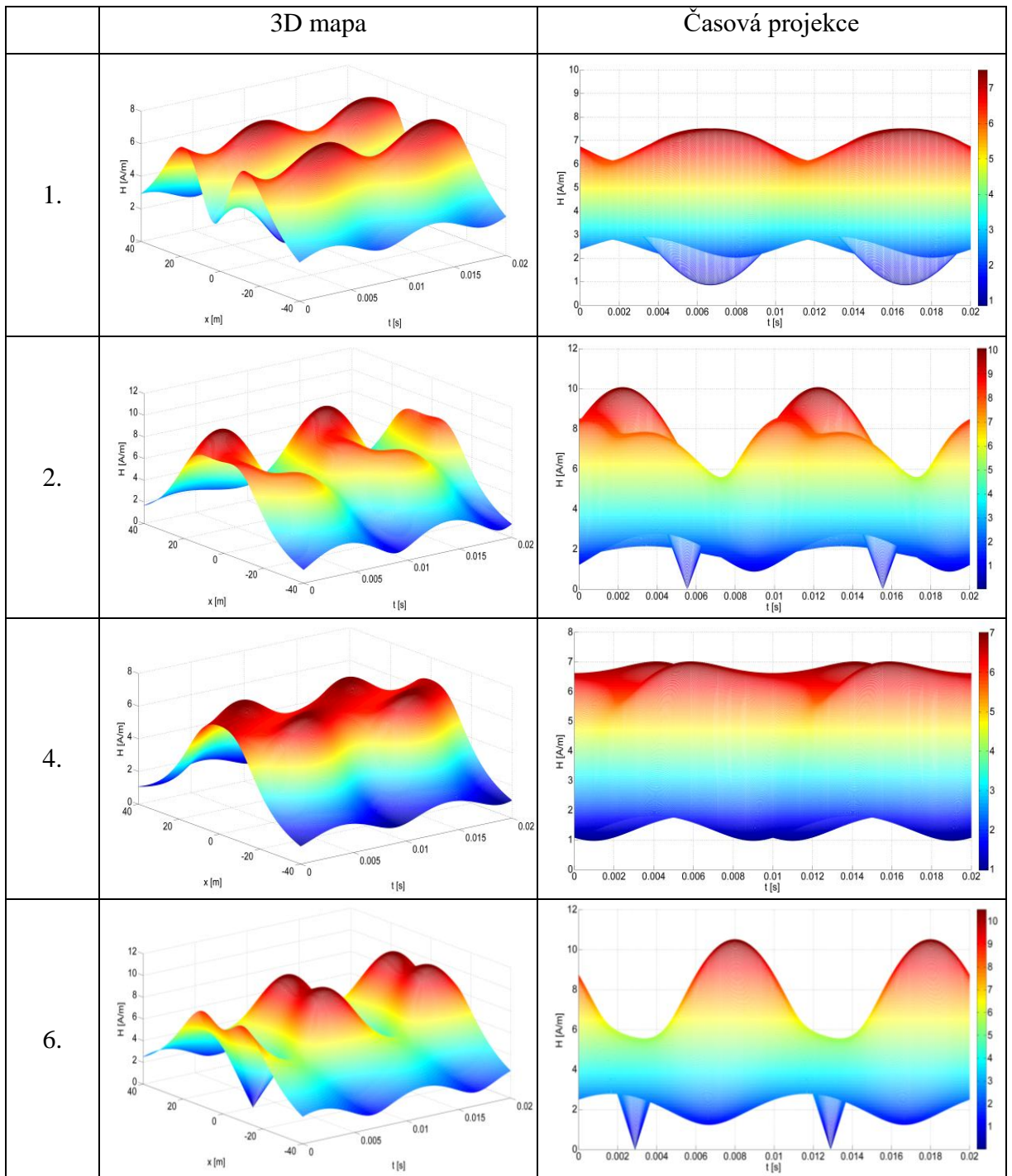


Obr. 13 Časoprostorová projekce intenzity magnetického pole Donau ABC-CAB

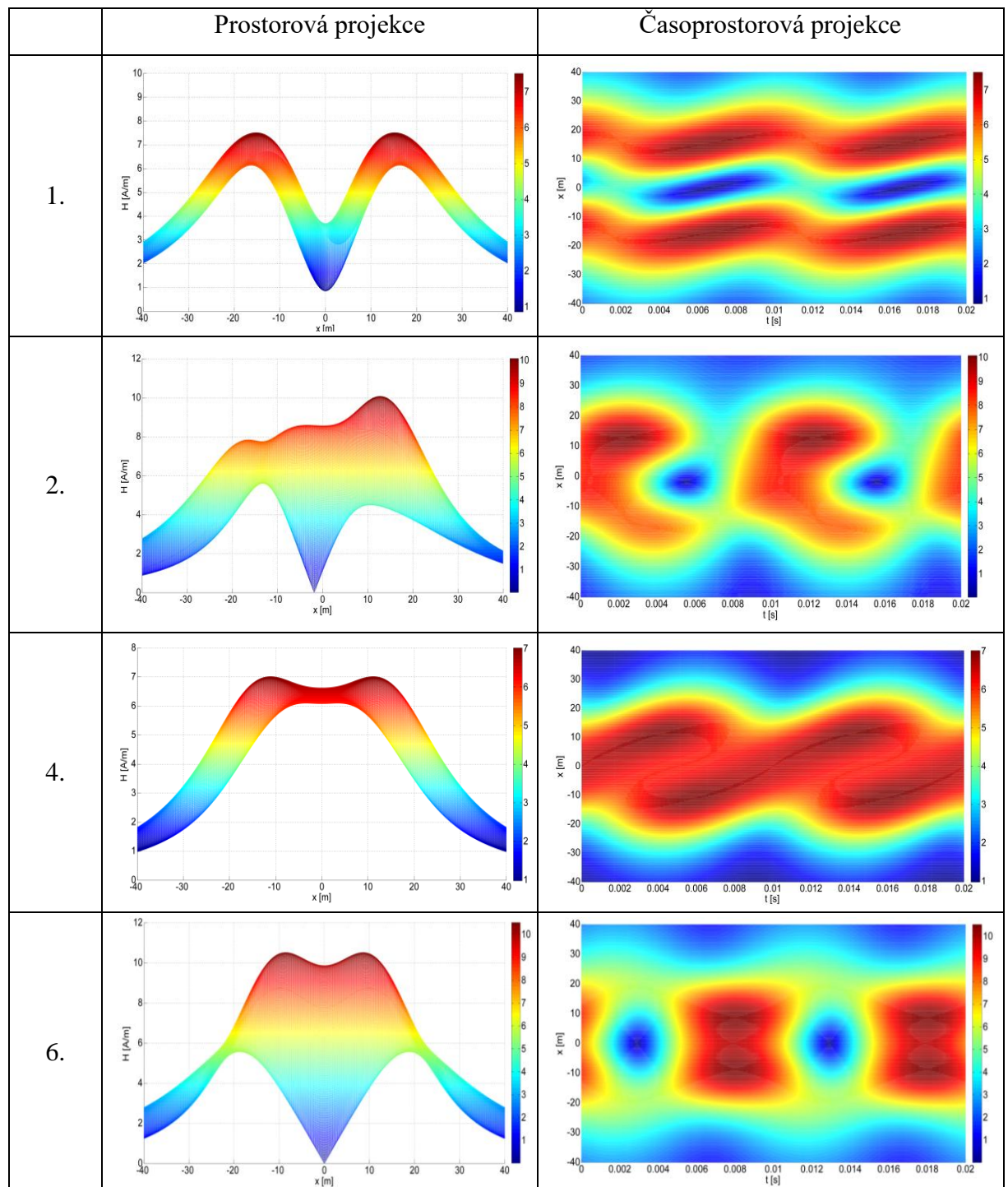


Obr. 14 Prostorová projekce intenzity magnetického pole Donau ABC-CAB

Tab. 4-2 3D mapa a Časová projekce pro ostatní konfigurace fází Donau 2x400 kV



Tab. 4-3 Prostorová a Časoprostorová projekce pro ostatní konfigurace fáze Donau 2x400 kV



Z obr.14, který graficky popisuje chování intenzity magnetického pole v závislosti na vzdálenosti x , je patrné, že maximální hodnoty intenzity magnetického pole pro nejnepříznivější kombinaci 5. ABC-CAB mají maxima vzdálené od osy přibližně 11m, přičemž hodnota v ose stožáru je menší oproti vrcholovým hodnotám. Podobně je na tom i konfigurace 4. ABC-BCA, která má totožný rozsah maximálních hodnot, ale s nižšími

hodnotami. Konfigurace 2.ABC-ACB a 3.ABC-BAC vykazovaly totožné výsledky, ale 3. konfigurace byla inverzí 2. a tak zde není zobrazen její průběh. Obě konfigurace také nemají maximální hodnoty v ose (hodnota odpovídající 0 metrů), ale jejich maxima začínají zhruba 15 metrů od osy. První konfigurace ABC-ABC vykazovala ojedinělé prostorové rozložení. Maxima se pohybovala totožně s předchozími konfiguracemi, ale jako jediná měla lokální minimum v ose stožáru. Zajímavé hodnoty byly vypočteny i u obr.13, který popisuje průběh intenzity magnetického pole ve vzdálenosti x v závislosti na čase. Zde je vidět, že intenzita, vyvolaná střídavým proudem, se neustále pohybuje ve vysokých hodnotách a to po celém rozmezí od -20 do 20 metrů. Podobný průběh vykazují konfigurace 4. a konfigurace 1. , kde se projevují lokální maxima ve vzdálenosti 20 metrů a naopak ve vzdálenosti 0 metrů má lokální minima.

Stožár typu Portál 2x220 kV

Tab. 4-4 Maximální hodnoty pro různé konfigurace fází - Portál 2x220 kV

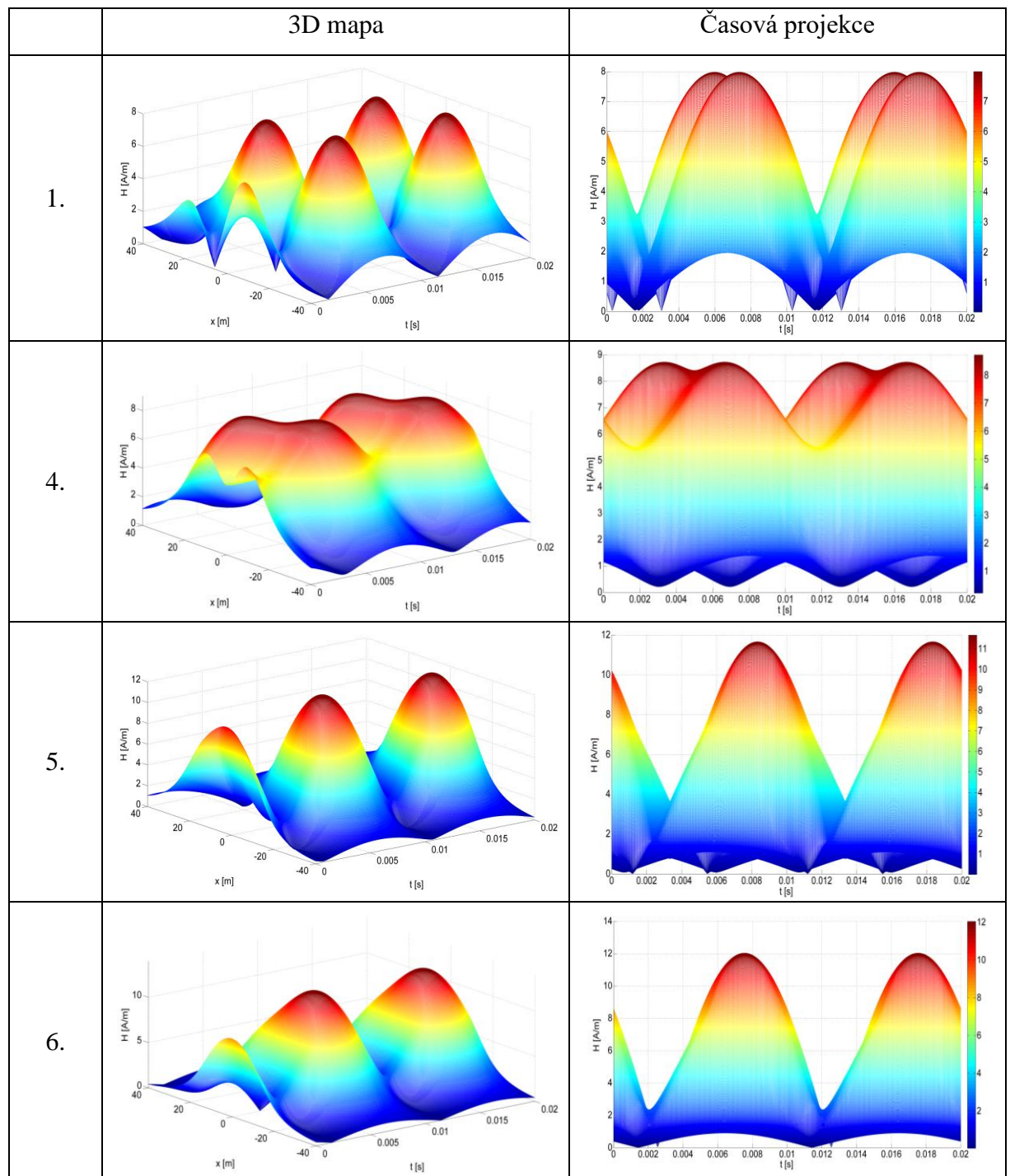
	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	ABC - ABC	7,9818	10,0302
2.	ABC - ACB	8,1801	10,2794
3.	ABC - BAC	8,1801	10,2794
4.	ABC - BCA	8,7302	10,9707
5.	ABC - CAB	11,6706	14,6657
6.	ABC - CBA	12,0447	15,1358

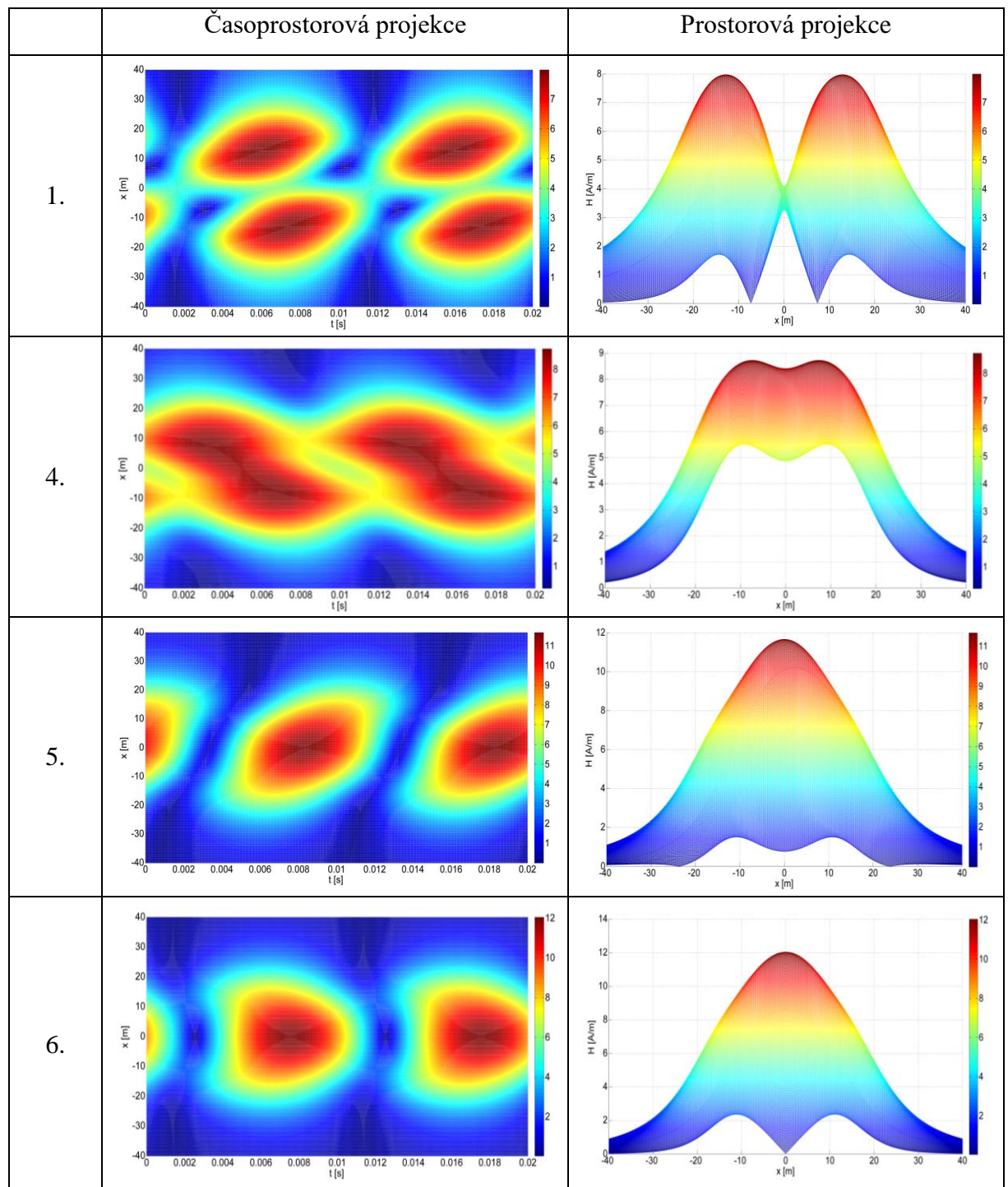
Z vypočtených hodnot vyplývá, že nejnepríznivější konfigurací fází je konfigurace 6. ABC-CBA. Tato konfigurace vykazuje dle tabulky 4-7 nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole 12,0447 A/m. Ani konfigurace fází 5. ABC-CAB není moc příznivá. Vykazovala totiž druhou nejvyšší hodnotu 11,6706 A/m. Za nejvyšší hodnotou zaostala zhruba o 0,4 A/m. Zbylé konfigurace fází, až na výjimku 4. konfigurace ABC-BCA, se téměř rovnaly. Pro vypočtené rozložení fází se maximální hodnoty nepatrně pohybovaly ve vyšších mezích než hodnoty u stožáru typu Donau 2x400 kV. To může být zapříčiněno poskládáním fází téměř v jedné rovině, tudíž se dané fáze méně kompenzují mezi sebou, než jak tomu bylo u předchozího typu stožáru.

Dále je v přehledné tabulce graficky zobrazena 3D mapa a grafy, které poukazují na nejzajímavější průběhy včetně nejnepríznivější konfigurace fází 6. ABC-CBA pro typ stožáru Portál 2x220kV. Nejprve je zobrazeno časoprostorové rozložení intenzity

magnetického pole, které má na ose x čas, na ose y vzdálenost bodu x a na ose z intenzitu magnetického pole. Dalším grafem je časová projekce intenzity magnetického pole. Na další straně se nachází tabulka s časoprostorovou projekcí intenzity magnetického pole a prostorovou projekcí intenzity magnetického pole. Na závěr je přidána tabulka pro porovnání nejnepriznivější konfigurace s 3D mapami a dalšími grafy ostatních konfigurací.

Tab. 4-5 3D mapa a Časová projekce pro ostatní konfigurace fázi Portál 2x220 kV



Tab. 4-6 Časoprostorová a Prostorová projekce pro ostatní konfigurace fází Portál 2x220 kV

Nejnepříznivější 6. konfigurace se vyznačuje tím, že dosáhla nejvyšších hodnot intenzity magnetického pole ve vzdálenosti x v závislosti na čase, ale nejvyšší hodnoty se projevují pouze jako lokální maxima a jsou prostřídány s lokálními minimy. Tím se toto nepříznivé rozložení fází odlišuje od stožáru typu Donau, kde nejnepříznivější konfigurace fází dosahovala v tomto průběhu neustále vysokých hodnot. Podobný průběh s lokálními minimy a maximy můžeme vidět u 5. konfigurace fází. Z časové projekce nejnepříznivější

konfigurace lze vidět, že maximální hodnota intenzity je vyvolána přímo v ose stožáru a s klesající vzdáleností klesá. Téměř shodný průběh s nižšími hodnotami můžeme vidět u 5. konfigurace. 1. konfigurace fází má lokální maximum ve vzdálenosti zhruba 12 metrů čímž se odlišuje od 4. konfigurace, která má maxima ve vzdálenosti kolem 9 metrů od osy stožáru.

Stožár typu Soudek 2x110 kV

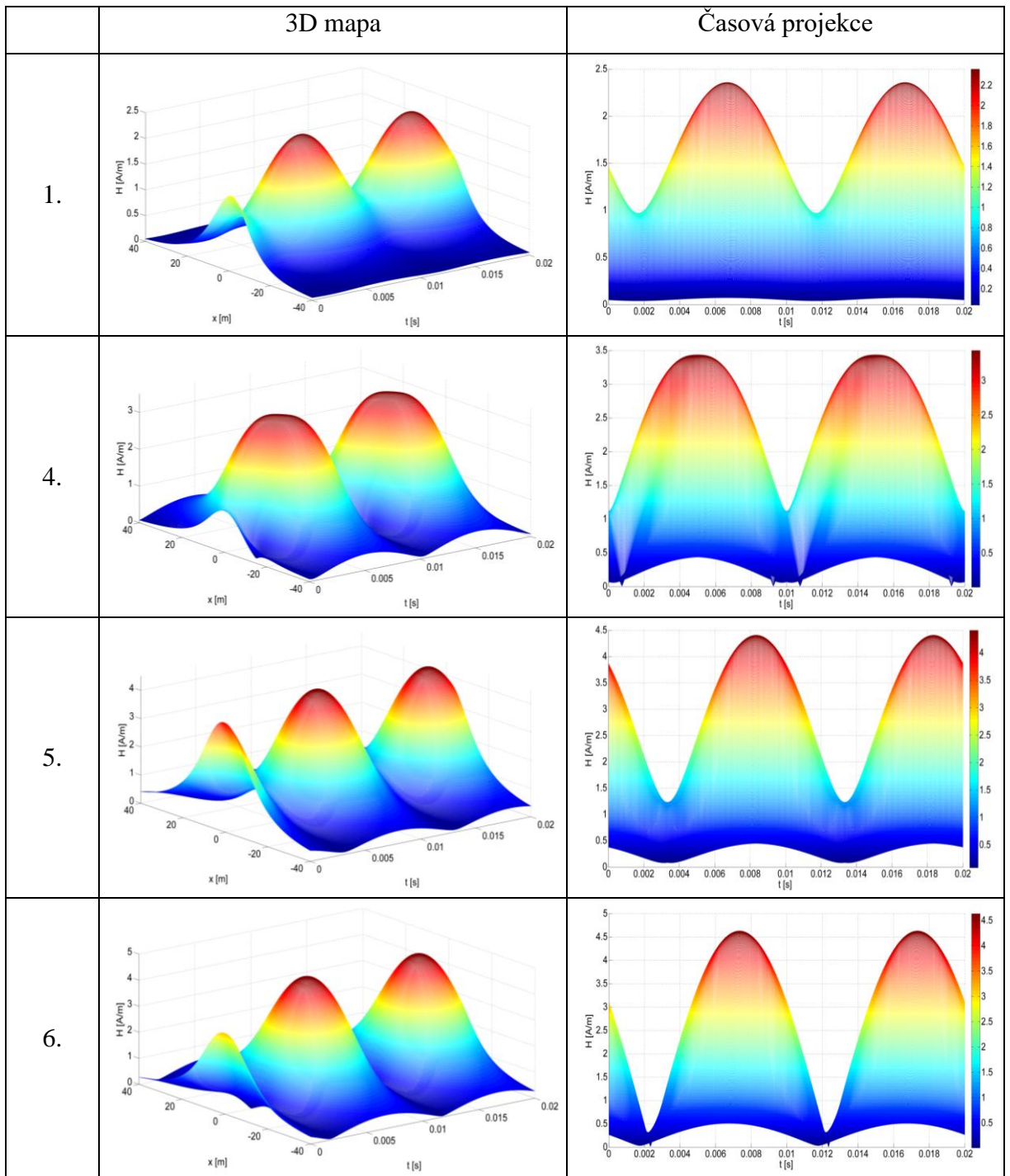
Tab. 4-7 Maximální hodnoty pro různé konfigurace fází - Soudek 2x110 kV

	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	ABC - ABC	2,3592	2,9647
2.	ABC - ACB	2,5070	3,1504
3.	ABC - BAC	2,5070	3,1504
4.	ABC - BCA	3,4371	4,3192
5.	ABC - CAB	4,4090	5,5405
6.	ABC - CBA	4,6330	5,8220

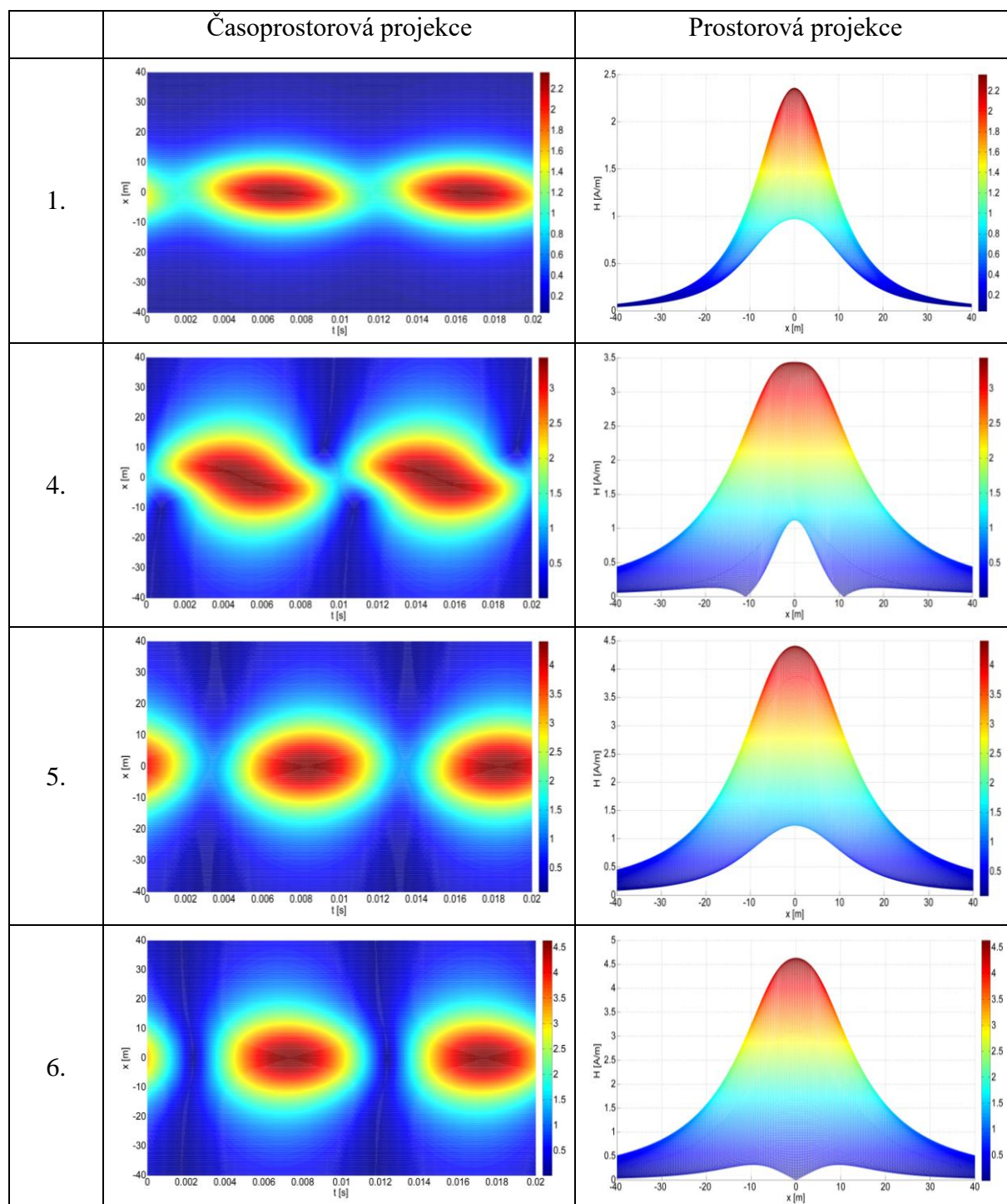
Při výpočtech pro stožár typu Soudek jsme zjistili, že nejnepříznivější konfigurací fází je konfigurace 6. ABC-CBA. Poslední konfigurace vykazuje nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole a tou je 4,6330 A/m, vyplývá to z tabulky 4-10. Konfigurace fází 5. ABC-CAB také nemá moc příznivý vliv na okolí. Intenzita magnetického pole zde dosáhla druhé nejvyšší hodnoty, která je o pouhé dvě desetiny nižší než v prvním případě, a to 4,4090 A/m. Ostatní konfigurace fází opět až na výjimku 4. konfigurace ABC-BCA se téměř rovnaly. Dalším aspektem je nejvhodnější umístění fází, při kterém se většina fází vykompenzuje a tím pádem vznikne nejnižší intenzita magnetického pole.

Na dalších stranách můžete vidět 3D mapy a grafy pro nejnepříznivější konfiguraci a také tabulku určenou pro porovnání výsledků, které byly popsány v předchozích odstavcích.

Tab. 4-8 3D mapa a Časová projekce pro ostatní konfigurace fází Soudek 2x110 kV



Tab. 4-9 Časoprostorová a Prostorová projekce pro ostatní konfigurace fáze Soudek 2x110 kV



Při nejnepříznivější konfiguraci fází opět dochází k lokálním maximům a lokálním minimům. Vyplývá to z tabulky 4-11, z časové projekce intenzity magnetického pole. Podobný průběh jsme mohli vidět při vyšetření intenzity magnetického pole v okolí stožáru typu Portál 2x220 kV. Hodně podobné průběhy s lokálními minimy a maximy mají i 1. 4. a 5. konfigurace. Maximální hodnota pro nejnepříznivější konfiguraci intenzity magnetického pole také dosahuje v okolí osy stožáru a dále s rostoucí vzdáleností se snižuje. To samé

můžeme říct o konfiguracích 1. 4. a 5., které mají podobné průběhy intenzity v závislosti na vzdálenosti x .

4.1.2 Závislost intenzity magnetického pole na proudovém zatížení a průvěsu

Námi provedené výpočty jsme provedli i pro zvláštní stavy. Mezi ně patří výpočet intenzity magnetického pole pro stožár, kolem kterého je přenášeno maximální zatížení. Při prvotních výpočtech jsme uvažovali dlouhé rovnoběžné vodiče bez průvěsu, které byly umístěny dle výkresové dokumentace, ale pro zvláštní stavy budeme uvažovat i vodiče s průvěsem, které jsme snížili o maximální dovolený průvěs. Prověšení vodiče může nastat vlivem tepelné roztažnosti, která může být způsobena zvýšeným průtokem proudu. Tyto výjimečné výpočty byly spočteny kvůli zjištění různých vlivů konfigurací fází a průvěsu na výsledky a také kvůli poukázání na bezpečnost provozu. Pro výpočty byla použita pouze jedna konfigurace fází a to vždy ta, která v předešlých výpočtech vykazovala nejzajímavější výsledky.

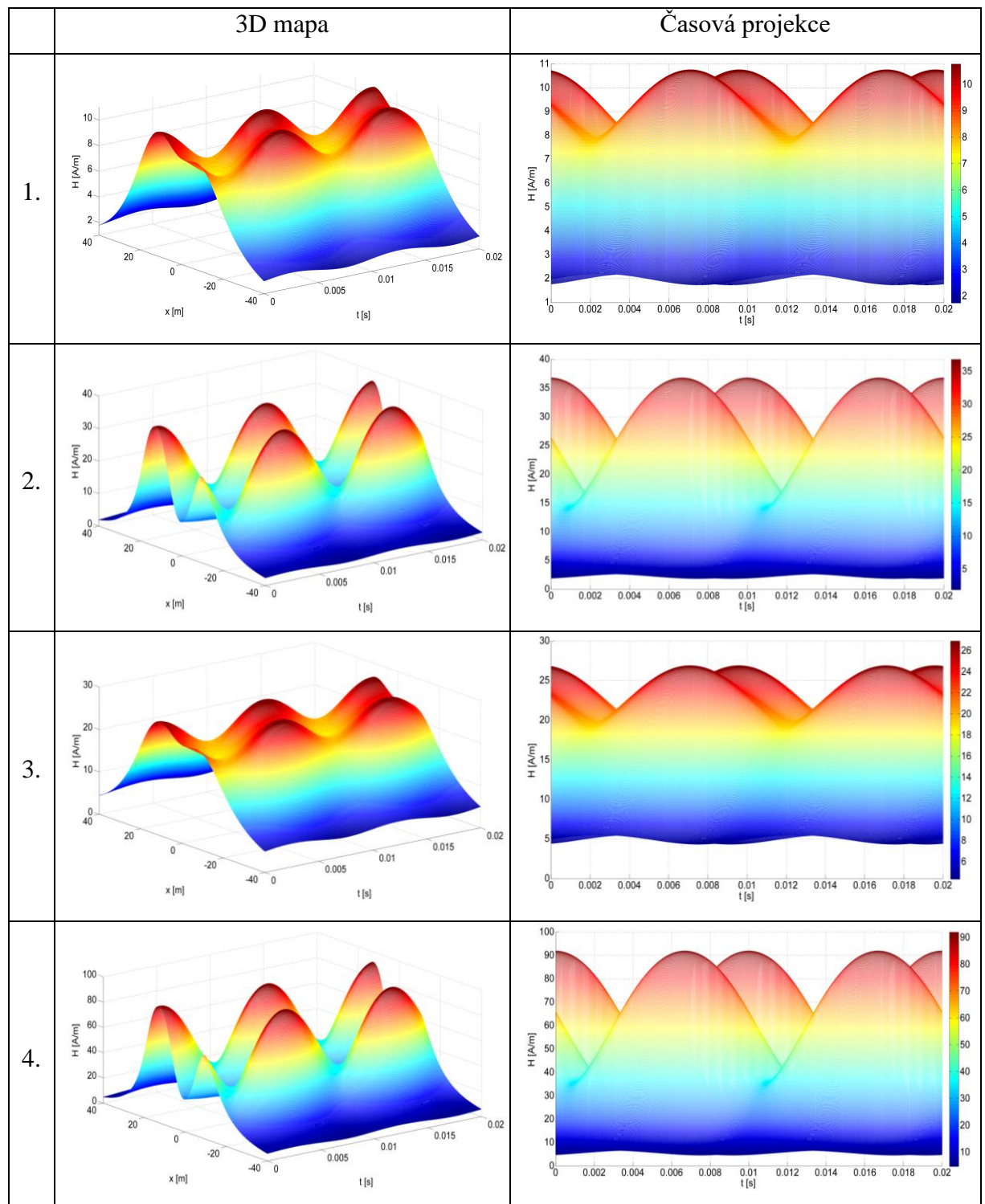
Stožár typu Donau 2x400 kV

Pro stožár typu Donau 2x400 kV jsme předpokládali maximální zatížení proudem o efektivní hodnotě 2500 A. Tato hodnota je dána dovolenou zatížitelností vodiče. Použili jsme nejnepříznivější konfiguraci ABC-CAB. Pro naši analýzu magnetického pole s průvěsem vodičů, jsme vodiče snížili o 7,8 metrů. Tento průvěs odpovídá minimální výšce maximálního průvěsu vodiče, která může být použita. Předpokládáme, že nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole budou mít vodiče s průvěsem, protože vzdálenost mezi fázovým vodičem a výpočtním bodem M je menší. Tato úvaha vychází ze vzorce (10) a (11). Zvýšení proudu má také za následek zvýšení intenzity magnetického pole. To se nám také potvrdilo, jak je možné vidět v tabulce 4-10, kde dosáhl nejvyšší hodnoty právě stav maximálního zatížení s průvěsem. Tato hodnota je rovna 91,9729 A/m.

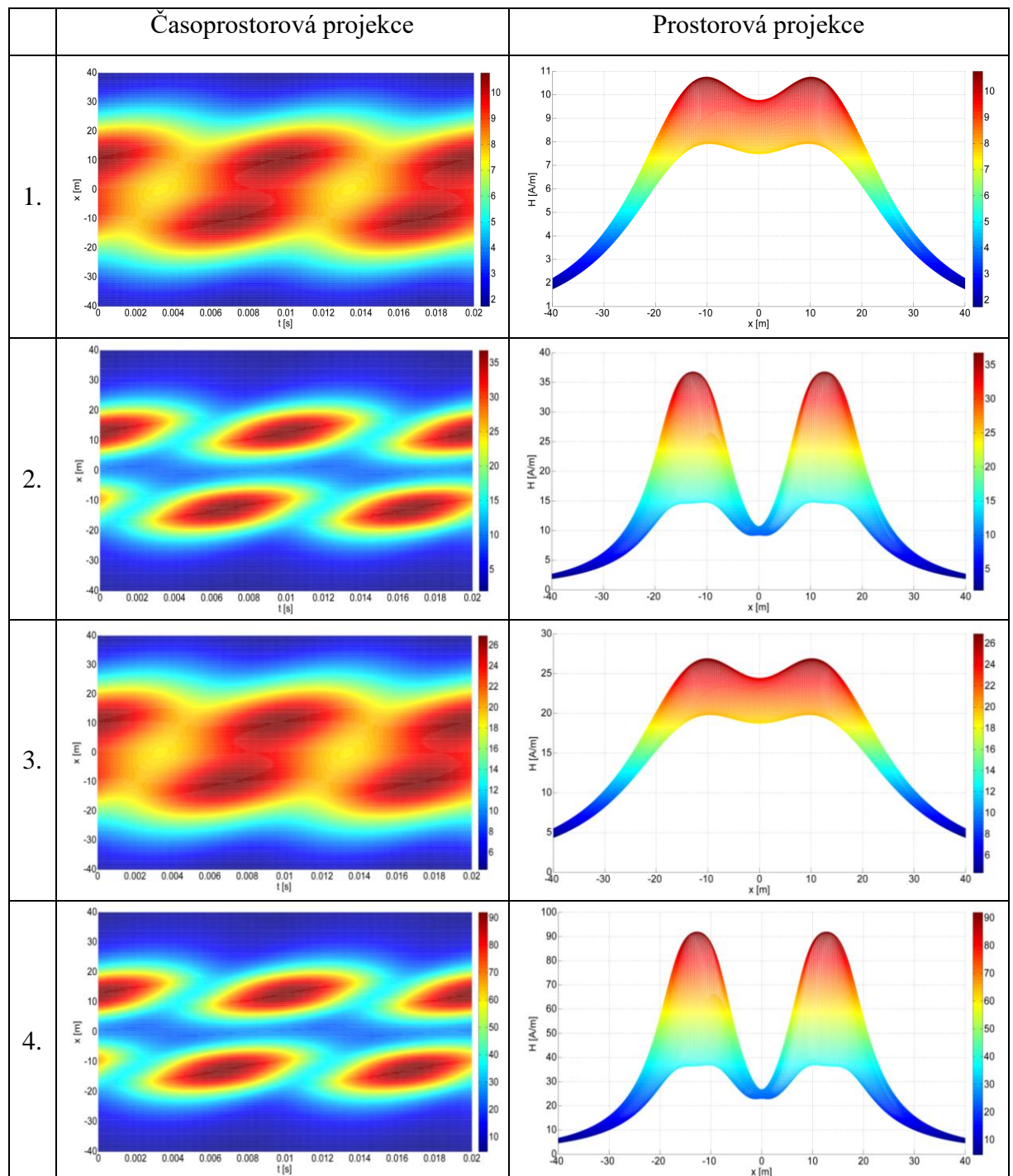
Tab. 4-10 Maximální hodnoty pro zvláštní stavy - Donau 2x400 kV

	Stav vedení	Průvěs	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	Provozní zatížení	Bez průvěsu	10,7636	13,5259
2.	Provozní zatížení	S průvěsem	36,7892	46,2307
3.	Maximální zatížení	Bez průvěsu	26,9091	33,8149
4.	Maximální zatížení	S průvěsem	91,9729	115,5766

Tab. 4-11 3D mapa a Časová projekce pro zvláštní stavy Donau 2x400 kV



Tab. 4-12 Časoprostorová a Prostorová projekce pro zvláštní stavy Donau 2x400 kV



Průvės fázových vodičů má znatelný vliv na výsledné rozložení intenzity magnetického pole. Obě dvě varianty, ať už provozní nebo maximální zatížení, vykazují maximální hodnoty intenzity magnetického pole až za vzdáleností 12 metrů, včetně lokálního minima v ose stožáru. To je způsobeno tím, že při průvėsu se projevují více spodní vodiče. Z tabulky 4-5 i z tabulky 4-6 je patrné, že maximální hodnota intenzity pro maximální zatížení je mnohem vyšší než pro provozní zatížení a však s podobajícími

se charakteristikami. V porovnání maximálního a provozního zatížení bez průvěsu (1. a 3.) je vidět taktéž podobný průběh, ale s rozdílnými hodnotami, což vyplývá z velikostí protékajících proudů.

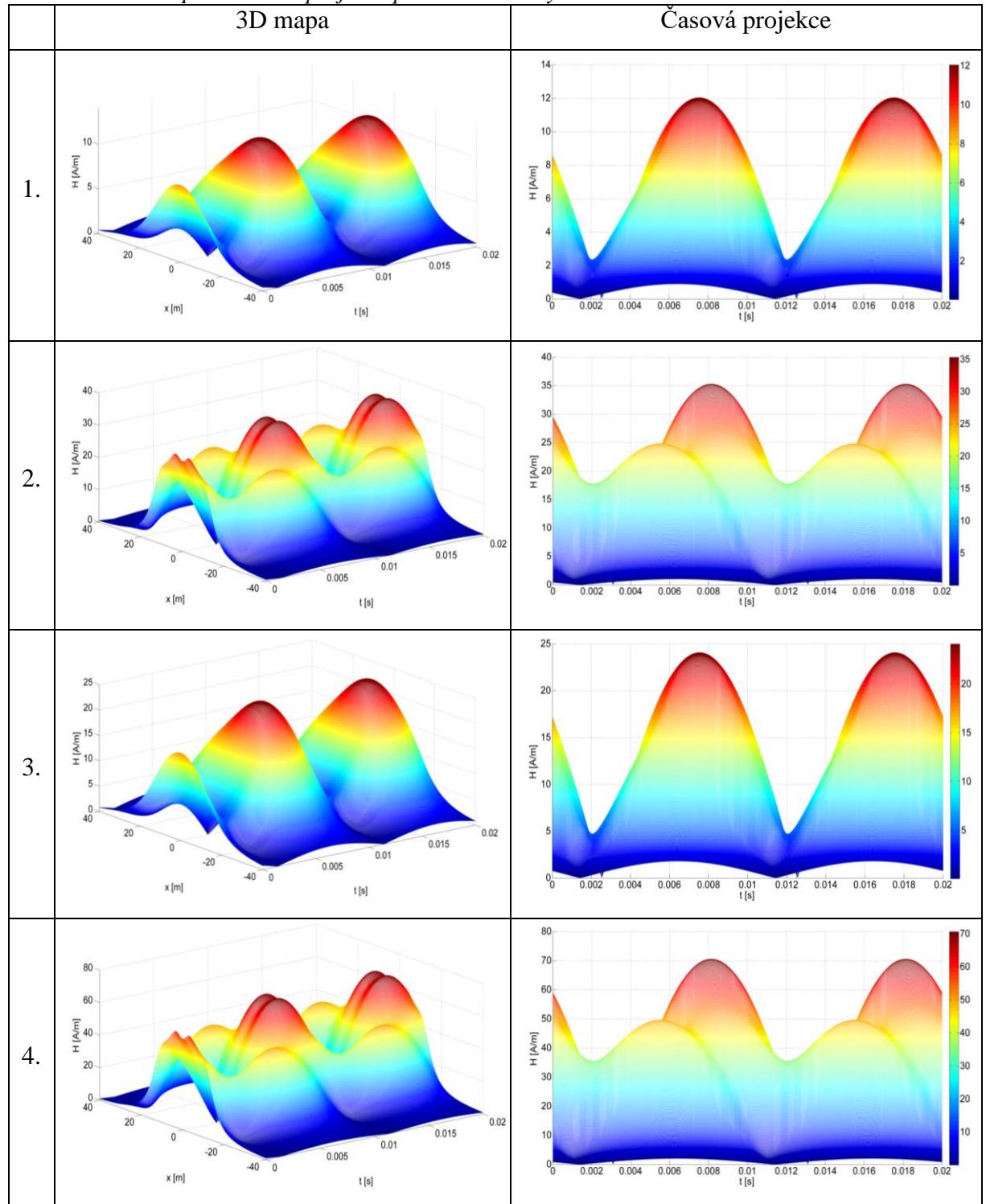
Stožár typu Portál 2x220 kV

Při vyšetřování rozložení magnetického pole v okolí stožáru typu Portál 2x220kV jsme určili maximální efektivní hodnotu přenášeného proudu 600 A. Tato hodnota je dána maximální dovolenou zatížitelností vodiče. Při snižování průvěsu vodičů jsme snížili vodiče o 6,7 metrů, což odpovídá napěťové hladině 220 kV a volné krajině bez stromů. Zde se nedá spoléhat na to, že největší vliv na magnetické pole budou mít nejnižše položené vodiče, protože stožár typu Portál má vodiče v jedné rovině a ve stejné výšce. Zde bude mít největší vliv konfigurace fází a přenášený proud. Rozložení magnetického pole bylo provedeno pro 6. konfiguraci ABC-CBA, protože při provozním zatížení dosáhla nejvyšších hodnot. Z vypočtených hodnot v tabulce 4-13 vyplývá, že nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole má 4. stav, kde při nejnepříznivější konfiguraci ABC-CBA, jsme použili průvěsy vodičů, kterým protékal proud maximálního zatížení. Zde dosáhla intenzita magnetického pole maximální hodnoty 70,6120 A/m.

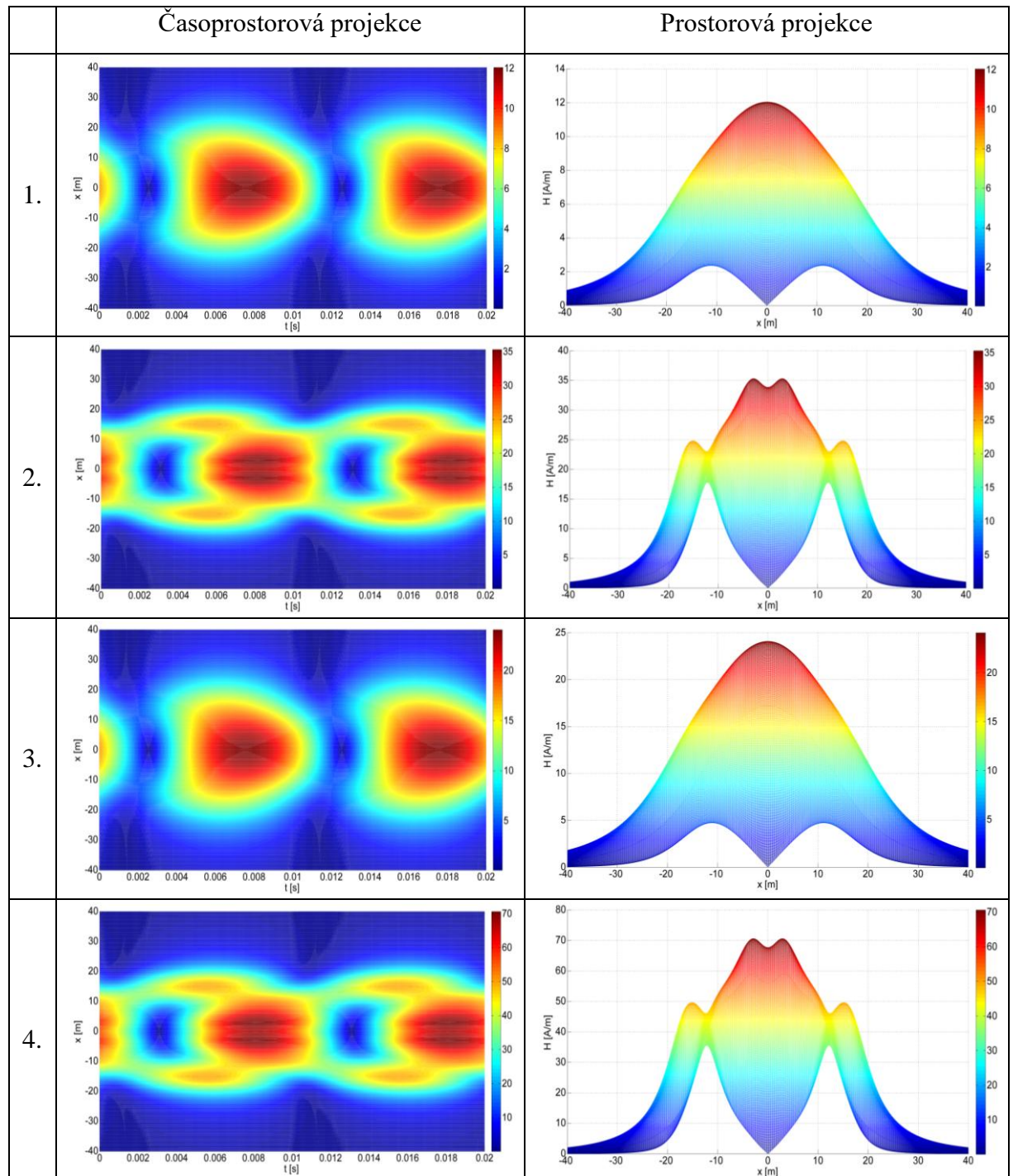
Tab. 4-13 Maximální hodnoty pro zvláštní stavy - Portál 2x220 kV

	Stav vedení	Průvės	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	Provozní zatížení	Bez průvěsu	12,0447	15,1358
2.	Provozní zatížení	S průvěsem	35,3060	44,3668
3.	Maximální zatížení	Bez průvěsu	24,0894	30,2716
4.	Maximální zatížení	S průvěsem	70,6120	88,7337

Tab. 4-14 3D mapa a Časová projekce pro zvláštní stavy Portál 2x220 kV



Tab. 4-15 Časoprostorová a Prostorová projekce pro zvláštní stavy Portál 2x220 kV



Z tabulky 4-14 a 4-15 je na první pohled vidět rozdíl mezi vodiči průvěsem a vodiči bez průvěsu. Průběhy obou stavů bez průvěsu jsou totožné, pouze se mění velikost intenzity magnetického pole. Z tabulky 4-15, kde se nachází graf $H=f(x)$, lze vysledovat, že nejvyšší hodnota intenzity magnetického pole se vyskytuje v ose stožáru a s následně se zvětšující vzdáleností klesá. V časové projekci, z tabulky 4-15, můžeme vidět střídavě se měnící lokální minima a maxima. Průběhy obou stavů s průvěsem se také shodují. Zajímavá je prostorová

projekce, ze které můžeme vyčíst lokální maxima ve vzdálenosti zhruba 2-3 metry, kde pak dochází k poklesu na lokální minimum ve vzdálenosti 12 metrů a poté dochází k nárůstu intenzity do lokálního maxima, které je cca v 15 metrech od osy stožáru. To může být způsobeno konfigurací fází, kdy se dané fáze jednoho potahu vykompenzují s fázemi druhého potahu.

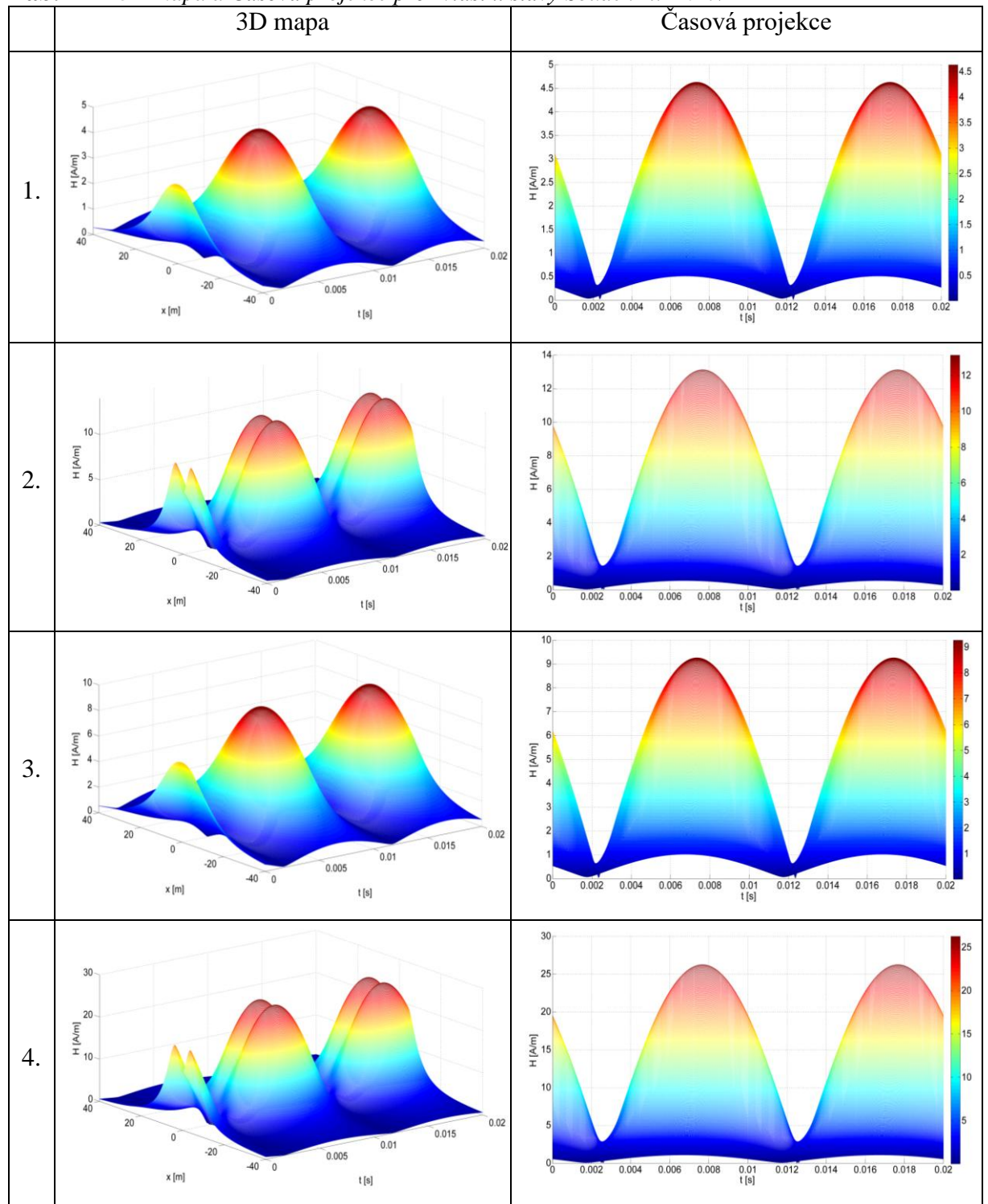
Stožár typu Soudek 2x110 kV

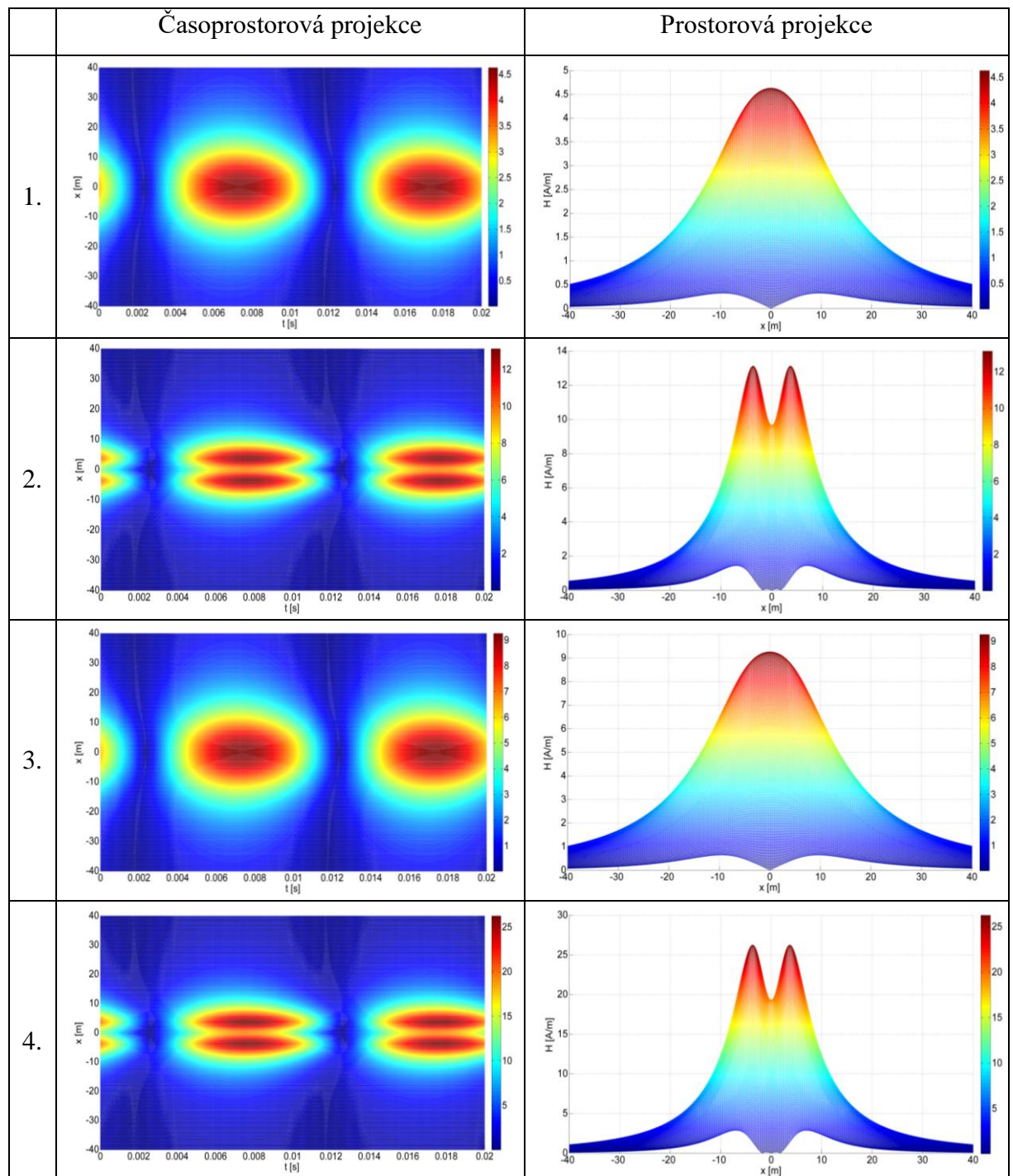
Pro vyšetření zvláštního stavu v okolí typu stožáru Soudek 2x110 kV jsme zvolili hodnotu maximálního proudu 600 A. Daný průvės jsme opět určili pro volnou krajinu bez stromů. Tentokrát byly sníženy fázové vodiče o 6 metrů. Tento průvės odpovídá minimální výšce maximálního průvěsu vodiče jak již bylo řečeno v kapitole 4.1. Stožár typu Soudek se odlišuje od ostatních tím, že je velmi úzký a fázové vodiče jsou umístěny téměř nad sebou. Z toho vyplývá, že na rozložení intenzity magnetického pole budou mít největší vliv vodiče, které jsou umístěny nejnižše. Z tabulky 4-16 vyplývá, že nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole má opět 4. stav. Nejnepříznivější konfigurace ABC-CBA, při provedení vodičů s protékajícími maximálními zátěžnými proudy, vykazuje maximální hodnotu 26,2611 A/m.

Tab. 4-16 Maximální hodnoty pro zvláštní stavy - Soudek 2x110 kV

	Stav vedení	Průvės	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	Provozní zatížení	Bez průvěsu	4,6330	5,8220
2.	Provozní zatížení	S průvěsem	13,1305	16,5003
3.	Maximální zatížení	Bez průvěsu	9,2660	11,6450
4.	Maximální zatížení	S průvěsem	26,2611	33,0007

Tab. 4-17 3D mapa a Časová projekce pro zvláštní stavy Soudek 2x110 kV



Tab. 4-18 Časoprostorová a Prostorová projekce pro zvláštní stavy Soudek 2x110 kV

V případě stožáru typu Soudek 2x110 kV můžeme také vidět shodné rozložení intenzity magnetického pole při stavech s prověšením i bez prověšení. Tyto 3D mapy a projekce se liší pouze v hodnotách, kde samozřejmě vyšší hodnoty dosahují stavy s maximálním zatížením. Při stavu vodičů bez průvěsu, ať už s provozním, nebo s maximálním zatížením, je dosaženo maximální hodnoty intenzity magnetického pole v ose stožáru. Od osy nadále intenzita klesá, jak je vidět v tabulce 4-18, prostorové projekce

intenzity magnetického pole ($H=f(x)$). Rozdílný průběh můžeme vysledovat u prověšených vodičů. Snížení výšky všech fází udělá z osy stožáru lokální minimum a přemístí maximální hodnoty do vzdálenosti zhruba 3 metrů. Časovou projekci mají všechny čtyři stavy téměř shodnou. Dochází zde k prostřídání lokálních maxim a minim.

4.2 Intenzita magnetického pole při poruchových stavech

Při vyšetřování rozložení intenzity magnetického pole pro poruchové stavy se použilo několik zjednodušujících okolností. Jako poruchový stav vedení byl použit pouze jednofázový zkrat, protože pravděpodobnost, že nastane je největší, ať už díky atmosférickým nebo mechanickým vlivům. Vyšetřování magnetického pole se vyšetřuje na napěťové hladině VVN, tudíž se jedná o soustavu přímo uzemněnou, kdy uzel sítě je přímo spojen se zemí. To má za následek, že zkratový proud se v praxi rozdělí v poměru impedancí země a zemních lan. Zemí protéká fiktivním vodičem, který je v hloubce stovek metrů. Poruchový proud se současně uzavírá i přes zemní lana. V případě použití více zemních lan dojde k rozdělení zkratového proudu v poměru impedancí každého zemního lana. Pro naši analýzu se uvažoval zjednodušující stav, který zkratový proud rozdělí mezi zemní lana a fiktivní zemní vodič v poměru 50% na 50%, protože v praxi se rezistivita země neustále mění. Také rozdělení mezi více zemních lan se provádí v poměru 50% na 50%. Vlivy fiktivního podzemního vodiče se pro naši analýzu zanedbají, protože vliv vodiče, který je více než 100 metrů od vzdálenosti x je nepatrný. Dalším zjednodušením se uvažuje zanedbání induktivních a kapacitních vazeb mezi fázovými vodiči, což znamená, že zkratový proud neovlivní svým působením okolní fáze. Neuvažujeme ani možnost vzniku fázového posunu mezi začátkem a koncem vedení, který v praxi může nastat, ani vliv změny reaktance generátorů v průběhu zkratového proudu.

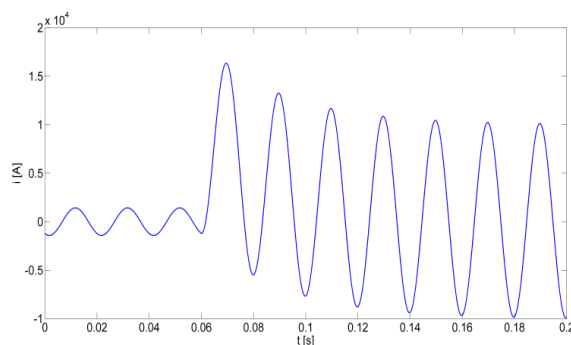
Samotné řešení pro poruchový proud, který je potřebný pro další analýzy magnetického pole, vychází z rovnice (6). Aby se ukázal vliv zkratového proudu na výslednou intenzitu magnetického pole, tak byl vytvořen proud, který se skládá z provozního proudu, který trvá tři periody před vznikem zkratu a z poruchového proudu, který přetrvává 7 period od vzniku zkratu. V potaz se také bere okamžik vzniku zkratu, který je proměnný a fázový posun zkratové impedance, který je konstantní a byl zvolen 85° . Výpočty byly provedeny opět na stožárech typu Donau 2x400 kV, Portál 2x220 kV a Soudek 2x110 kV. Analýza byla provedena pro jednu konfiguraci fází při poruchovém stavu, kdy se braly v potaz zjednodušující okolnosti popsané v kapitole 4.1, která se zabývá výpočtem rozložení intenzity magnetického pole v provozních stavech.

Stožár typu Donau 2x400kV

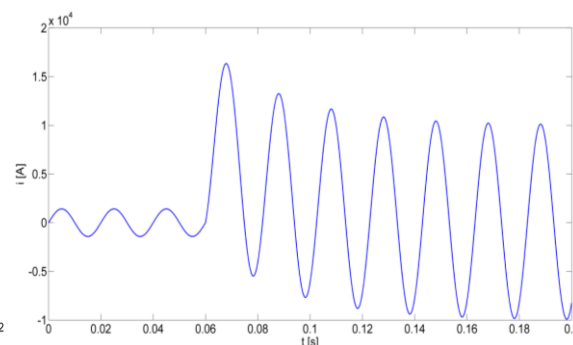
Pro naše vyšetřování rozložení magnetického pole v okolí Donau 2x400 kV nastal nejprve zkrat v jednom potahu (potah je brán jako jedna přenosová linka na vedení) v horním vodiči. Pro tento zkrat byla vyvinuta stejnosměrná složka zkratového proudu (obr. 15). Další variantou bylo vytvoření zkratového proudu v jednom ze spodních vodičů jednoho potahu, kde jsme zvolili zkratový proud se stejnosměrnou složkou (obr. 16) i bez stejnosměrné složky (obr. 17). Posledním výpočtem byla okolnost, že vznikne zkrat v obou potazích stejné fáze (obr. 18). V poruchové fázi se zvýšila efektivní hodnota postižené fáze na desetinásobek (tj. 10 kA). Ostatní zdravé fáze měly efektivní hodnotu stejnou jako při vyšetřování v provozních stavech (tj. 1000 A). Celý výpočet byl zhotoven pro nejneprůzračivější konfiguraci ABC-CAB.

Tab. 4-19 Maximální hodnoty pro různé poruchové stavy - Donau 2x400 kV

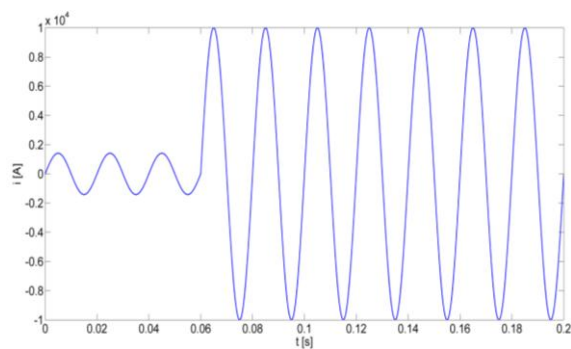
	Místo zkratu	Zkratový proud	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	Horní vodič B	SS složka	69,0207	86,7340
2.	Nejvzdálenější spodní vodič A	SS složka	158,6448	199,3593
3.	Nejvzdálenější spodní vodič A	Symetrický	92,8286	116,6519
4.	Nejbližší spodní vodič C-2x	SS složka	292,5063	367,5743



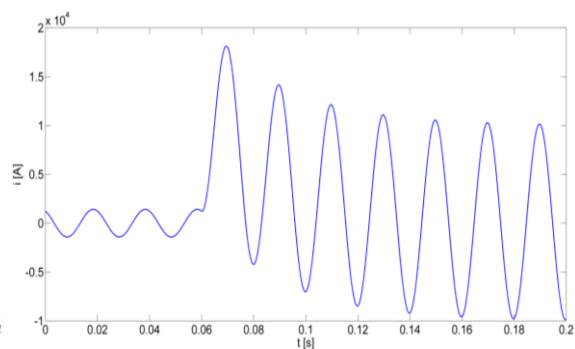
Obr. 15 Průběh zkratového proudu pro 1.



Obr. 16 Průběh zkratového proudu pro 2.

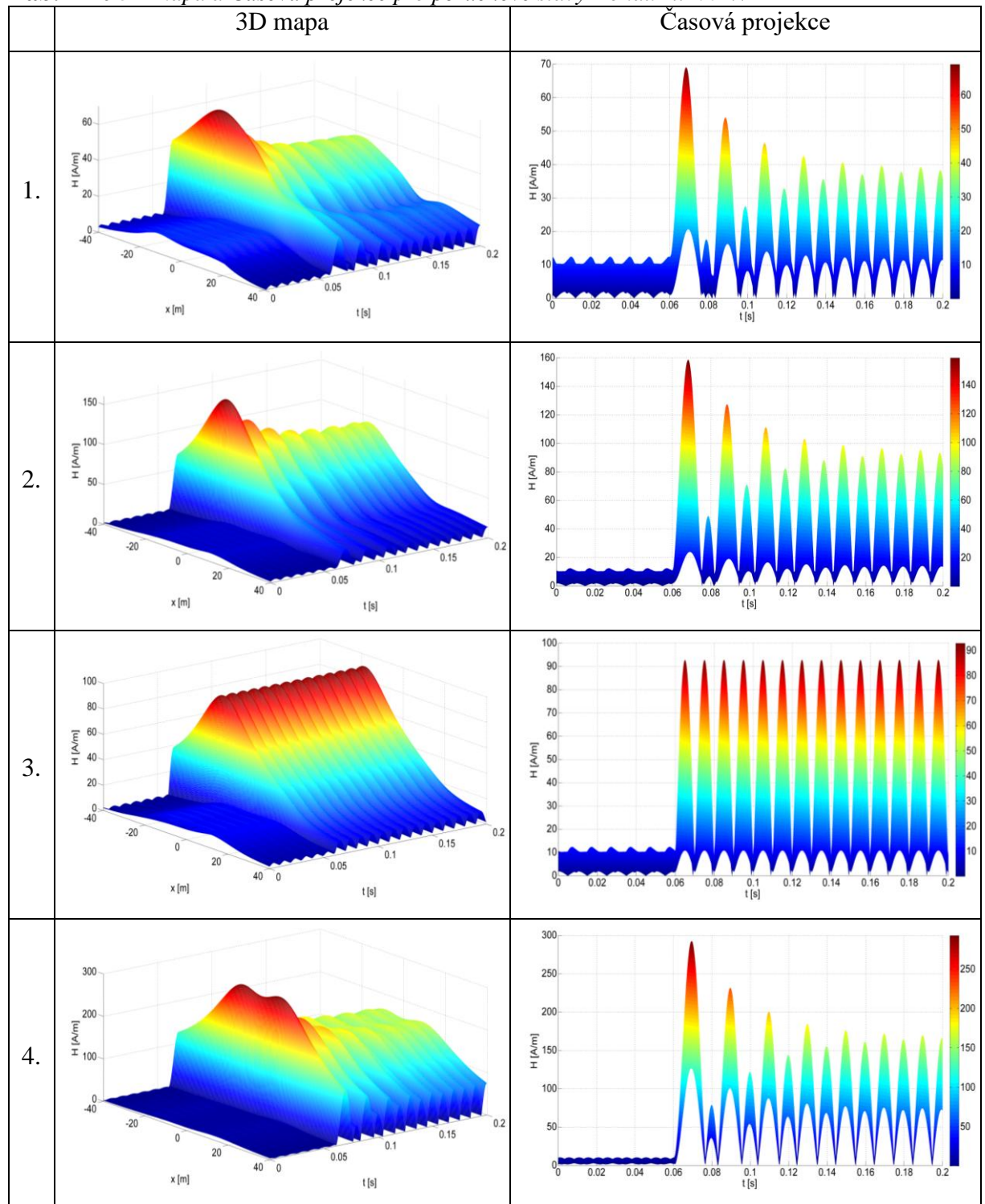


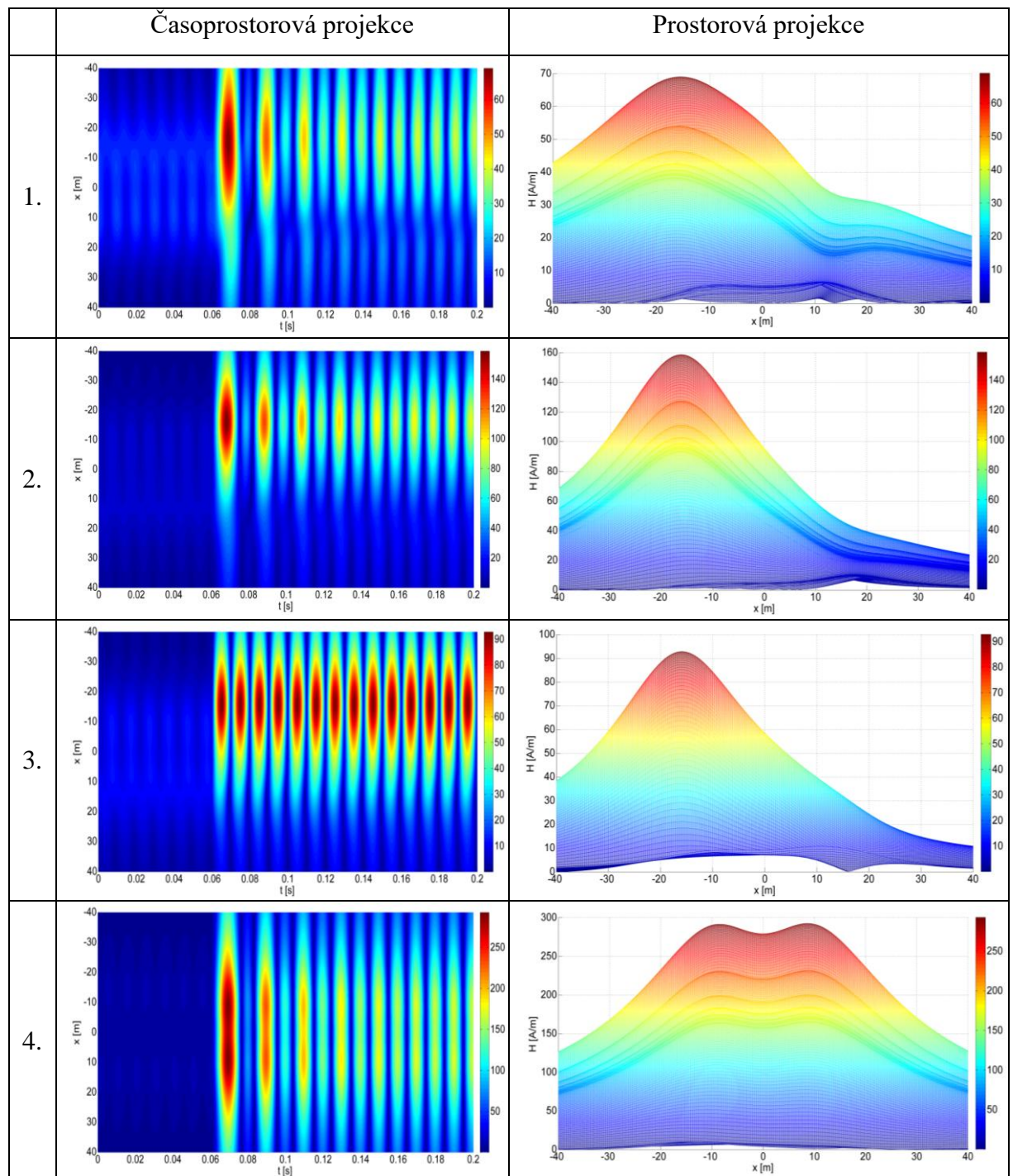
Obr. 17 Průběh zkratového proudu pro 3.



Obr. 18 Průběh zkratového proudu pro 4.

Tab. 4-20 3D mapa a Časová projekce pro poruchové stavy Donau 2x400 kV



Tab. 4-21 Časoprostorová a Prostorová projekce pro poruchové stavy Donau 2x400 kV

Z tabulky 4-20 a 4-21 vyplývá, že maxima intenzity magnetického pole při zkratu se posouvají blíže k postižené fázi. Při porovnání prvních dvou stavů vidíme, že ačkoliv jsou průběhy téměř totožné, tak průběhy se zkratovým proudem v níže umístěném vodiči nabývají vyšších hodnot. To má za následek menší vzdálenost mezi postiženým fázovým vodičem a analyzovaným bodem M. Hodnoty intenzity magnetického pole vyšly větší u zkratových proudů, kde se vyvinula stejnosměrná složka. Ta má za následek prvotní nárůst proudu, které svým nárůstem zvýší i maximální hodnoty intenzity magnetického pole, které nadále klesají.

Při zkratu, kde se nevyvine stejnosměrná složka, můžeme vidět konstantní maxima, která střídají s lokálními minimy. Zkrat v obou potazích dosahuje nejvyšších hodnot intenzity, protože se vlivy obou fází navzájem podporují, přičemž vyvolají dvě maxima dosahující vzdálenosti 10 m od osy stožáru.

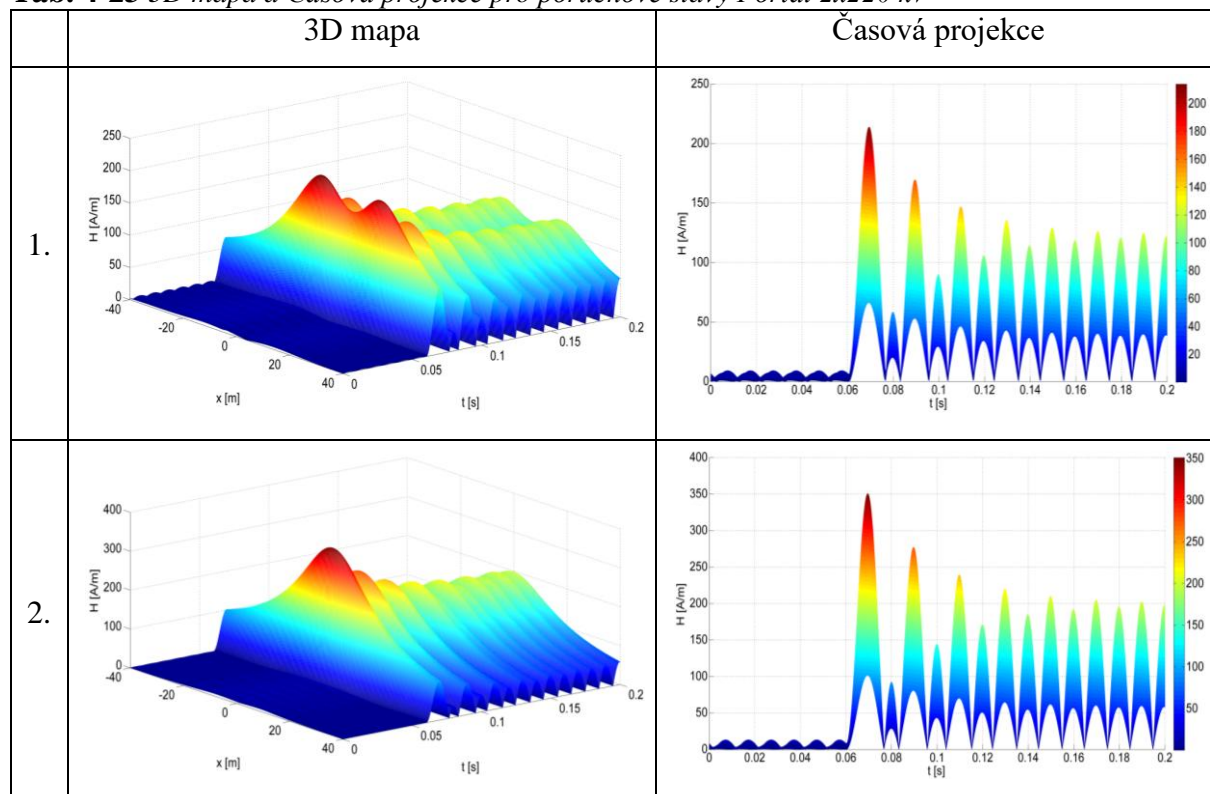
Stožár typu Portál 2x220 kV

Při analýze rozložení magnetického pole v okolí stožáru typu Portál 2x220 kV jsme umístili zkrat na třetí fázi C, přičemž jsme efektivní hodnotu postižené fáze zvolili 7 kA. Pro zjištění poruchových stavů jsme se rozhodli použít varianty, kdy zkrat nastane v obou potazích a budou postižené fáze nejdále od sebe, při konfiguraci ABC-ABC. Jako druhou variantu jsme umístili postižené fáze nejbližší k sobě, což nastane při konfiguraci ABC-CBA. Pro tyto poruchy se vyvine stejnosměrná složka.

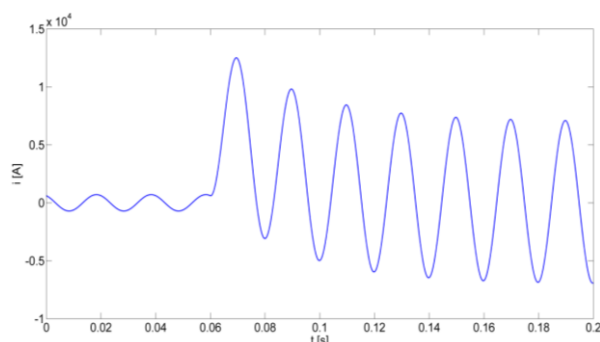
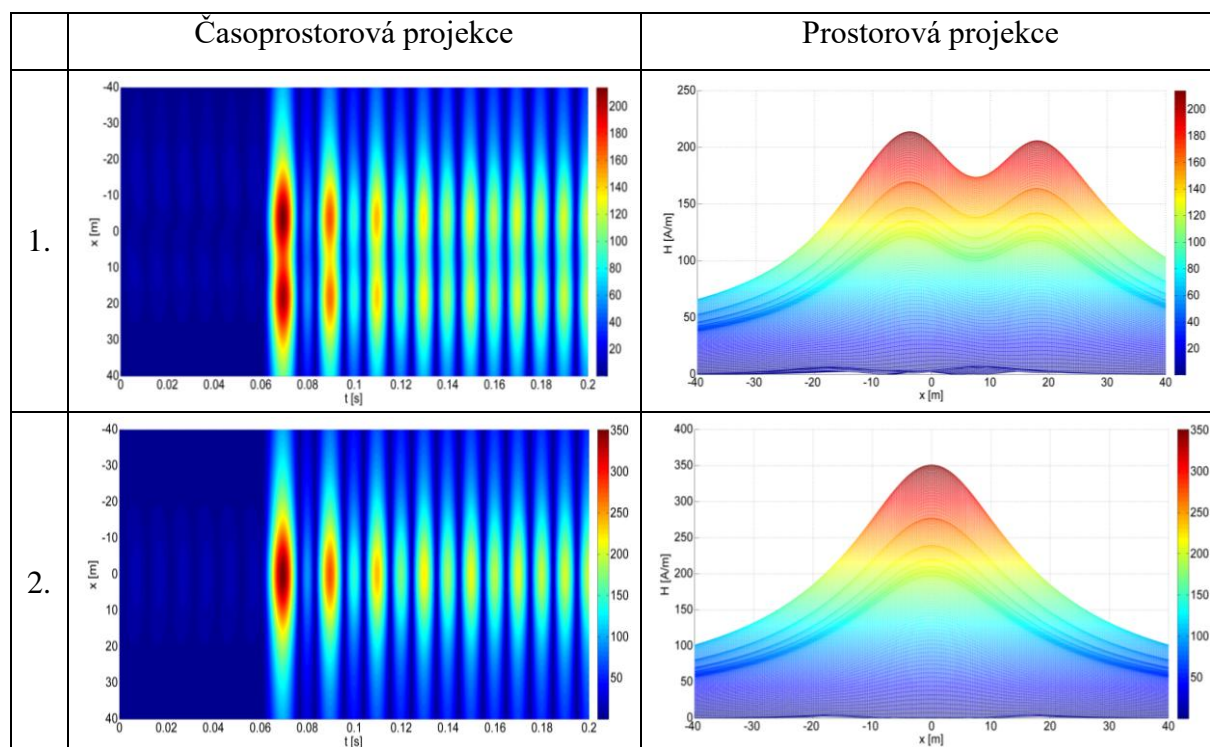
Tab. 4-22 Maximální hodnoty pro různé poruchové stavy - Portál 2x220 kV

	Konfigurace fází	Zkratový proud	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	ABC - ABC	s SS složkou	213,9818	268,8975
2.	ABC - CBA	s SS složkou	350,8416	440,8806

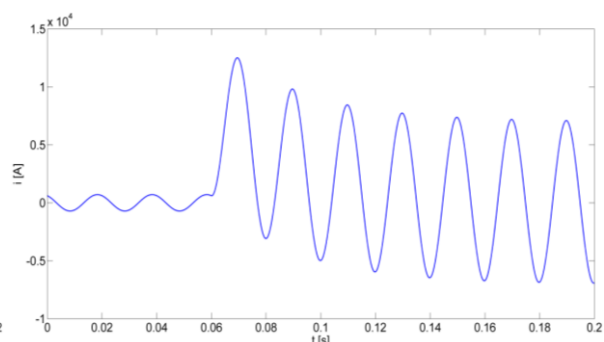
Tab. 4-23 3D mapa a Časová projekce pro poruchové stavy Portál 2x220 kV



Tab. 4-24 Časoprostorová a Prostorová projekce pro poruchové stavy Portál 2x220 kV



Obr. 19 Průběh zkratového proudu pro 1.



Obr. 20 Průběh zkratového proudu pro 2.

Při porovnání obou časoprostorových rozložení intenzity magnetického pole můžeme vidět jev, který nastal i v poruchovém stavu u stožáru typu Donau. Také zde se navzájem podpořily vlivy obou fází, které díky bližšímu umístění vyvolaly mnohem vyšší hodnotu intenzity s maximem v ose stožáru. Rozmístění fází dále od sebe má za následek vytvoření dvou lokálních maxim, která se přesunula do vzdálenosti zhruba 5 metrů od osy. Z tabulky 4-24 lze poznat rozdíl hodnot obou maxim. Levé maximum je o trochu větší, než to pravé. To je způsobeno konfigurací fází, kdy se v jednom případě fáze podporují navzájem a v druhém případě se vlivy fází potlačují. Velký vliv na výslednou časovou projekci intenzity magnetického pole má průběh zkratových proudů s vyvinutou stejnosměrnou složkou, které kopírují jeho obálku.

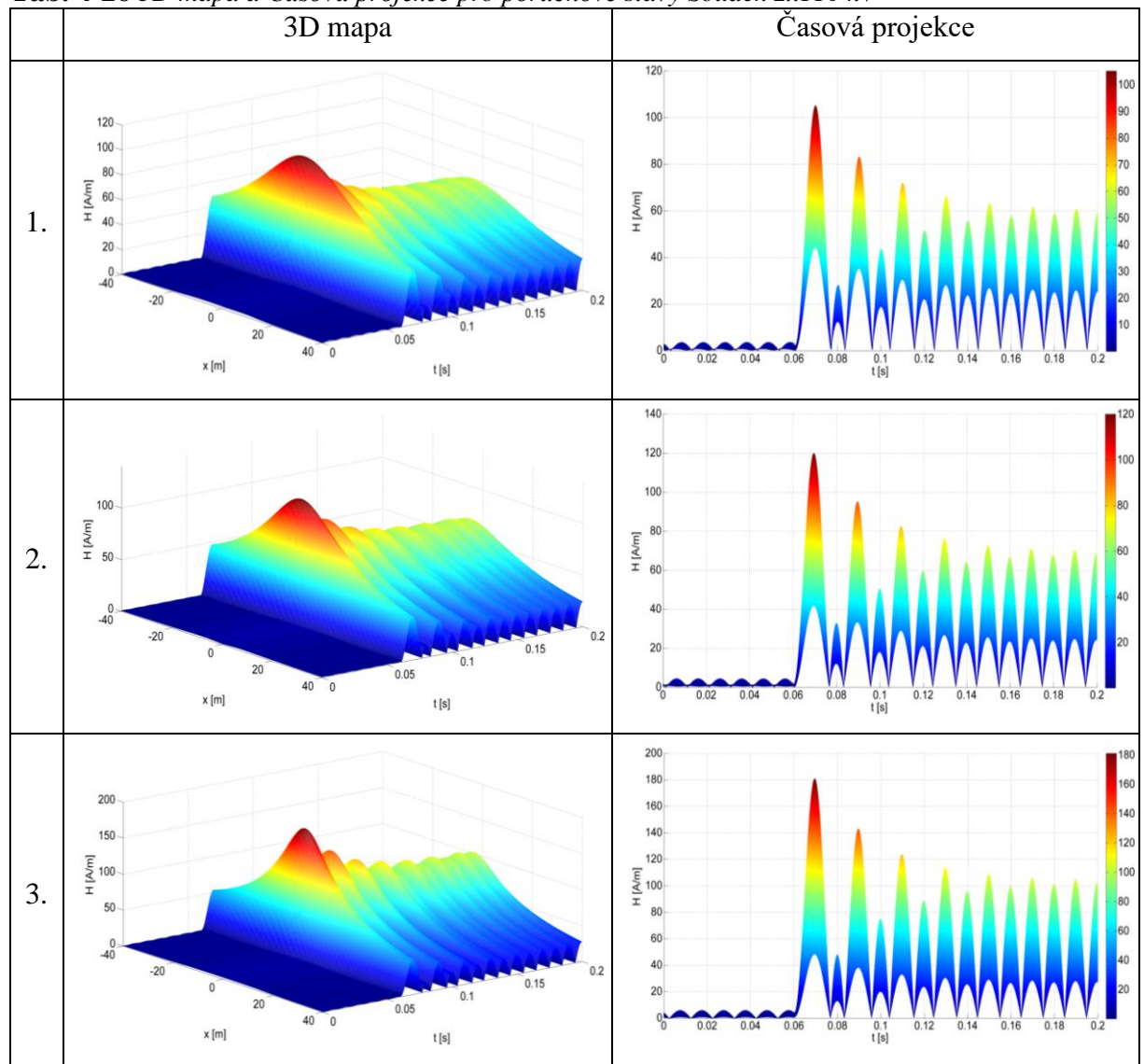
Stožár typu Soudek 2x110 kV

Stožár typu Soudek 2x110 kV v poruchovém stavu analyzujeme tak, že zkrat nastane postupně na všech třech fázích jednoho potahu. Efektivní hodnota poruchového proudu se přitom zvýší na 5 kA. Pro tyto poruchy se opět vyvine stejnosměrná složka poruchového proudu. Celá analýza byla provedena pro konfiguraci fází ABC-CBA, která při výpočtech rozložení magnetického pole při provozním zatížení vykazovala nejvyšší hodnotu.

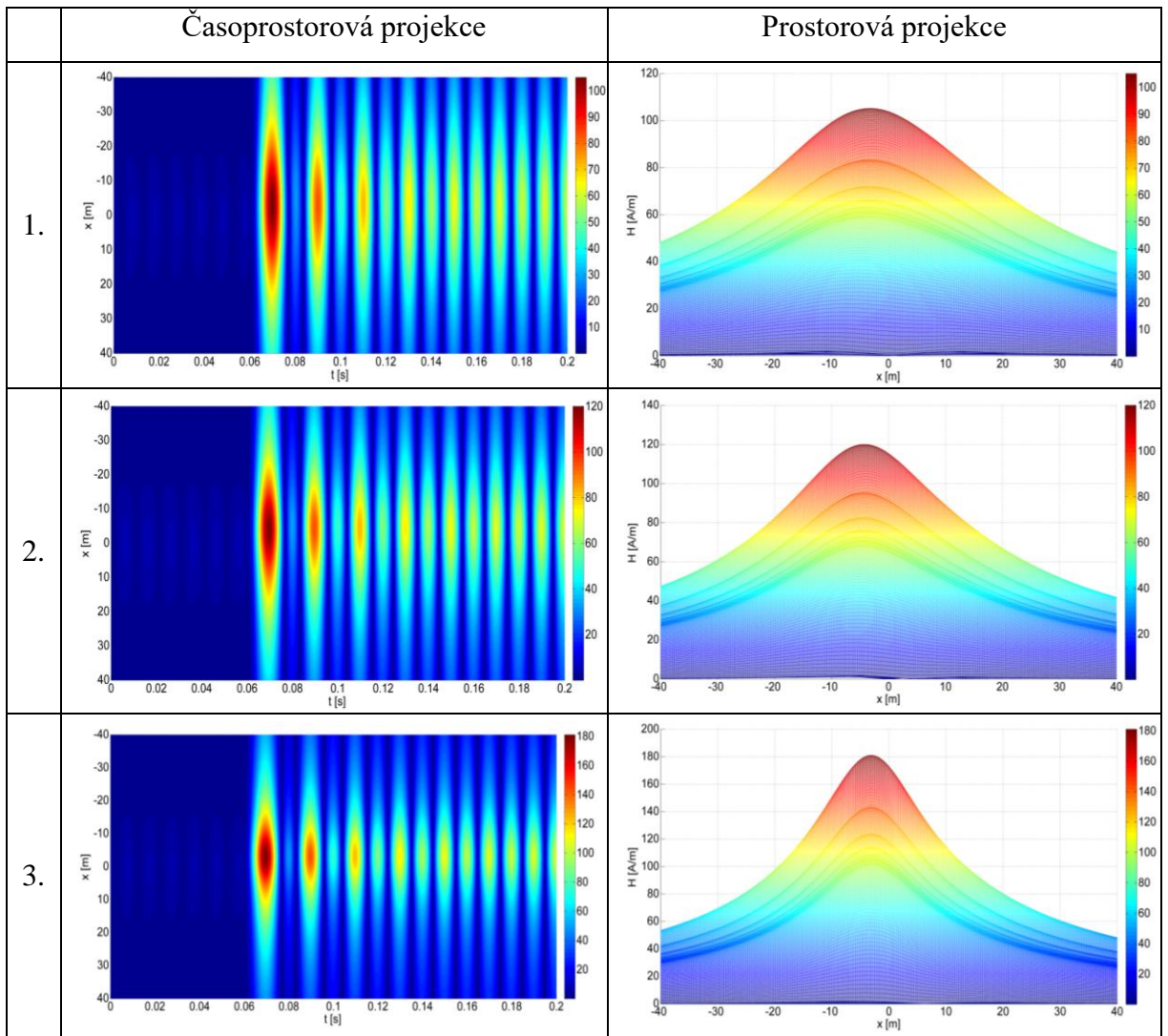
Tab. 4-25 Maximální hodnoty pro různé poruchové stavy - Soudek 2x110 kV

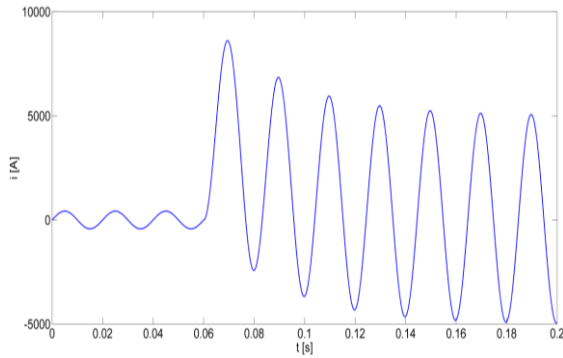
	Místo zkratu	Zkratový proud	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.	Ve fázi A	s SS složkou	105,1730	132,1643
2.	Ve fázi B	s SS složkou	120,0062	150,8042
3.	Ve fázi C	s SS složkou	181,0043	227,4567

Tab. 4-26 3D mapa a Časová projekce pro poruchové stavy Soudek 2x110 kV

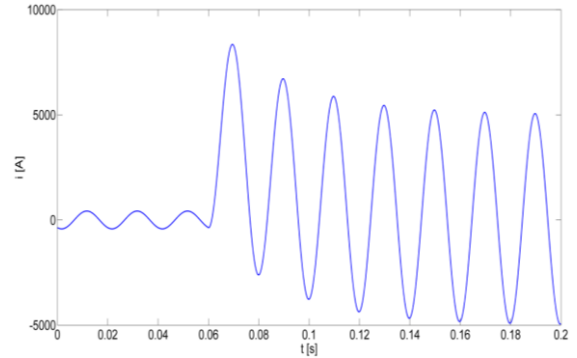


Tab. 4-27 Časoprostorová a Prostorová projekce pro poruchové stavy Soudek 2x110 kV

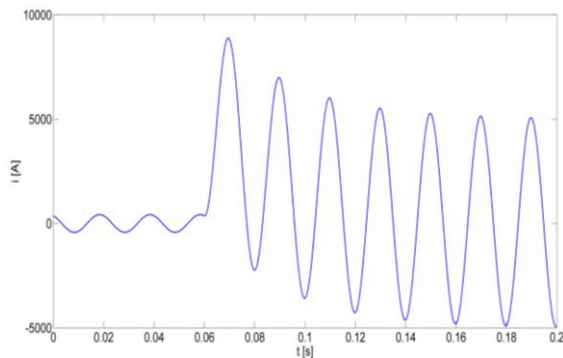




Obr. 21 Průběh zkratového proudu pro 1.



Obr. 22 Průběh zkratového proudu pro 2



Obr. 23 Průběh zkratového proudu pro 3.

Při shlednutí tabulek 4-26 a 4-27 můžeme vidět nepatrné rozdíly časoprostorového rozložení intenzity magnetického pole. Nejvyšší hodnotu dosahuje opět vodič, který je umístěný nejnižší. Jeho prostorová projekce má nejstrmější průběhy od maxima, které se nachází v ose stožáru. Zkratovaný prostřední fázový vodič dosahuje druhé nejnižší hodnoty, přičemž je jeho průběh o něco méně strmější než v případě nejnižšího vodiče. Nejmnějším průběhem pak můžeme vidět u zkratovaného nejvýše umístěného vodiče, který také dosáhl nejnižší hodnoty. Z tohoto faktu vyplývá, že u stožáru typu Soudek, vznikne nejvyšší hodnota intenzity magnetického pole v poruchovém stavu při poruše na nejnižší položeném fázovém vodiči.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval problematikou analýzy magnetického pole v okolí venkovního vedení. Provedl jsem výpočty v pružném softwaru MATLAB pro tři různé typy stožárů, na různých napět'ových hladinách a provozních stavech.

Díky dobře napsanému programu jsem mohl analyzovat mnoho zajímavých výsledků a průběhů všech možných provozních stavů, zvýšených zatížení s průvěsem až po poruchové, kdy lze do programu zadat jakýkoliv průběh proudu u kterého známe jeho předpis. Program nám pak zobrazí 3D mapy (časoprostorové rozložení intenzity magnetického pole), ze kterých si můžeme upravit 3D mapu tak, abychom viděli lepší průběhy projekcí času, vzdálenosti a intenzity magnetického pole.

Při analýze rozložení intenzity magnetického pole pro klasické provozní stavy jsem zkoumal vliv konfigurace fází na výsledné magnetické pole. Z mých výpočtů vyplývá, že nejpriznivějším stožárem je stožár typu Soudek. Tento typ stožáru sice přenáší nejnižší proud, ale jeho konfigurace fází vykazovala také nejnižší maximální hodnoty intenzity magnetického pole a to až o 2,5 násobek oproti stožáru typu Portál. Tyto menší hodnoty jsou díky vhodnému rozmístění vodičů, kdy se vlivy fází v obou potazích navzájem vyruší, a také fakt, že každá fáze je umístěna v jiné výšce. Rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou intenzity magnetického pole nebyly příliš markantní oproti jiným stožárům. Rozdíl se pohyboval kolem necelé dvojnásobku. Druhým nejpriznivějším stožárem je podle výpočtů stožár typu Donau. Tento stožár vykazuje nejpriznivější výsledky při konfiguraci ABC-CAB. To je způsobené tím, že obě fáze C v obou potazích, které mají stejný fázový posun, jsou umístěny na spodní linii vedení a blízko osy stožáru. Tímto se vlivy fází navzájem podpoří a vybudí nejvyšší hodnoty. Naopak nejpriznivější konfigurace fází je ABC-BCA. Zde se nejvíce projeví vyrušení vlivů daných fázových vodičů, ale i přesto dosáhla tato konfigurace vyšších hodnot, než byla maximální hodnota intenzity magnetického pole u stožáru typu Soudek. Nejpriznivějším stožárem, který můžeme s ohledem na rozložení magnetického pole použít, je stožár typu Portál. Zde jsem vypočetl nejvyšší hodnotu intenzity magnetického pole. Ta je způsobena umístěním vodičů v jedné horizontální rovině, takže se zde projeví vzájemná podpora fázových vodičů. Rozdíly mezi maximem a minimem zde byly největší.

Zkoumání vlivů maximálního zatížení a průvěsu vodičů prokázalo, že nejhorší výsledky nastaly při maximálním zatížení a při průvěsu u všech typů stožárů. Nejhuře dopadl stožár typu Donau u kterého byla zjištěna hodnota 91,9729 A/m. Ačkoliv výška průvěsu fázových vodičů byla zhruba o metr vyšší než u stožáru typu Portál, tak se zde projevil

mnohem vyšší zátěžný proud, který způsobil nejhorší výsledky. Díky tomu můžeme zjistit, že největší vliv, krom konfigurace fází má velikost zátěžného proudu a výška vodiče. Kvůli jeho rozmístění fází a tomu, že v každé linii má pouze jeden vodič s nejnižším proudem, dosáhl opět nejlepších výsledků stožár typu Soudek.

Analýza zkratových proudů přinesla zajímavé výsledky. U stožáru typu Donau se zkoumal vliv zkratových proudů, které jsme postupně prostřídali na všech vodičích při nejnepříznivější konfiguraci. Nejnepříznivější byl zkrat v obou potazích nejbliže k ose stožáru, kdy intenzita magnetického pole dosáhla hodnoty 292,5063 A/m. Zkoumání zkratu se stejnosměrnou složkou a bez stejnosměrné složky prokázalo vyšší hodnoty u zkratu s vyvinutou stejnosměrnou složkou, protože prvotní nárůst tohoto proudu způsobí nárůst i intenzity magnetického pole. Při analýze u stožáru typu Donau se zkoumal zkrat v obou potazích. Tento zkrat se nejdříve umístil dále od sebe a poté se zvolil nejbliže k ose stožáru. Výsledná intenzita magnetického pole byla vyšší u zkratu, který měl poruchu v nejbliže umístěných fázích. Tato hodnota dosáhla 350,8416 A/m a byla to největší vypočtená hodnota z analýzy. Stožár typu Soudek jsme postupně zatěžovali zkratovým proudem na všech vodičích jednoho potahu. Díky tomu jsme zjistili jeden zásadní jev a to ten, že při poruchách se vždy nejvíce projeví zkrat v nejspodnější linii vodičů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Stožáry VVN I.* URL:< <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>> dostupné 14.4.2016
- [2] *Stožáry VVN II.* URL:< <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii>> dostupné 14.4.2016
- [3] *Stožáry VVN III.* URL:< <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-iii>> dostupné 14.4.2016
- [4] *Poruchové stavy na vedení.* URL:< http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/poruch_stav_vedeni.pdf> dostupné 14.4.2016
- [5] *Zkratové proudy.* URL:< http://www.elektro-energetika.cz/teorie_a_praxe/prezentace/RV_prezentace_zkratove_proudy_I.pdf> dostupné 14.4.2016
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-307-8.
- [7] Hodinka M.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, skripta VUT Brno, SNTL Praha, 1983.
- [8] Blažek, Skala: *Distribuce elektrické energie*, skripta VUT Brno, elektronický text.
- [9] Mešter M.: *Výpočet skratových proudů v elektrizačních sítích*, PRO, Banská Bystrica, 2005, ISBN 80-89057-10-1.
- [10] *Výpočet napěťových a proudových poměrů v místě ochrany při zkratech.* URL:< https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54085> dostupné 14.4.2016
- [11] *Provozní dokumentace vedení, ČEPS a.s. – technická část*
- [12] *Studijní materiály.*
URL:< https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/Zkraty%20-%20opora.pdf> dostupné 14.4.2016