

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Simulační výpočet možného omezení spínacích přepětí  
instalací pasivního RC členu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin HULEC**  
Osobní číslo: **E16N0100P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Simulační výpočet možného omezení spínacích přepětí instalací pasivního RC členu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

Vytvořte výpočetní model části elektrizační soustavy včetně tlumícího RC členu:

1. Navrhněte náhradní obvodové řešení.
2. Sestavte diferenciální matematický model elektrického schématu.
3. Model zapište a odlaďte v některém z modelovacích jazyků MATLAB, EMTP-ATP nebo DYNAST.
4. Proveďte základní simulační výpočty ustálených a přechodných dějů s důrazem na účinnost tlumení spínacích přepětí RC členem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Přednášky předmětů KEE / PJS, KEE / MS
2. Trojánek, Zdeněk; Hájek, Josef; Kvasnica, Pavol - Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987
3. Mühlbacher, Jan; Noháč, Karel. Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: řešené příklady ke cvičení. 1.vyd. Plzeň: ZČU, 1994
4. Uživatelská příručka zvoleného modelovacího nástroje

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na omezení spínacích přepětí pomocí RC článků na hladině vysokého napětí. Popisuje různé druhy přepětí a druhy ochran proti přepětí. Dále se zabývá simulačními výpočty možných omezení spínacích přepětí v programu DYNAST. Má za cíl nalézt vhodný RC člen, jenž dostatečně omezí spínací přepětí.

## **Klíčová slova**

Spínací přepětí, RC článek, ochrany proti přepětí, DYNAST, simulační výpočet, vysoké napětí

## **Abstract**

The master thesis is focused on reducing the switching overvoltage with the use of RC snubbers (or dampers). It describes different types of overvoltages and protection devices against overvoltages. In the next part, the thesis deals with simulation computing of possible limitation of the switching overvoltage in software DYNAST. The aim is to find proper RC snubber to limit the switching overvoltage.

## **Key words**

Switching overvoltage, RC snubber (damper), overvoltage protection, DYNAST, simulation computing, high voltage

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 21.5.2018

Martin Hulec

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Janochovi ze společnosti ČEZ za poskytnutí materiálů z praktických měření.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PŘEPĚTÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 ATMOSFÉRICKÁ PŘEPĚTÍ .....	12
1.2 PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ ZKRATŮ A ZEMNÍCH SPOJENÍ.....	13
1.3 SPÍNACÍ PŘEPĚTÍ.....	16
1.3.1 Přepětí při spínání malých kapacitních proudů.....	16
1.3.2 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů .....	18
1.4 REZONANCE .....	19
1.4.1 Ferorezonance.....	21
1.5 PŘEPĚTÍ PŘI PŘÍPÍNÁNÍ VEDENÍ VVN .....	22
1.6 ZKUŠEBNÍ PŘEPĚTÍ .....	24
1.6.1 Zkouška atmosférickým impulsem .....	25
1.6.2 Zkouška spínacím impulsem .....	25
<b>2 OCHRANA PŘED PŘEPĚTÍM</b> .....	<b>27</b>
2.1 ZEMNÍČÍ LANO, BLESKOSVOD.....	27
2.2 OCHRANNÉ JISKŘIŠTĚ.....	27
2.3 VYFUKOVACÍ BLESKOJISTKA.....	27
2.4 RŮŽKOVÁ BLESKOJISTKA .....	28
2.5 SVODIČE PŘEPĚTÍ .....	29
2.6 VENTILOVÉ BLESKOJISTKY.....	30
2.7 RC ČLÁNKY.....	31
<b>3 SIMULAČNÍ VÝPOČET NÁHRADNÍHO OBVODU</b> .....	<b>35</b>
3.1 NÁHRADNÍ OBVOD .....	35
3.1.1 Výpočet náhradních parametrů alternátoru .....	35
3.1.2 Výpočet náhradních parametrů kabelu 6 kV .....	36
3.1.3 Výpočet náhradních parametrů kabelu 22 kV .....	37
3.1.4 Výpočet náhradních parametrů transformátoru 22/6 kV.....	37
3.1.5 Výpočet náhradních parametrů sítě 22 kV .....	38
3.2 DIFERENCIÁLNÍ MATEMATICKÝ MODEL SCHÉMATU .....	38
3.3 SIMULACE .....	40
3.3.1 Volba RC členu.....	40
3.3.2 Připnutí alternátoru k síti .....	41
3.3.3 Odepnutí alternátoru od sítě při provozu .....	45
3.3.4 Odepnutí alternátoru od sítě při zkratu na lince 22 kV .....	50
3.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	58
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>60</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## **Úvod**

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se přepětí vznikajících při spínacích dějích na hladině vysokého napětí. Řešeno je možné omezení spínacích přepětí pomocí RC článků.

V první části práce jsou popsány různé druhy přepětí, jak a kdy vznikají, jaký je jejich charakter a jaké jsou možnosti jejich omezení. Tato kapitola je doplněna teoretickými i praktickými grafy z reálných měření. Dále jsou popsány prvky ochrany proti přepětí, kde největší prostor je věnován RC článkům, které budou následně využívány v nadcházející kapitole.

Druhá část je zaměřena na simulaci přechodových jevů při spínání vypínače u malé vodní elektrárny pomocí programu DYNAST. Po vytvoření náhradního schématu je cílem nalézt RC článek, jenž omezí spínací přepětí při různých spínacích operacích. Následně jsou porovnány výsledky simulací.

## Seznam symbolů a zkratek

VN .....	Vysoké napětí
VVN .....	Velmi vysoké napětí
$U$ .....	Napětí (V)
$f$ .....	Frekvence (Hz)
$Z_0$ .....	Impedance vedení ( $\Omega$ )
$I$ .....	Elektrický proud (A)
$X$ .....	Reaktance ( $\Omega$ )
$C$ .....	Kapacita (F)
$L$ .....	Indukčnost (H)
$\phi$ .....	Magnetický indukční tok (Wb)
ČSN .....	Česká technická norma
ČSN EN .....	Převzatá evropská norma
$T_1$ .....	Doba čela (s)
$T_2$ .....	Doba půltýlu (s)
$T_P$ .....	Doba do vrcholu (s)
ZnO .....	Oxid zinečnatý
CMOA .....	Spínaný svodič přepětí z oxidu kovů
SiC .....	Karbid křemíku
$S$ .....	Zdánlivý výkon (VA)
$P$ .....	Činný výkon (W)
$Q$ .....	Jalový výkon (VAr)
$\cos \phi$ .....	Účinit
VFTO .....	Vysokofrekvenční přechodné přepětí
$R$ .....	Odpor ( $\Omega$ )
$t$ .....	Čas (s)
$Z$ .....	Impedance ( $\Omega$ )
MVE .....	Malá vodní elektrárna

## 1 Přepětí

Jako přepětí je označováno napětí, které je vyšší než podle normy nejvyšší povolená efektivní hodnota napětí. Pro sítě vysokého a velmi vysokého napětí platí následující tabulka[1]:

Tabulka 1: Normalizované jmenovité a nejvyšší napětí vn a vvn

Jmenovité napětí (kV)	6	10	22	35	110	220	400	750
Nejvyšší napětí (kV)	7,2	12	25	38	123	245	420	787

Nejčastěji se elektrická přepětí dělí podle místa a příčiny vzniku, nebo podle časového trvání přepětí. Podle **časového trvání** rozlišujeme:

- Trvalá přepětí – napětí má stejnou frekvenci jako síť. Nejčastěji vzniká například při špatně zvolené odbočce transformátoru. Efektivní hodnota bývá konstantní, v čase se nemění.
- Dočasná přepětí – dají se rozdělit do tří skupin podle jejich frekvence. První je přepětí s provozní (nebo téměř provozní) frekvencí. Vyskytuje se při nesouměrných poruchách nebo při ztrátě zatížení na konci dlouhých vedení. Do druhé skupiny se zařazují přepětí s kmitočtem vyšším než padesát Hz (ultraharmonická rezonance), které jsou způsobené například při zapínání nezatíženého transformátoru. Třetí skupina je vyvolána nižší frekvencí než padesát Hz (subharmonická rezonance). Takové přepětí vzniká nejčastěji na sériově kompenzovaných vedeních.
- Přechodná přepětí – většinou velmi rychlá, výrazně tlumená. Nejčastěji se jako přechodná přepětí označují spínací přepětí či atmosférické. Lze mezi ně zařadit také zkušební přepětí s dlouhým a krátkým čelem.
- Kombinovaná přepětí – jak již název napovídá, je to kombinace výše uvedených skupin.

Podle **místa a příčiny vzniku** se přepětí mohou dělit na:

- Vnitřní (provozní) přepětí – vznikají za provozu elektroenergetické soustavy, způsobují přechodový jev. Mohou vzniknout kvůli poruše (jednofázová i vícefázová), spínání kapacitních a induktivních proudů, vypínání zkratů či připínání vedení. Mezi vnitřní přepětí patří také přepětí vzniklé ferorezonancí nebo vyššími harmonickými.

- Vnější (atmosférické) přepětí – způsobené úderem blesku, ať už přímým, či naindukováním napětí (například úder do zemního lana).

## 1.1 Atmosférická přepětí

Atmosférický výboj (blesk) je energeticky zcela jistě nejvýznamnější zdroj přepětí. Blesk vzniká kvůli vytvoření elektrického náboje v bouřkových mracích. Po překonání kritické hodnoty intenzity elektrického pole mezi bouřkovým mrakem a zemí (jednotky až desítky kV/cm) se postupně začne vytvářet atmosférický výboj[2]. Hodnotu kritické intenzity elektrického pole ovlivňují hlavně dielektrické vlastnosti vzduchu v dané lokalitě.

V elektroenergetické soustavě se atmosférický výboj projevuje nejen účinky elektrickými, ale také tepelnými, elektrodynamickými či mechanickými. Samotný blesk může dosahovat teplot až desetitisíců stupňů Celsia. Je zde tedy velké nebezpečí vznícení materiálu, či výbuchu při rychlém odpaření vody a následném zvýšení tlaku páry. Vzhledem k velikosti proudu často dochází také k poškození izolací a dalších ochranných materiálů. Podobnými účinky se může projevovat také vysokofrekvenční složka proudu atmosférického výboje, má-li dostatečně vysokou amplitudu[2].

Elektrodynamické a mechanické poškození bývá způsobeno velikostí bleskového proudu. Síla vytvořená průchodem tak velkého proudu se nejčastěji projeví vytrhnutím úchytů a svorek (především u bleskosvodů nebo na vedení).

Charakter atmosférického přepětí je dán místem, kam blesk udeří. Při **přímém úderu** atmosférického výboje **do fázového vodiče** se vytvoří napěťové vlny směřující na obě strany vedení. Amplituda takového přepětí dosahuje řádu megavoltů, je tedy výrazně vyšší než pevnost izolačních materiálů vedení. Po zjednodušení platí rovnice[2]:

$$U = Z_0 \cdot \frac{I}{2} \quad (1.1)$$

kde  $U$  je rovno amplitudě přepěťové vlny (jednotky MV),  $Z_0$  impedanci vedení (obvykle 250 – 500  $\Omega$ ) a  $I$  vrcholové hodnotě proudu výboje přeneseného na vedení (v našich atmosférických podmínkách nejčastěji 20 – 40 kA).



Obrázek 1: Zjednodušený obrázek postupu přepět'ové vlny vedením[3]

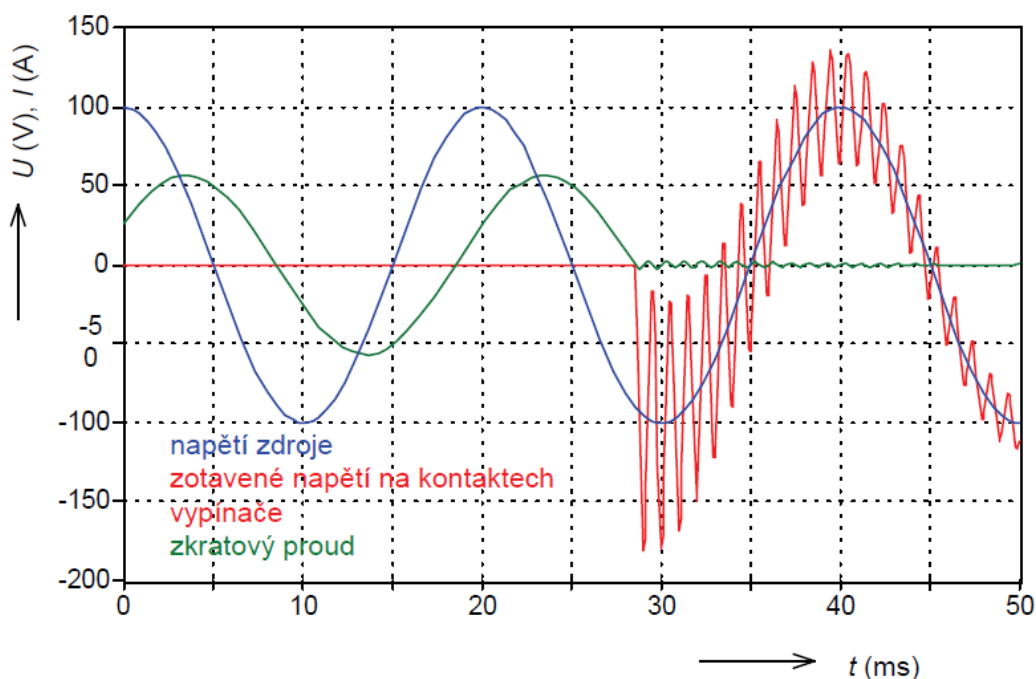
**Přímý úder do zemnicího lana** se projevuje v zemnicím laně stejně jako předchozí případ, tedy je to vlna postupující na obě strany lana. Tato vlna indukuje ve fázových vodičích napětí, které se nedá jasně charakterizovat vzhledem ke všem různým odrazům způsobených změnou impedance. Rozdíl napětí na zemnicím laně a fázových vodičích činí napětí namáhající izolace obou lan. Pokud je toto napětí vyšší než přeskokové napětí, může dojít k takzvanému zpětnému přeskoku.

**Přímý úder do stožáru** má podobné účinky jako úder do zemnicího lana. Stejně jako v předchozí variantě i zde je možnost zpětného přeskoku. V tomto případě o vlastnostech přepětí rozhodují parametry stožárů (výška konstrukce, vlnová impedance, odpor uzemnění), počet zemnicích lan a samozřejmě také parametry atmosférického výboje (vrcholová hodnota proudu, strmost čela).

## 1.2 Přepětí při vypínání zkratů a zemních spojení

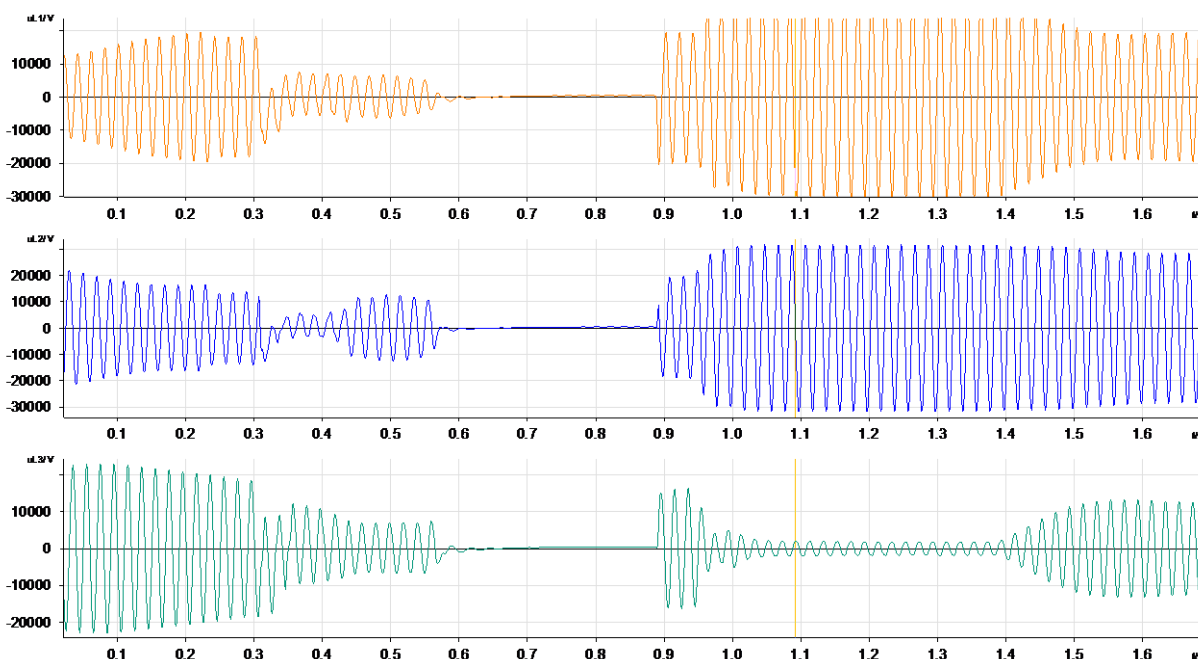
Zkraty a zemní spojení jsou poruchové stavy, které je nutné vypnout co nejdříve, protože svými účinky jsou v elektrizační soustavě silně nežádoucí. Přepětí s nimi spojená vznikají na počátku tohoto poruchového stavu a při jeho vypínání. Vlastnosti přepět'ové vlny závisí na parametrech sítě, které jsou dány typem zapojení sítě a charakterem poruchy ( fáze proti zemi, mezifázová porucha). Zkraty vznikají v sítích účinně uzemněných, zemní spojení v sítích izolovaných a neúčinně uzemněných. Charakterem je zkrat nejčastěji velký induktivní proud, zatímco zemní spojení je kapacitní.

Z hlediska přepětí je nejdůležitějším okamžikem vypnutí zkratu (respektive zemního spojení) ve vypínači. Po odeznění oblouku dojde ve vypínači ke vzniku takzvaného zotaveného napětí, jehož vlastnosti budou dané převážně parametry sítě[1]. Toto zotavené napětí se skládá ze složky o frekvenci 50 Hz, kterému se říká obnovené, a z napětí daného frekvencí vlastního obvodu sítě. Překoná-li zotavené napětí velikost průrazného napětí ve vypínači, může dojít k opětovnému zapálení oblouku.



Obrázek 2: Graf časových průběhu napětí a proudu při vypínání zkratu [4]

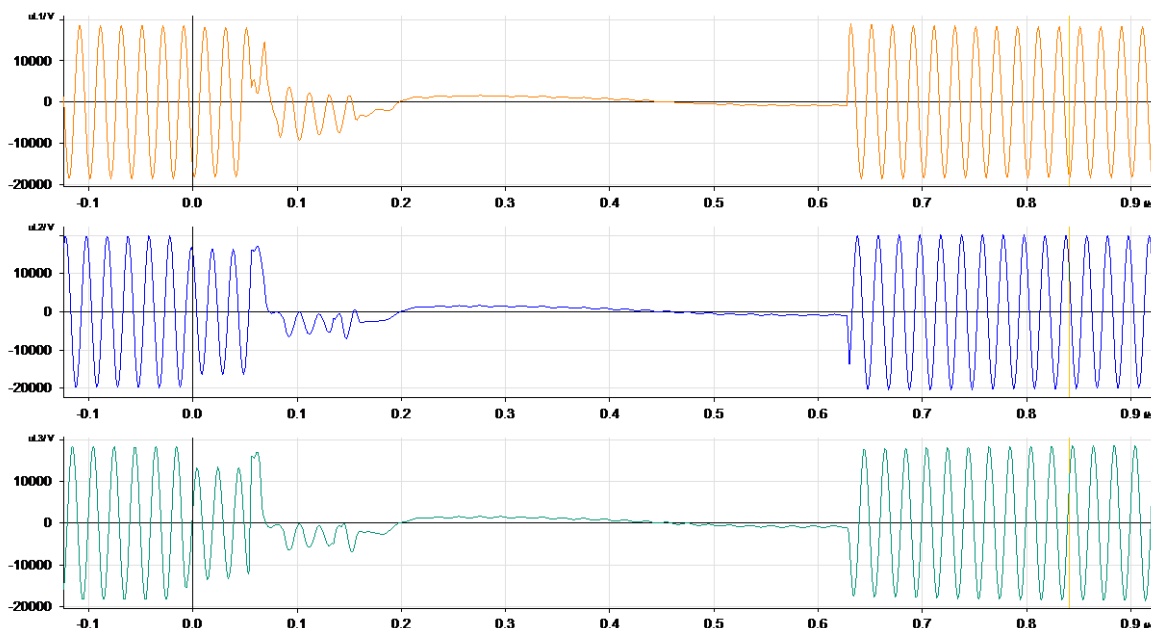
Jak ukazuje *Obrázek 3* z reálného měření, přepětí nemusí vzniknout pouze při zapínání a vypínání poruchy, ale také vzniká při zemním spojení na fázích nepostížených poruchou. Na těchto fázích se objeví napětí, které dosahuje teoreticky až sdružených hodnot.



Obrázek 3: Graf průběhů fázových napětí při poruše na lince 22 kV [5]

Na tomto obrázku je znázorněn průběh fázových napětí na lince 22 kV, kde došlo k zemnímu spojení druhé fáze, které rychle přešlo do dvoufázového zkratu první a druhé fáze. Po úspěšném opětovném zapnutí linky (okolo 0,9 sekundy) se na lince objeví další porucha, tentokrát zemní spojení třetí fáze. Jako zemní spojení lze tuto poruchu charakterizovat, protože na první i druhé fázi se výrazně zvýšilo napětí a na třetí fázi naopak výrazně pokleslo. Takový typ poruchy bývá nejčastěji přisuzován pádu větve na vedení, což se pravděpodobně stalo i v tomto případě.

Na dalším praktickém obrázku je patrné, že při správně zvolené ochraně proti přepětí (zde nejspíše omezovač přepětí) ani nevznikne přepětí a také je výrazně omezen přechodový jev. *Obrázek 4* zobrazuje dvoufázový zkrat druhé a třetí fáze na hladině 22 kV s úspěšným opětovným zapnutím. Zafungování omezovače je patrné přibližně v čase 55 ms, kdy sepnul vypínač. Napěťová špička není ani v jedné z postižených fází nad dovolenou hodnotou nejvyššího napětí. Porucha byla díky krátkému vypnutí odstraněna a při OZ také nedošlo k výraznému přechodovému jevu či přepětí.



Obrázek 4: Graf fázových napětí na lince 22 kV při dvoufázovém zkratu [5]

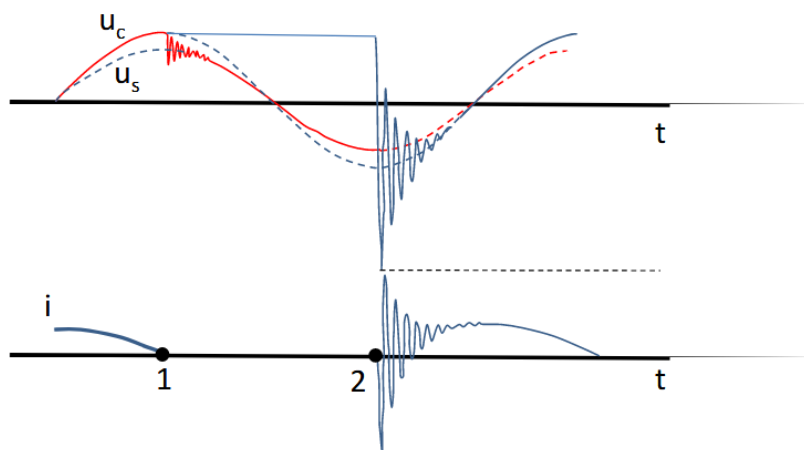
### 1.3 Spínací přepětí

Spínací přepětí patří mezi přechodná, provozní přepětí. Vznikají tedy při chodu elektroenergetické soustavy, jsou velmi rychlá a často i výrazně tlumená. Jako spínací přepětí se označuje přepětí vzniklé při připínání a odpínání vedení či spotřebičů, vypínání malých induktivních a kapacitních proudů či připojování baterií a reaktorů do sítě[1]. Někdy se také do spínacích přepětí zařazují přepětí vzniklá při poruchách, především zkratech a zemních spojeních.

#### 1.3.1 Přepětí při spínání malých kapacitních proudů

Jako kapacitní proudy se označují proudy, které předbíhají napětí o  $\pi/2$ . Typickými případy, kdy se dá hovořit o tomto jevu, je připínání (respektive i odpínání) kondenzátorových baterií a zapínání nezátížených vedení. Charakter takové zátěže je považován téměř za čistě kapacitní. Podobný charakter má proud při vypínání zemního spojení[4].

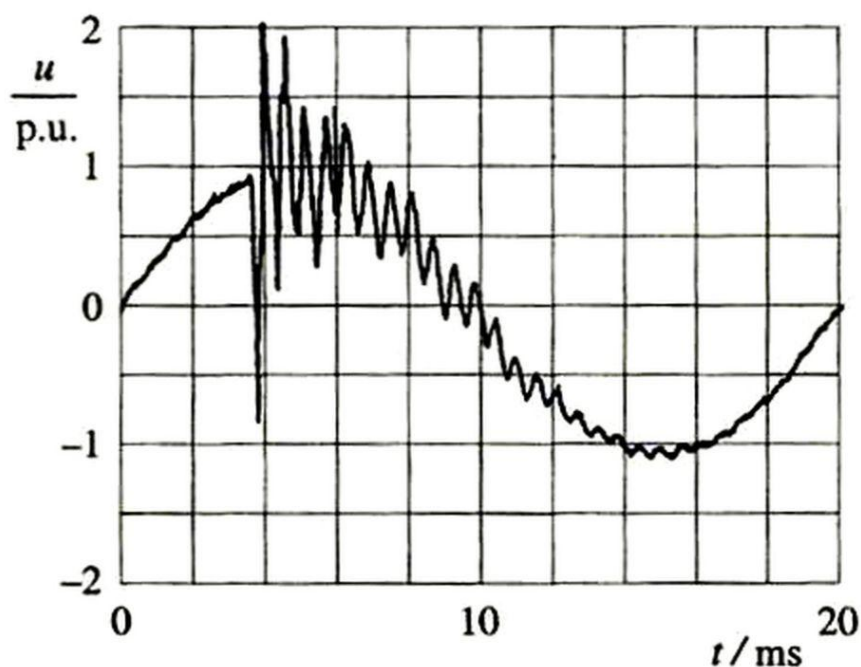
Platí, že při vypínání kapacitní zátěže, tedy v proudové nule, je napětí maximální. Tato zátěž bude nabita tímto maximálním napětím a po půl periodě, kdy bude napětí v protifázi, může dojít kvůli velkému rozdílu napětí k opětovnému zápalu výboje ve vypínači. Velmi názorně toto zobrazuje teoretický *Obrázek 5*, kde je patrné, že napětí na kondenzátoru se při každém opětovném zápalu zvyšuje.



Obrázek 5: Průběh napětí a proudu při vypínání kapacitní zátěže [6]

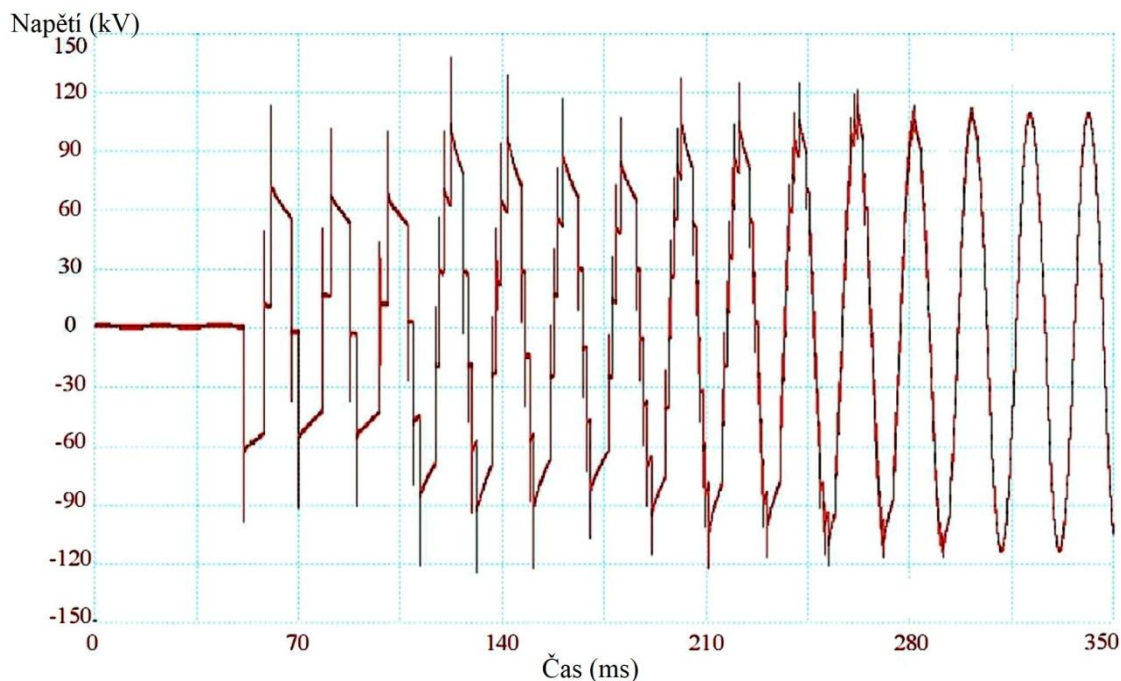


Při zapínání kapacitní zátěže, tedy například baterií nebo nezatíženého vedení, mohou vznikat napěťové i proudové oscilace. Jejich vrcholová hodnota závisí na velikosti napětí v okamžiku připojení, ale neměla by příliš přesáhnout dvojnásobek amplitudy napětí[3]. Jako nejhorší případ se udává situace, kdy dojde k připojení zátěže v amplitudě napětí. Jak ukazuje *Obrázek 6*, dojde k rychle tlumeným oscilacím o vysoké frekvenci.



*Obrázek 6: Průběh napětí při spínání kapacitní zátěže [3]*

Níže, na *Obrázku 7*, je uveden reálný graf průběhu napětí při připínání kapacitní zátěže. Při spínání kontaktů ve vypínači může docházet k velmi rychlým (jednotky nanosekund), opakovaným průrazům ještě před konečným sepnutím vypínače. Tato přepětí ze své podstaty nedosahují vysokých hodnot, ale kvůli opakovaným průrazům velmi výrazně namáhají především kontakty vypínače. Této problematice se věnovali na čínské univerzitě Xian Jiaotong[7] při snaze vyvinout takzvaný *Multi-restrike Arcing Model*, který by takové stavy popisoval. Jejich snaha byla úspěšná.

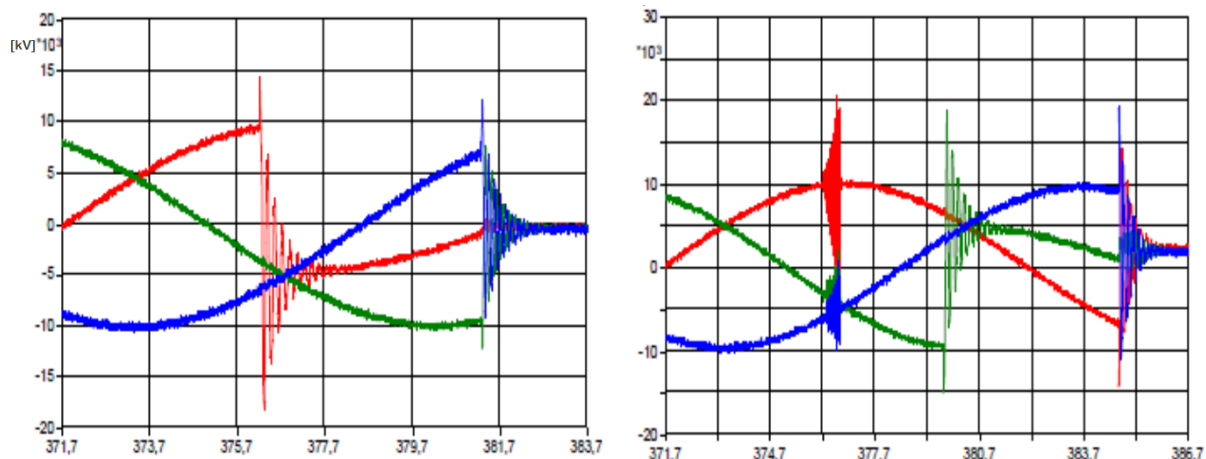


Obrázek 7: Průběh napětí při opětovných přeskocích při spínání kapacitní zátěže [7]

### 1.3.2 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Podobně jako u předchozího případu je induktivní proud takový proud, který se tentokrát zpožďuje o  $\pi/2$  za napětím. Jde tedy o induktivní zátěž. Typicky se malé induktivní proudy projevují při vypínání transformátoru nebo motoru naprázdno, vypínání reaktoru nebo kompenzační tlumivky[4].

Tyto proudy jsou vzhledem ke jmenovitým proudům, které by vypínač měl vypínat, malé, a vytváří nestabilní elektrický oblouk ve vypínači. Proud kvůli tomuto jevu značně osciluje, což vede k přerušení proudu ve vnučené nule, tedy dříve, než proud projde svoji přirozenou nulou (anglicky označováno jako current chopping). Takové přerušení proudu vyvolá na induktivní zátěži a na vypínači strmý růst napětí, a pokud je tento růst příliš prudký, může dojít i k opětovnému zapálení oblouku.



Obrázek 8: Vypínání malých induktivních proudů, vlevo bez opětného přeskočení, vpravo s opětným přeskočením [8]

Na Obrázku 8 lze vyčíst, že přepětí dosahuje nejvýše dvojnásobku amplitudy napájecího napětí a je vysokofrekvenční (stovky MHz)[8]. Přesto existují i vzácnější případy, kdy je přepětí rovno až šestinásobku amplitudy, a to při vypínání motorů, kdy je průběh proudu s oscilacemi nižších frekvencí[9]. V dnešní době jsou moderní vypínače na takové úrovni, že nemají problém se s takovým přepětím vypořádat, ale dříve se pro jistotu využívaly ventilové bleskojistky[1].

## 1.4 Rezonance

U RLC obvodů může dojít ke stavu, kdy se při určité frekvenci rovnají kapacitní a induktivní reaktance obvodu. Celková impedance obvodu je tedy dána pouze její činnou složkou. V této chvíli dochází k rezonanci, která se projeví zvýšením proudu a napětí dané frekvence. Pro výpočet rezonační frekvence platí:

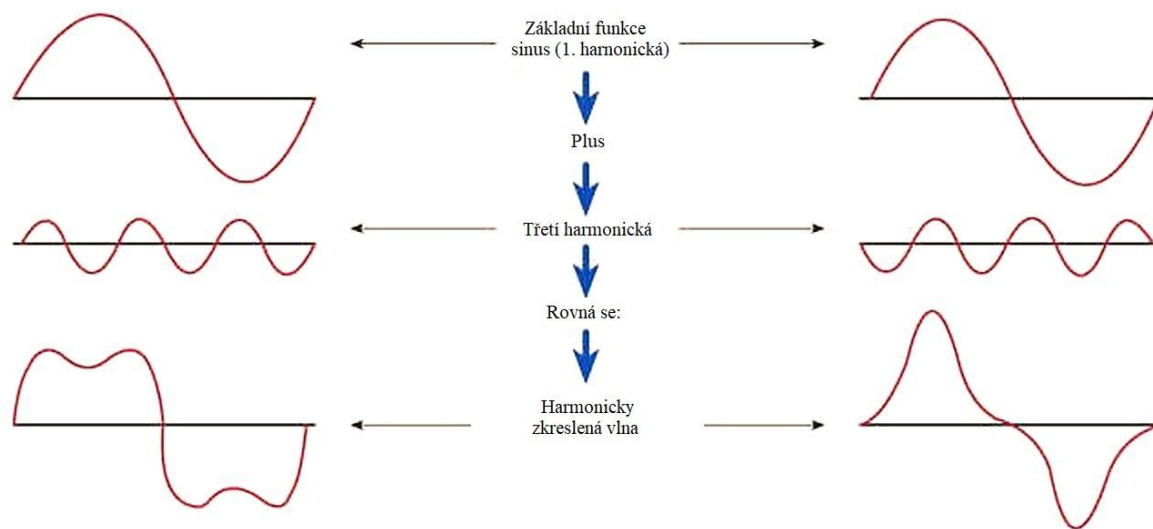
$$X_C = X_L \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (1.3)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

kde  $f_r$  je rezonanční frekvence,  $L$  je celková indukčnost rezonančního obvodu a  $C$  je celková kapacita rezonančního obvodu.

Rezonance tedy teoreticky vzniká při jakékoliv frekvenci. Typicky se neprojevuje při síťové frekvenci (50 Hz), ale spíše při jejích lichých násobcích (150 Hz, 250 Hz,...). Amplitudy takzvaných vyšších harmonických většinou dosahují pouze nepatrných hodnot, ale právě při rezonanci dochází k jejich několikanásobnému navýšení, které může vést až k přepětí. Toto přepětí způsobené rezonancí bývá často trvalé, dokud nedojde ke změně konfigurace obvodu.



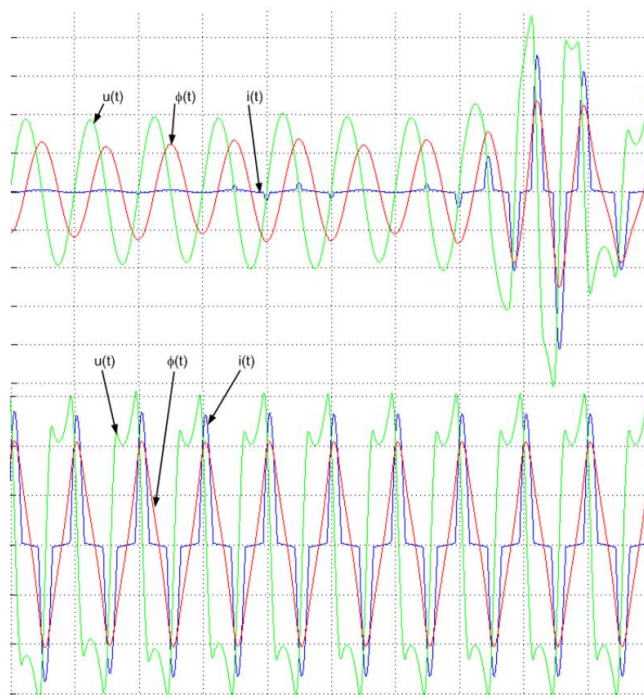
Obrázek 9: Příklad zkreslení a zvýšení napětí při vlivu třetí harmonické [10]

Z Obrázku 9 je patrné, že kromě velikosti hodnoty vyšší harmonické je také důležitá její fáze. Zatímco při stejné fázi první a třetí harmonické dochází k „oseknutí“ amplitudy celkového napěťového průběhu, tak při opačné fázi třetí harmonické dojde k zvýraznění napěťové špičky.

Jako zdroje vyšších harmonických se často uvádí polovodičová výkonová zařízení (usměrňovače, střídače, frekvenční měniče), výbojky, obloukové pece či přesycené indukčnosti (přesycené transformátory)[10]. Omezení vyšších harmonických se dá dosáhnout například využitím filtrů, nebo zapojením napájecího transformátoru do zapojení hvězda-trojúhelník (zamezení třetí harmonické).

### 1.4.1 Ferorezonance

Ferorezonance je jev, který se projevuje při přesycení jádra induktoru s nelineární indukčností v RLC obvodech, kde dojde k nelinearizaci indukčního toku v jádře. Typicky se projevuje na transformátorech, kde se při ferorezonanci objevují silně deformované průběhy nadproudů a přepětí, transformátor netypicky hučí a výrazně se zahřívá, čímž může dojít až k poruše[11]. Podnětem pro vznik ferorezonance často bývá jiná porucha, například zemní spojení.



Obrázek 10: Průběh napětí, proudu a toku při přechodu do ferorezonance [11]

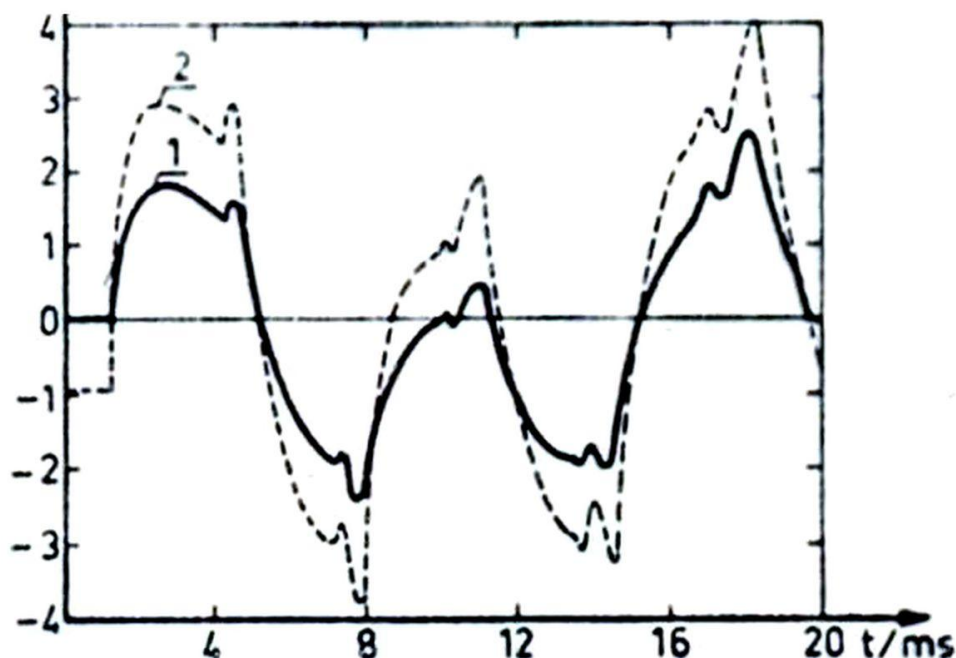
Jedním příkladem z praxe, kde se projevila ferorezonance, jsou praskliny na přístrojových transformátorech napětí v elektrických stanicích na Moravě[12]. Tyto praskliny sice neměly vliv na funkčnost transformátoru, ale další takové namáhání mohlo způsobit nejspíše elektrický průraz nebo konstrukční deformaci přístroje. Nejpravděpodobnější příčinou, proč došlo k ferorezonanci, byla instalace nových nízkozátěžových ochran (spotřeba jednotky VA), které nahradily ty staré (spotřeba 50 VA). Došlo k výrazné nelinearizaci toku v přesyceném jádře transformátoru a ke kmitům napětí, které dosahovaly téměř dvojnásobku jmenovitého napětí.

Existuje několik variant, jak zamezit ferorezonanci na transformátorech, kde se tento druh přepětí nejčastěji objevuje[12]. Nejlevnější možností je instalace tlumících odporů, které omezí velikost proudů a kmity. Další možností je takzvaná ochrana proti vzniku ferorezonance s inteligentní zátěží. Toto technicky vhodnější řešení je ale dražší než jednoduché tlumící odpory.

Vzhledem ke snížení spotřeby ochran a měřicích zařízení přístrojových transformátorů se jako poměrně nové řešení využívá instalace nových „podsycených“ transformátorů. Jejich výroba je reakcí právě na snížení spotřeby zátěže těchto transformátorů. Jedná se o variantu nejnákladnější, ale nejkompaktnější. Proto bude nejčastěji využívána při plánovaných rekonstrukcích elektrických stanic.

## 1.5 Přepětí při připínání vedení vvn

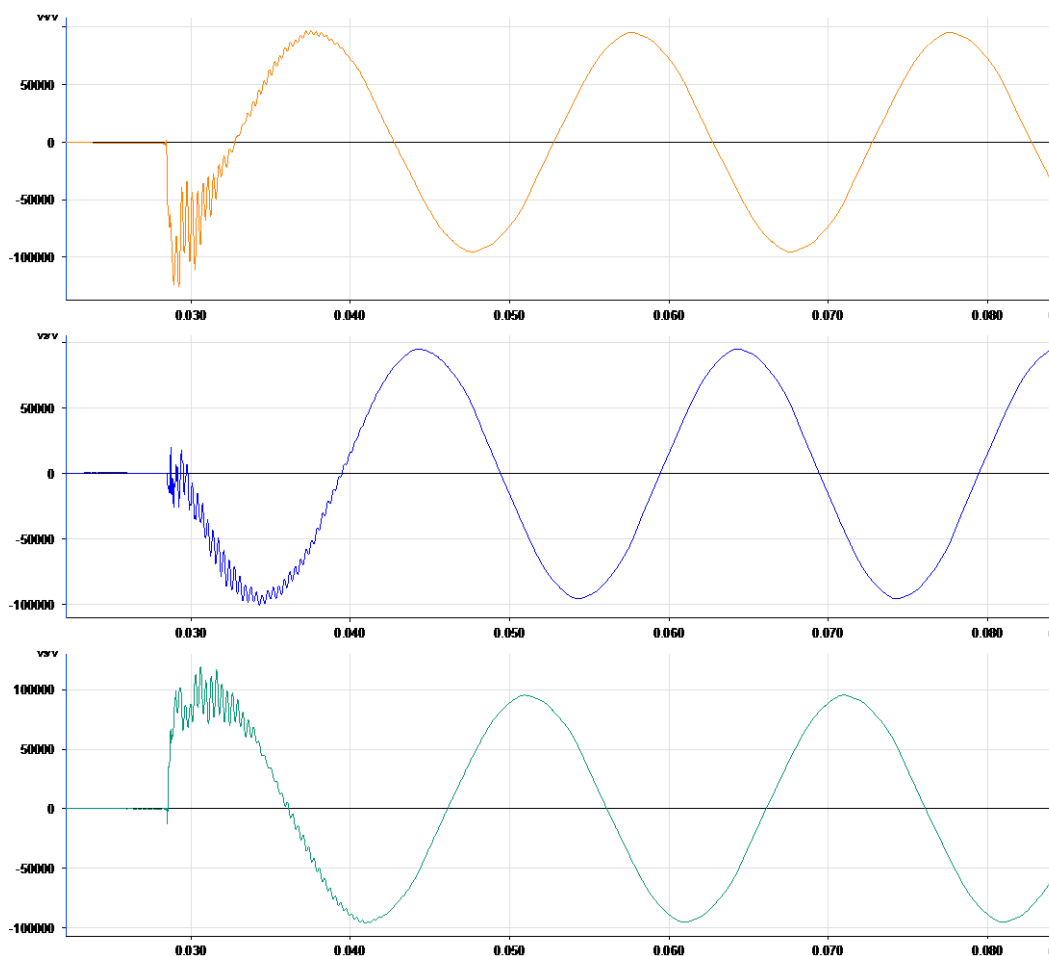
Připojení na nezátíženou linku velmi vysokého napětí je jeden z nejčastějších důvodů vzniku přepětí na těchto vedeních[3]. Na konci nezátíženého vedení se odrazí vlna, která se sečte s postupující vlnou napětí a vznikne přepětí, jehož velikost a tvar závisí převážně na fázi odražené vlny a samozřejmě také na impedanci vedení.



Obrázek 11: Graf průběhu napětí při zapnutí vedení vvn (1 – bez zátěže, 2 – opětné zapínání) [3]

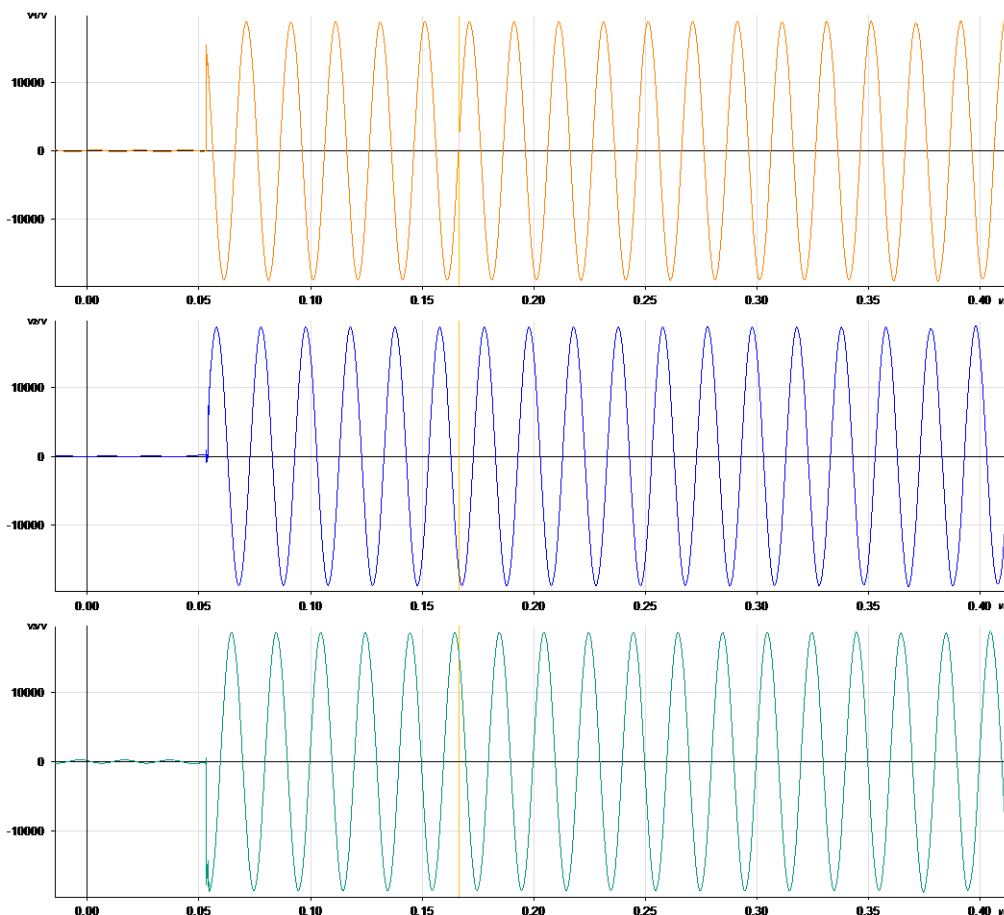
Podobný jev může vzniknout i při opětovém zapínání, tedy při rychlém znovusepnutí vedení. Často se stává, že porucha na vedení je pouze dočasná a vyplatí se tedy linku znovu rychle zapnout. Pokud se ale nestihne v mezičase všechny náboj odvést, může být při připojení vedení v opačné polaritě a také dojde k přepětí. Toto přepětí se dá snížit pomocí vypínačů se spínacím odporem nebo rychlým odvedením náboje při vypnutém vedení.

Jak již bylo zmíněno výše, tak nezátížené vedení velmi vysokého napětí se chová jako kapacitní zátěž. Častěji se tedy více projeví přepěťová vlna podobná spínání malých kapacitních proudů. Takto tomu bylo například při měření zapínání linky 110 kV naprázdno (Obrázek 12). Vzniklo vysokofrekvenční přepětí s poměrně malou amplitudou, která nedosahuje ani dvojnásobku jmenovité maximální hodnoty napětí. Průběh napětí není příliš podobný Obrázku 11, protože měřená linka 110 kV byla krátká a vlnové pochody nejsou natolik výrazné, jako by byly například u linky 400 kV.



Obrázek 12: Graf fázových napětí při zapnutí linky 110 kV [5]

Reálná měření také jasně ukazují, že pro nižší napětové hladiny již není potřeba řešit přepětí při připínání nezatížené linky. Názornou ukázkou je *Obrázek 13*, který zobrazuje zapínání linky 22 kV u malé vodní elektrárny Čeňkova pila. Tento graf je vhodné zmínit i vzhledem k dalšímu charakteru práce, kdy bude prováděna simulace u podobného typu obvodu. Jak je již na první pohled vidět, k přepětí ani k výraznějšímu přechodovému ději prakticky nedochází.



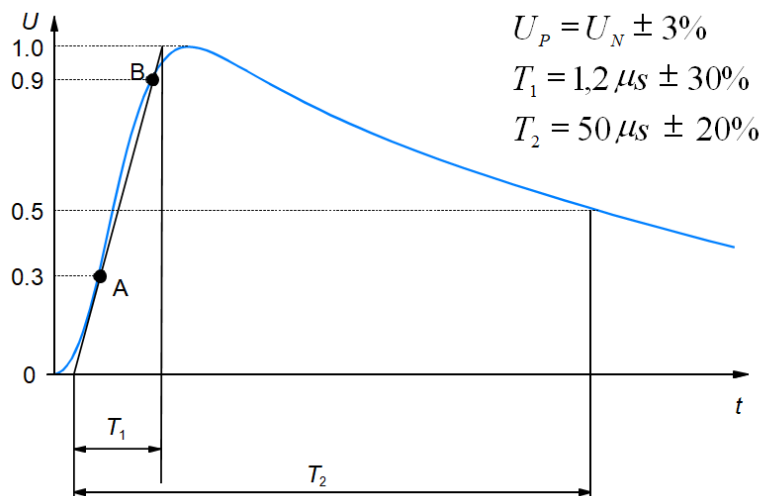
*Obrázek 13: Zapnutí linky 22 kV naprázdno [5]*

## 1.6 Zkušební přepětí

Spínací a atmosférická přepětí se při zkouškách nahrazují napětovými vlnami, které jsou přesně popsány pomocí norem. Základními normami popisujícími vysokonapětové zkušebnictví jsou ČSN EN 60052 a 60060. Těchto zkoušek je nepřehledné množství s velkým množstvím podmínek, ale v této práci budou zmíněny pouze dvě, a to napětové zkoušky spínacím a atmosférickým impulsem.



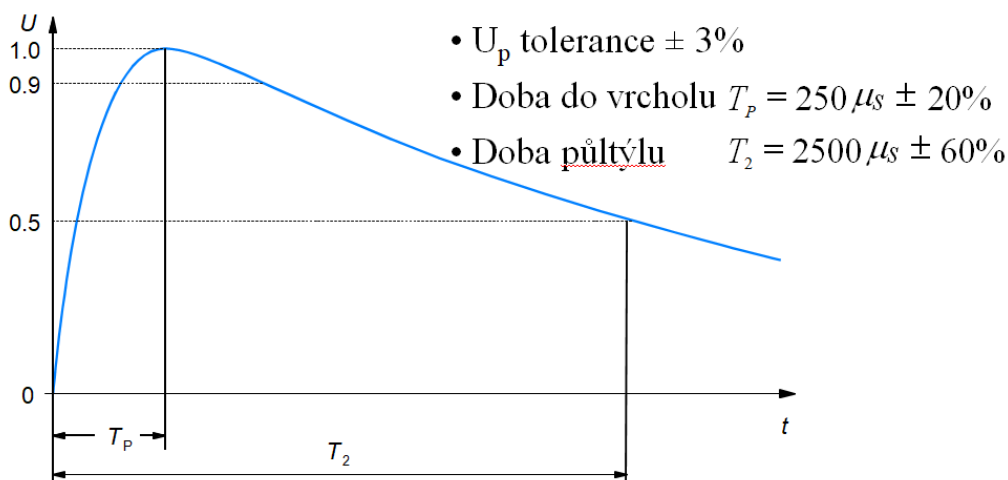
### 1.6.1 Zkouška atmosférickým impulsem



Obrázek 14: Graf tvaru vlny při zkoušce atmosférickým impulsem[3]

Základními parametry těchto impulsů jsou takzvaná doba čela  $T_1$ , která je určena jako  $T_{AB}/0,6$ , kde  $T_{AB}$  je doba, za kterou napětí vzroste z 30% zkušebního napětí na 90%. Dále to je pak doba půltýlu, což je doba od zdánlivého počátku napěťové vlny až do 50% napětí při poklesu. Jak je již zmíněno u obrázku, tak doba čela se uvažuje pro atmosférický impuls 1,2  $\mu s$  a doba půltýla 50  $\mu s$ . Často se proto také tento impuls označuje jednoduše jako impuls 1,2/50. Někdy také bývá označováno jako přepětí s krátkým čelem.

### 1.6.2 Zkouška spínacím impulsem



Obrázek 15: Graf tvaru vlny při zkoušce spínacím impulsem[3]

Podobně jako u atmosférického impulsu, i spínací má dva časové parametry, dobu do vrcholu  $T_p$  a znovu dobu půltýlu  $T_2$ . Typicky má hodnotu vrcholu  $250 \mu\text{s}$  a dobu půltýlu  $2500 \mu\text{s}$ , tedy se označuje jako impuls 250/2500. Někdy také bývá označováno jako přepětí s dlouhým čelem.

## **2 Ochrana před přepětím**

Přepětí může poškodit či degradovat prakticky všechna zařízení v elektroenergetické soustavě, ať už se jedná o elektrické přístroje a spotřebiče, izolace či samotné konstrukce budov a stožárů vedení. Nezanedbatelná jsou také nebezpečí spojená s úrazy a dokonce ztrátami na životech. Proto je třeba se před přepětím chránit.

### **2.1 Zemnicí lano, bleskosvod**

Atmosférickému výboji nelze zabránit v jeho vzniku. Je tedy nutné navrhnout ochrany, které po úderu blesku co nejvíce omezí jeho nežádoucí účinky. Základní ochranou před přímým úderem blesku do elektrizační soustavy je zemnicí lano (na vedení) nebo bleskosvod (budovy). Správným umístěním této ochrany se zabrání přímému úderu do vodičů (výrazně se sníží pravděpodobnost úderu do vedení)[2]. Díky této základní ochraně jsou přímé údery do fázových vodičů spíše výjimkou. Také díky tomu platí, že se nejčastěji setkáme s přepětím způsobeným elektromagnetickou indukcí. Další schopností zemnicího lana je také mírné potlačení velikosti naindukovaného napětí díky tomu, že zvyšují kapacitu vedení. Podobně snižují velikost přepětí na vedení také izolátory[1].

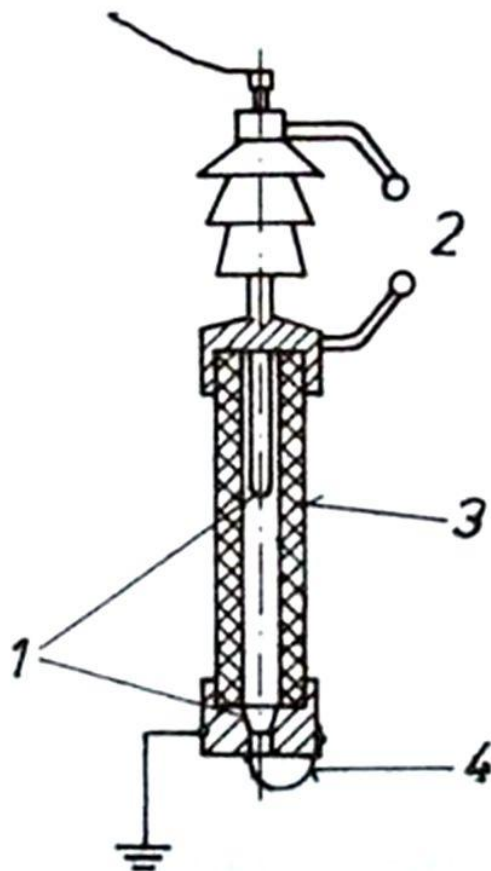
### **2.2 Ochranné jiskřiště**

Za konstrukčně nejjednodušší přepětíovou ochranu je považováno ochranné jiskřiště. Při zvýšení napětí nad mez danou konstrukcí jiskřiště dojde k zapálení výboje mezi elektrodami jiskřiště. Hlavní nevýhodou této ochrany je nutnost po odeznění přepětí vypnout daný úsek sítě, neboť oblouk mezi elektrodami je udržován napětím sítě. Jiskřištěm prochází takzvaný následný proud, jenž se pro soustavu jeví jako zkrat (či zemní spojení)[4].

### **2.3 Vyfukovací bleskojistka**

Částečným řešením nevýhody ochranného jiskřiště je vyfukovací bleskojistka, označována také jako Torokova trubice. Oblouk je přerušen expanzí plynů, které vzniknou při ohřívání materiálu vnitřní části bleskojistky vlivem výboje. Velkou nevýhodou vyfukovací bleskojistky je nutnost časté výměny, protože plyn degraduje a sama bleskojistka je

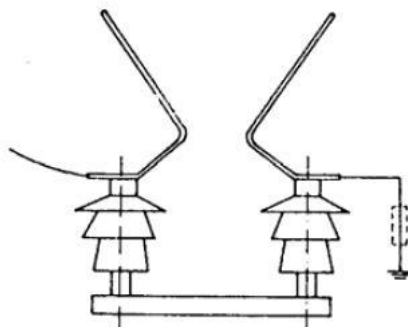
schopna uhasit jen několik desítek výbojů[4]. V současnosti se Torokovy trubice již nevyužívají.



Obrázek 16: Jednoduchý obrázek Torokovy trubice: 1) vnitřní jiskřiště, 2) vnější jiskřiště, 3) plynotvorná trubice, 4) ukazatel stavu [13]

## 2.4 Růžková bleskojistka

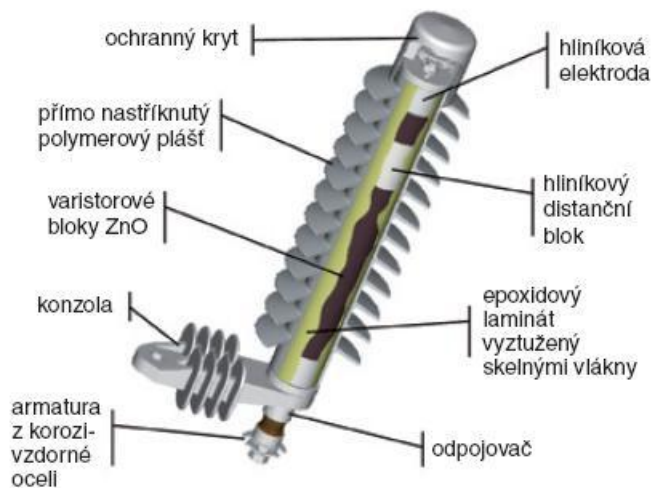
Další velmi jednoduchou přepětíovou ochranou je růžková bleskojistka. Je tvořena dvěma „růžky“ ve tvaru písmene V, z nichž jeden je zapojen na vedení a druhý je uzemněn. Oblouk se po vzniku postupně prodlužuje vlivem elektrodynamických sil a teplotního vztlaku. Díky tomu může dojít k poměrně rychlému uhašení oblouku. Růžkové bleskojistky mají nevýhodu v tom, že mají malou vypínací schopnost. Jsou často používány pro ochranu trakčních vedení či úsečnicků[14].



Obrázek 17: Růžková bleskojistka [15]

## 2.5 Svodiče přepětí

Hlavní ochranou elektrických stanic před napět'ovými vlnami z vedení jsou svodiče přepětí (někdy označované také jako bezjiskřiš'ové omezovače přepětí). V dnešní době se v sítích vvn a vn nejčastěji instalují omezovače přepětí na bázi ZnO. Omezovače fungují na principu varistoru (napět'ově závislé odpory), kde bloky ZnO absorbují energii přepětí. Jejich velkou výhodou je také rychlá doba reakce na přepětí (desítky nanosekund)[16].



Obrázek 18: Omezovač přepětí [17]

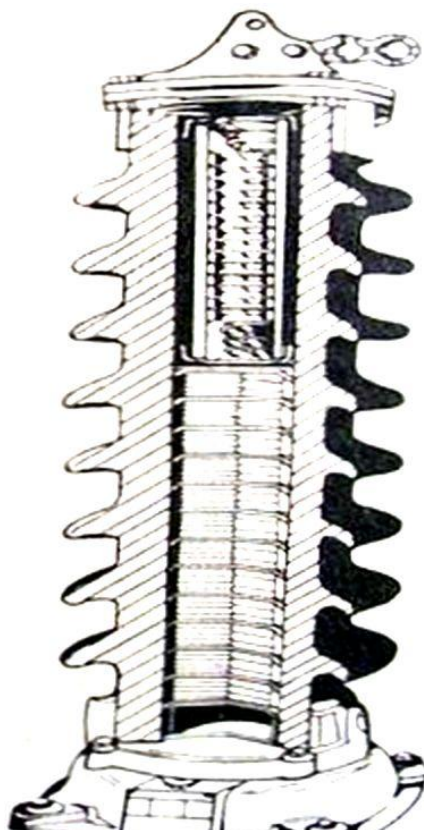
Ve východních zemích, převážně v republikách bývalého Sovětského svazu, se omezovače přepětí využívají také přímo na vedení vysokého a velmi vysokého napětí. Při vhodně zvolených rozstupech na sloupech vedení výrazně snižují velikost atmosférického přepětí a chrání elektrické stanice i samotná vedení[18]. Taková ochrana funguje nejen pro měřicí a distribuční transformátory, ale také pro ostatní zařízení na vedeních (úsečníky,

reclosery,...). Ekonomicky ale není příliš výhodná a využívá se jen u důležitých úseků vedení.

Podobně se pomocí svodičů přepětí chrání i vedení ultra vysokého napětí v Číně a Japonsku. Instalací několika speciálních svodičů zvaných CMOA podél vedení je možnost výrazně potlačit přepětí[19]. Tyto nově vyvíjené svodiče jsou v základu stejné. Skládají se z několika bloků oxidu kovů, z nichž některé bloky jsou spínané pomocí vysokovýkonných tyristorových spínačů. Odtud název CMOA, tedy controlled metal oxide arrester – kontrolovaný (spínaný) svodič přepětí z oxidu kovů.

## **2.6 Ventilové bleskojistky**

Přestože se do novějších rozvodů instalují omezovače přepětí, tak stále nejpoužívanějšími svodiči přepětí jsou ventilové bleskojistky[1]. Skládají se z jiskřiště a odporových kotoučů ve formě válečků (nejčastěji z karbidu křemíku SiC). V rozvodnách se umísťují co nejbližší k transformátoru. Při vzniku přepětí se zapálí jiskřiště a skrz odporové kotouče prochází proud do země. Odporové kotouče jsou nelineární, platí, že čím vyšší napětí je na kotoučích, tím je nižší odpor a skrz bleskojistku teče vyšší proud. Přesto je třeba, aby proud bleskojistkou nebyl příliš vysoký a šlo jej bez problému vypnout. Napětí, při kterém bleskojistka zapne, je dáno hlavně parametry jiskřiště. Svůj název ventilová bleskojistka získala podle toho, že funguje jako ventil – otevře se pouze při dostatečné hodnotě napětí a „upustí“ část proudu tekoucího do chráněného zařízení. Pro ventilové bleskojistky na hladině vvn jsou typické stínící kruhy, které napomáhají rovnoměrnému rozložení napětí.



Obrázek 19: Ventilová bleskojistka [13]

## 2.7 RC články

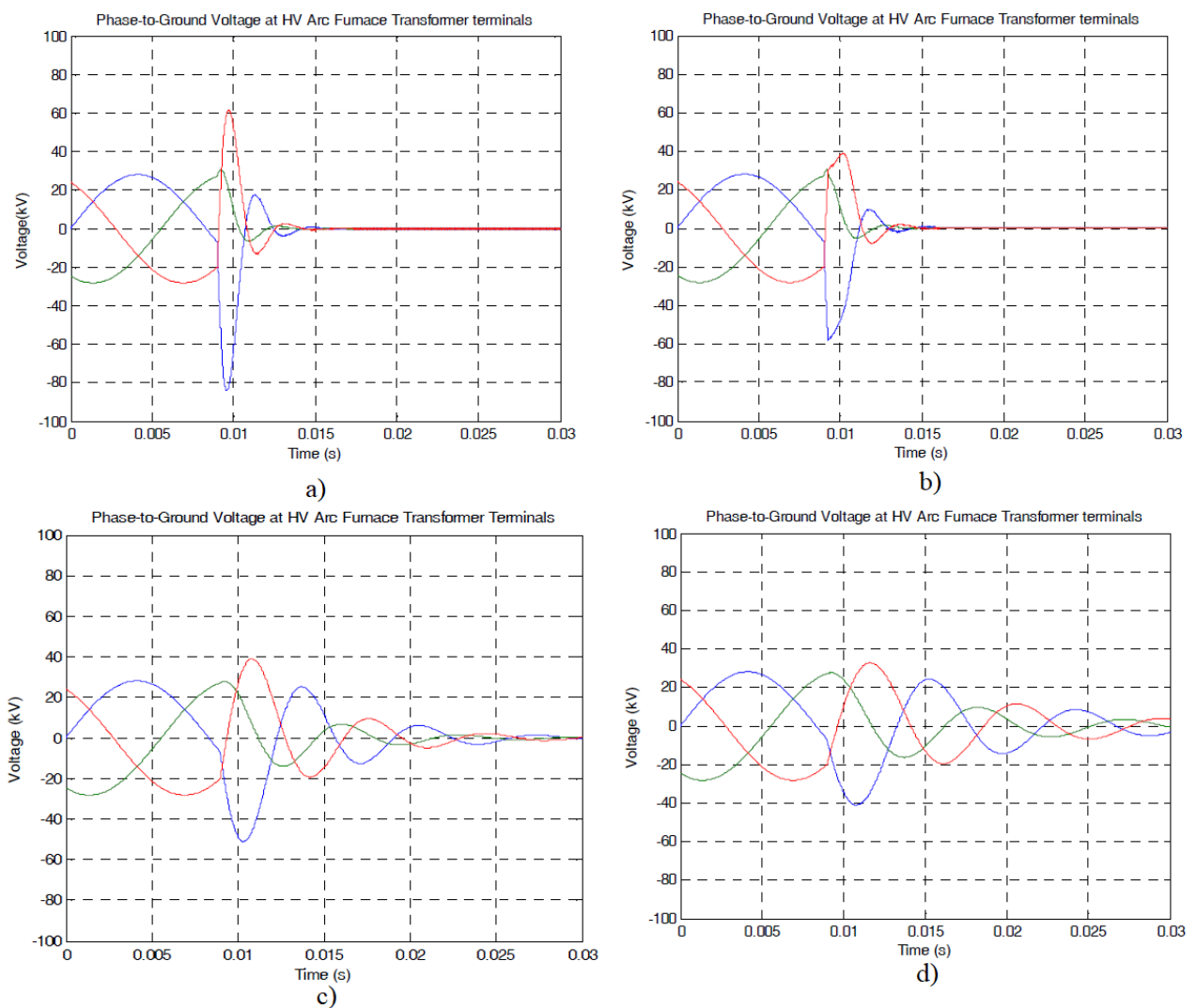
Další možnou ochranou proti přepětí jsou takzvané RC články. Tyto články se paralelně připojí k chráněnému zařízení, kterým může být transformátor či prakticky jakýkoliv elektrický stroj. Odpor článku způsobí snížení amplitudy přepětí, kondenzátor funguje jako vyhlazovací prvek. Potlačuje tedy vysokofrekvenční složky a tím nejen snižuje celkové přepětí, ale také snižuje strmost přepětěvé vlny. Tato vlastnost je výhodná, protože snižuje riziko mezizávitových zkratů.

Pomineme-li nízkonapětové aplikace chránění motorů s dlouhými přívodními kabely, zmíněné například zde [20], nebo využití RC obvodů ve výkonové elektronice, tak se převážně tyto články využívají na vysokém napětí (podle státu nejčastěji na 22 a 35 kV).

Mezi hlavní výhody těchto článků patří zcela jistě fakt, že tato ochrana pracuje hned, nepotřebuje dostatečnou energii jako jiskřiště k tomu, aby začalo chránit. Je schopná odvést velké množství energie. Ze své podstaty je také ochranou spolehlivou a poměrně bezporuchovou. Nevýhodou je vyšší cena a také to, že je třeba RC článek připojit co

nejblíže k chráněnému zařízení [21]. Zvýšení vzdálenosti od chráněného objektu snižuje účinnost, s jakou RC člunek funguje.

Jak již bylo zmíněno výše, RC články se využívají na ochranu transformátorů. Často je výhodné tuto ochranu rozšířit, k čemuž se používají svodiče přepětí. K chránění daného prvku se pak používá paralelní kombinace člunku a svodiče, která výrazně snižuje hodnotu přepětí. Velmi názornou ukázkou je práce z jedné brazilské univerzity[22], kdy na základě dat z továrny s obloukovou pecí byly vytvořeny simulace v programu Simulink při vypínání nezatížené pece. Jak je patrné z obrázku níže, spojení obou ochran vede až k dvojnásobnému snížení přepětí na jedné fázi. Pro samotný svodič, popřípadě jen pro RC člunek je snížení přepětí také výrazné, ale ne tolik jako při jejich kombinaci.

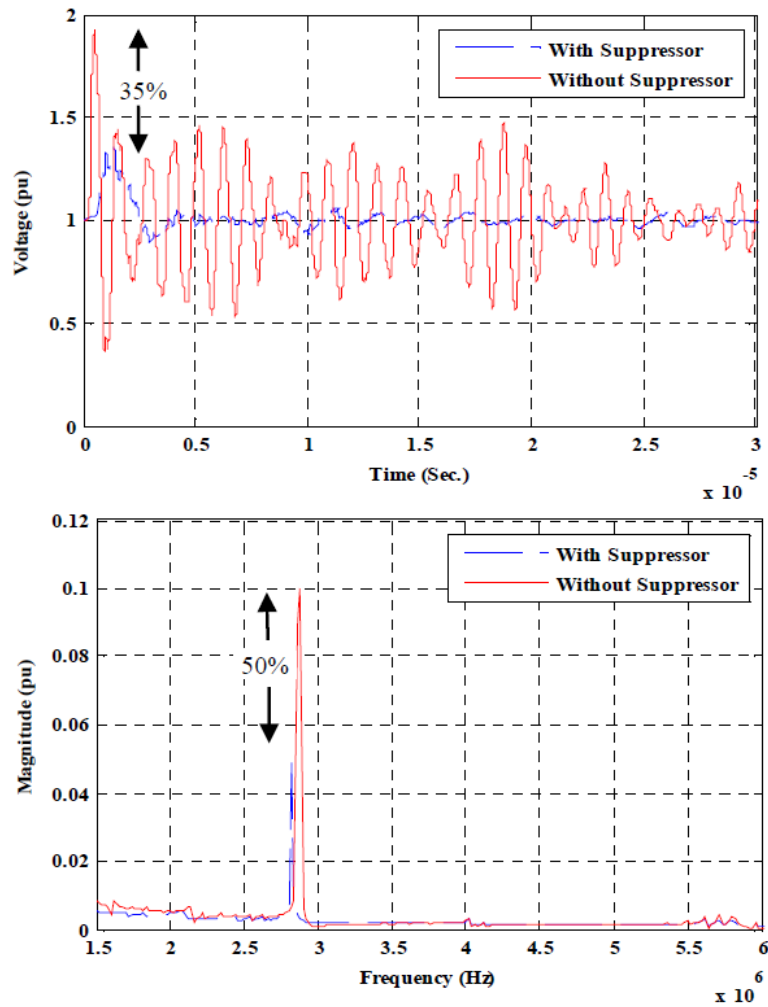


Obrázek 20: Průběh napětí při vypínání nezatížené pece a) bez ochran, b) se svodičem přepětí, c) s RC členem, d) s oběma ochranami [22]



Podobných případů a prací z oceláren a dalších továren s obloukovými tavnými pecemi není málo. Mnoho z těchto továren má u svých transformátorů nainstalovanou kombinaci RC článku a svodiče přepětí. V článku [23] můžeme najít příklad, kde nejenže tato kombinace snižuje přepětí při zapínání a vypínání, ale také tlumí účinky ferorezonance, jež výrazně namáhala transformátor. Vhodně zvolené komponenty odporu a kondenzátoru jsou tedy schopné zajistit ochranu před více druhy přepětí, na které jiné ochranné prvky nedokážou reagovat.

RC články také nacházejí využití už i na hladině velmi vysokého napětí. Zde se využívá především jejich schopnosti omezit strmý nárůst u vysokofrekvenčních přepětí (VFTO – very fast transient overvoltage), která vznikají při vypínání linek vvn pomocí vypínačů SF<sub>6</sub>. Tato přepětí se šíří na krátkou vzdálenost k transformátoru, který je tak výrazně namáhán[24]. Proto se tedy instaluje RC článek mezi vypínač a transformátor. Toto vysokofrekvenční přepětí má velmi často hodnotu blízkou vlastní rezonanci transformátoru. Proto je třeba správně zvolit nastavení RC článku, čímž se dá tomuto stavu zamezit. Grafy níže ukazují, jak správně vybraný RC článek dokáže omezit přepětí (v grafu označen modře jako suppressor – omezovač).



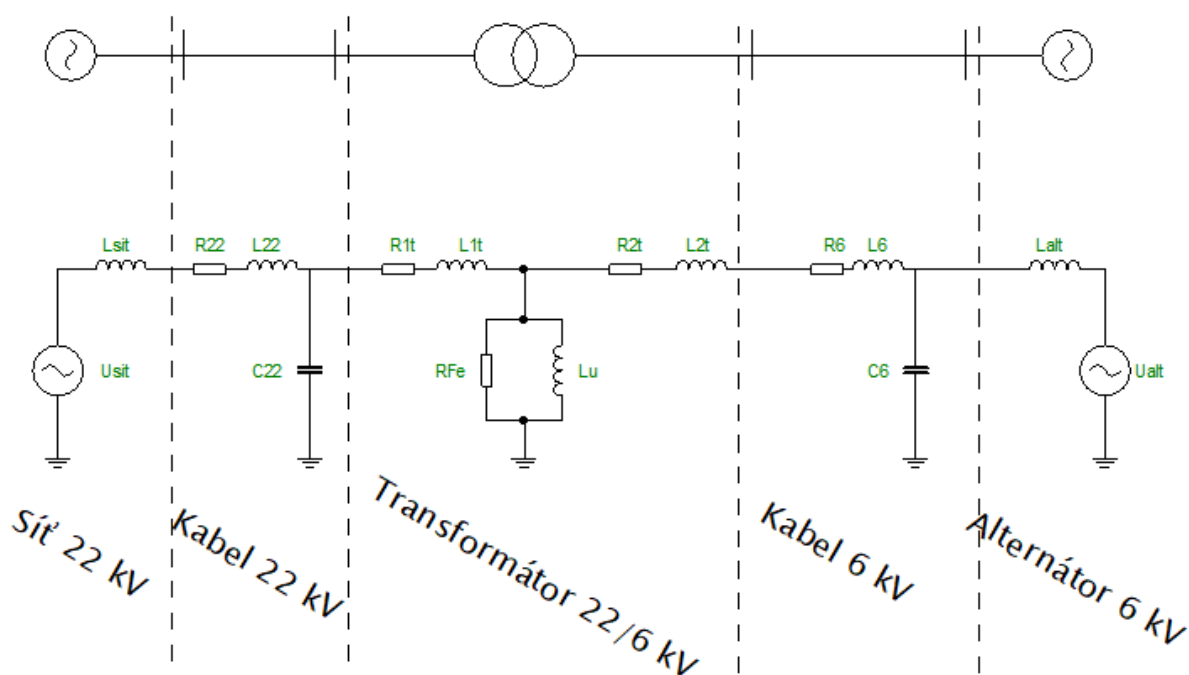
Obrázek 21: Porovnání napětí s (modrá) a bez (červená) RC članku nahoře) v čase, dole) ve frekvenční oblasti [24]

Existují i další oblasti, kde se předpokládá využití RC článků. S vývojem elektroenergetiky do vyšších napěťových hladin se očekává i rozvoj článků schopných pracovat při velmi vysokém napětí jako ochrana dalších zařízení, například nových vypínačů vvn[25].

### 3 Simulační výpočet náhradního obvodu

#### 3.1 Náhradní obvod

Pro tuto práci byl zvolen náhradní obvod vytvořený z alternátoru malé vodní elektrárny Pardubice se zdánlivým výkonem rovným 2300 kVA na hladině 6 kV, z kabelů s hliníkovým jádrem a izolací ze zesíťného polyetylenu na hladině 6 a 22 kV, z transformátoru DOTUL 2500/20 se zdánlivým výkonem 2500 kVA (22/6 kV) a z náhrady sítě na hladině 22 kV. V Příloze A jsou uvedeny všechny nutné parametry pro výpočty provedené níže.



Obrázek 22: Náhradní schéma

Bylo zvoleno, že alternátor bude do sítě dodávat činný výkon o hodnotě jedné megawatty. Při dodržení účinníku  $\cos \varphi = 0,85$  je jalový výkon roven 619 kVAr. Pro toto jednofázové schéma tedy platí výkony třetinové,  $P = 333,3$  kW a  $Q = 206,3$  kVAr (viz Příloha B, jenž ukazuje činný a jalový výkon při ustáleném stavu v programu DYNAST).

##### 3.1.1 Výpočet náhradních parametrů alternátoru

Alternátor je nahrazen pomocí napěťového zdroje 6 kV a indukčnosti. Aby alternátor dodával do sítě požadovaný činný a jalový výkon, je třeba jej nabudit na 1,42 násobek jmenovité hodnoty a posunout o fázový úhel rovný 0,32 rad.

$$X_d = x_d \cdot \frac{U_n^2}{S_{ng}} = 1,1 \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{2300 \cdot 10^3} = 17,217 \Omega \quad (3.1)$$

$$\rightarrow L_{alt} = \frac{X_d}{\omega} = \frac{17,217}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,055 \text{ H} \quad (3.2)$$

Přepočet na hladinu 22 kV:

$$L_{altc} = L_{alt} \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,055 \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,737 \text{ H} \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Výpočet náhradních parametrů kabelu 6 kV

Byla zvolena délka kabelu 50 metrů (0,05 km).

$$R_6 = R_{k6} \cdot l = 0,32 \cdot 0,05 = 0,016 \Omega \quad (3.4)$$

$$L_6 = L_{k6} \cdot l = 0,65 \cdot 0,05 = 0,0325 \text{ mH} \quad (3.5)$$

$$C_6 = C_{k6} \cdot l = 0,3 \cdot 0,05 = 0,015 \mu\text{F} \quad (3.6)$$

Přepočet parametrů na hladinu 22 kV:

$$R_{6c} = R_6 \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,016 \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,215 \Omega \quad (3.7)$$

$$L_{6c} = L_6 \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,0325 \cdot \left(\frac{22}{6}\right)^2 = 0,437 \text{ mH} \quad (3.8)$$

$$C_{6c} = C_6 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 0,015 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 0,202 \mu\text{F} \quad (3.9)$$

### 3.1.3 Výpočet náhradních parametrů kabelu 22 kV

Byla zvolena délka kabelu 50 kilometrů.

$$R_{22} = R_{k22} \cdot l = 0,164 \cdot 50 = 8,2 \Omega \quad (3.10)$$

$$L_{22} = L_{k22} \cdot l = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ mH} \quad (3.11)$$

$$C_{22} = C_{k22} \cdot l = 0,2 \cdot 50 = 10 \mu\text{F} \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Výpočet náhradních parametrů transformátoru 22/6 kV

$$R_k = \frac{\Delta P_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nt}} = \frac{0,88}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{2500 \cdot 10^3} = 1,704 \Omega \quad (3.13)$$

$$\rightarrow R_{1t} = R_{2tc} = \frac{R_k}{2} = \frac{1,704}{2} = 0,852 \Omega \quad (3.14)$$

Přepočet  $R_{2t}$  na hladinu 6 kV:

$$R_{2t} = R_{2tc} \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 0,852 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 0,063 \Omega \quad (3.15)$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nt}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{2500 \cdot 10^3} = 11,616 \Omega \quad (3.16)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{11,616^2 - 1,704^2} = 11,49 \Omega \quad (3.17)$$

$$\rightarrow L_k = \frac{X_k}{\omega} = \frac{11,49}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 36,575 \text{ mH} \quad (3.18)$$

$$\rightarrow L_{1t} = L_{2tc} = \frac{L_k}{2} = \frac{36,575}{2} = 18,287 \text{ mH} \quad (3.19)$$

Přepočet  $L_{2t}$  na hladinu 6 kV:

$$L_{2t} = L_{2tc} \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 18,287 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = 1,361 \text{ mH} \quad (3.20)$$

$$R_{Fe} = \frac{100}{\Delta P_0} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nt}} = \frac{100}{0,1} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{2500 \cdot 10^3} = 193,6 \text{ k}\Omega \quad (3.21)$$

$$\rightarrow G_{Fe} = \frac{1}{R_{Fe}} = \frac{1}{193600} = 5,165 \text{ }\mu\text{S} \quad (3.22)$$

$$Y_0 = \frac{i_0}{100} \cdot \frac{S_{nt}}{U_n^2} = \frac{0,3}{100} \cdot \frac{2500 \cdot 10^3}{(22 \cdot 10^3)^2} = 15,496 \text{ }\mu\text{S} \quad (3.23)$$

$$L_u = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{Y_0^2 - G_{Fe}^2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{1}{\sqrt{15,496^2 - 5,165^2}} = 217,873 \text{ H} \quad (3.24)$$

### 3.1.5 Výpočet náhradních parametrů sítě 22 kV

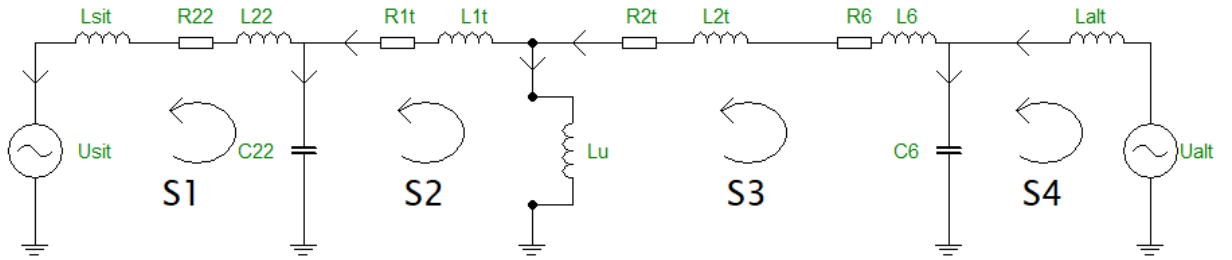
$$\text{Bylo zvoleno: } S_k'' = 100 \text{ MVA} \quad (3.25)$$

$$Z_{ksit} = \frac{U_n^2}{S_k''} = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^3} = 4,84 \text{ }\Omega \quad (3.26)$$

$$Z_{ksit} \cong X_{ksit} \rightarrow L_{sit} = \frac{Z_{ksit}}{\omega} = \frac{4,84}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 15,4 \text{ mH} \quad (3.27)$$

## 3.2 Diferenciální matematický model schématu

Pro tento matematický model byla zvolena metoda smyčkových proudů, která umožňuje s pomocí několika rovnic vytvořit dostačující diferenciální model. Kvůli zjednodušení byl zanedbán odpor transformátoru  $R_{Fe}$ .



Obrázek 23: Náhradní schéma s naznačením smyčkových proudů

$$i_{S1} \cdot u_{sit} + L_{sit} \cdot \frac{di_{S1}}{dt} + R_{22} \cdot i_{S1} + L_{22} \cdot \frac{di_{S1}}{dt} + \frac{1}{C_{22}} \cdot \int (i_{S2} - i_{S1}) dt = 0 \quad (3.28)$$

$$i_{S2} \cdot \frac{1}{C_{22}} \cdot \int (i_{S2} - i_{S1}) dt + R_{1t} \cdot i_{S2} + L_{1t} \cdot \frac{di_{S2}}{dt} + L_u \cdot \frac{d(i_{S3} - i_{S2})}{dt} = 0 \quad (3.29)$$

$$i_{S3} \cdot L_u \cdot \frac{d(i_{S3} - i_{S2})}{dt} + (R_{2t} + R_6) \cdot i_{S3} + (L_{2t} + L_6) \cdot \frac{di_{S3}}{dt} + \frac{1}{C_6} \cdot \int (i_{S4} - i_{S3}) dt = 0 \quad (3.30)$$

$$i_{S4} \cdot \frac{1}{C_6} \cdot \int (i_{S4} - i_{S3}) dt + L_{alt} \cdot \frac{di_{S4}}{dt} - u_{alt} = 0 \quad (3.31)$$

Abychom tyto integro-diferenciální rovnice mohli využít v nějakém výpočetním programu, je lepší všechny rovnice zderivovat, čímž dostaneme pouze diferenciální model.

$$i_{S1} \cdot (L_{sit} + L_{22}) \cdot \frac{d^2 i_{S1}}{dt^2} + R_{22} \cdot \frac{di_{S1}}{dt} + \frac{du_{sit}}{dt} + \frac{1}{C_{22}} \cdot (i_{S2} - i_{S1}) = 0 \quad (3.32)$$

$$i_{S2} \cdot (L_{1t} - L_u) \cdot \frac{d^2 i_{S2}}{dt^2} + L_u \cdot \frac{d^2 i_{S3}}{dt^2} + R_{1t} \cdot \frac{di_{S2}}{dt} + \frac{1}{C_{22}} \cdot (i_{S2} - i_{S1}) = 0 \quad (3.33)$$

$$i_{S3} \cdot (L_{2t} + L_u + L_6) \cdot \frac{d^2 i_{S3}}{dt^2} - L_u \cdot \frac{d^2 i_{S3}}{dt^2} + (R_{2t} + R_6) \cdot \frac{di_{S3}}{dt} + \frac{1}{C_6} \cdot (i_{S4} - i_{S3}) = 0 \quad (3.34)$$

$$i_{S4} \cdot L_{alt} \cdot \frac{d^2 i_{S4}}{dt^2} - \frac{du_{alt}}{dt} + \frac{1}{C_6} \cdot (i_{S4} - i_{S3}) = 0 \quad (3.35)$$

Pomocí těchto rovnic lze následně vypočítat proudy a napětí všech prvků v náhradním schématu.

### **3.3 Simulace**

Pomocí programu DYNAST bylo provedeno několik simulací různých spínacích dějů na vytvořeném náhradním obvodu. Následně byl hledán vhodný RC člen, jenž by podle předpokladů [26] měl omezit vzniklé přechodné děje a přepětí s nimi spjaté.

#### **3.3.1 Volba RC členu**

K zamezení přepětí je nutné správně zvolit velikost odporu a kapacity. Jejich hodnota závisí jednak na hladině napětí, kde má ochrana působit. Pak také závisí na tom, jaký přístroj bude chráněn, a v neposlední řadě také samozřejmě na ceně RC článku. Typickými hodnotami u hladin 6 a 22 kV jsou odpory v rozmezí 30-50  $\Omega$  (pro vyšší napětí až 200  $\Omega$ ) a hodnota kapacity se pohybuje od 0,125  $\mu\text{F}$  do 0,5  $\mu\text{F}$  (výjimečně i 1  $\mu\text{F}$ )[27].

V této práci byly jmenovitě zvoleny členy s hodnotami:

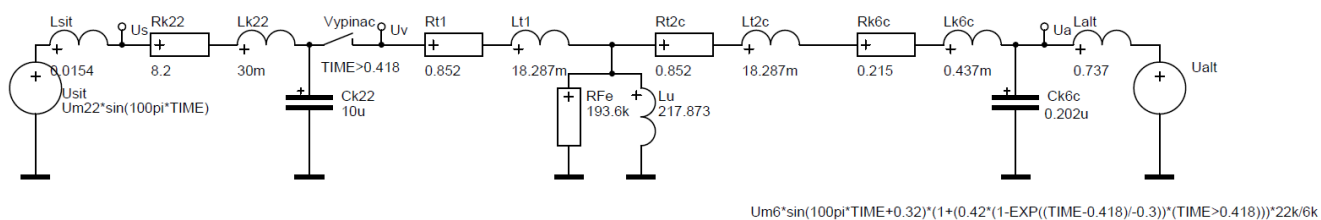
- $R=30 \Omega$  a  $C=0,125 \mu\text{F}$  (člen 1),
- $R=30 \Omega$  a  $C=0,25 \mu\text{F}$  (člen 2),
- $R=30 \Omega$  a  $C=0,5 \mu\text{F}$  (člen 3),
- $R=50 \Omega$  a  $C=0,125 \mu\text{F}$  (člen 4),
- $R=50 \Omega$  a  $C=0,25 \mu\text{F}$  (člen 5),
- $R=50 \Omega$  a  $C=0,5 \mu\text{F}$  (člen 6).

Mělo by platit, že cena RC členů se odvíjí převážně podle zvolené kapacity. Čím vyšší řada, tím vyšší cena.



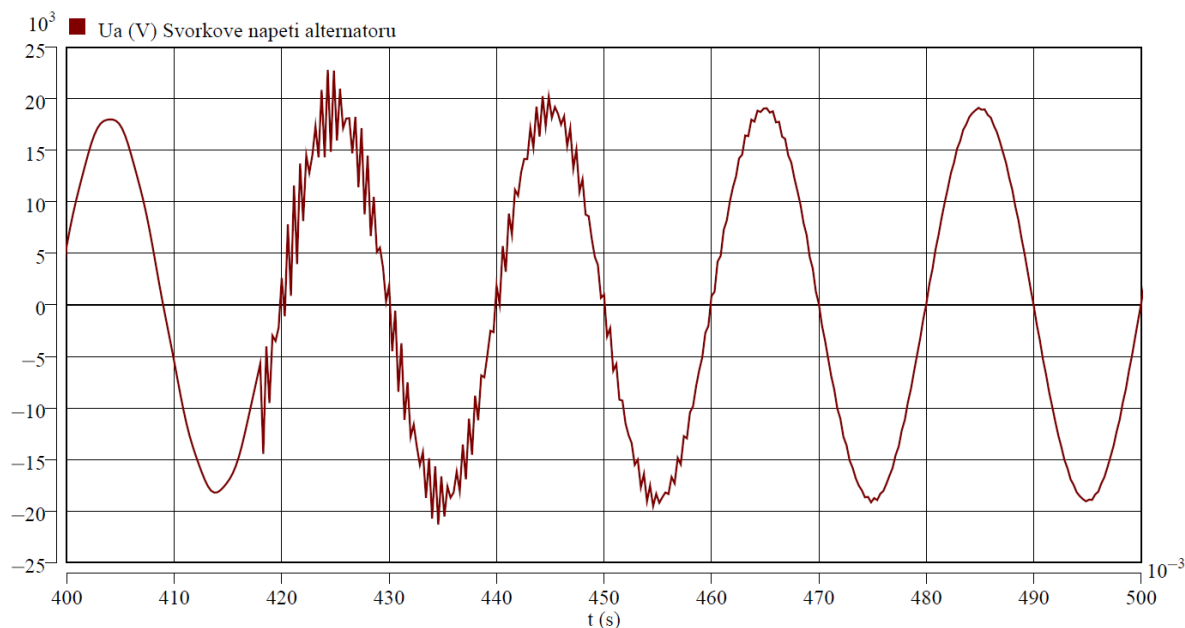
### 3.3.2 Připnutí alternátoru k síti

Typickým spínacím dějem, kdy může dojít k přechodnému ději spojenému s přepětím, je připnutí k síti. Taková přepětí vznikají nejčastěji přímo na alternátoru, nebo u vypínače. Nenabuzený alternátor je připojen k síti pomocí vypínače, který může být na hladině 22 i 6 kV. Záleží na uspořádání dané elektrárny. V této práci budou uvažovány obě varianty umístění vypínače. Po sepnutí vypínače se pomocí regulátoru postupně alternátor budí na požadovanou hodnotu výkonu.



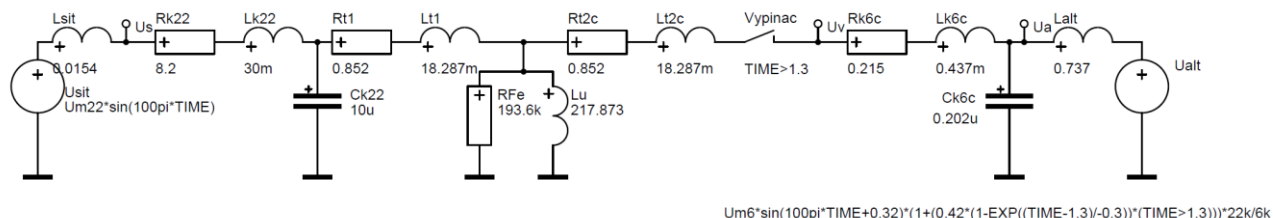
Obrázek 24: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST pro připínání k síti s vypínačem na hladině 22 kV

Při připínání k síti záleží velikost přepětí na času sepnutí vypínače. V časech napětíových špiček přepětí prakticky nevzniká. Nejvyšší hodnota přepětí vznikla pro čas 0,418 sekundy, kdy napětí dosáhlo téměř 23 kV.



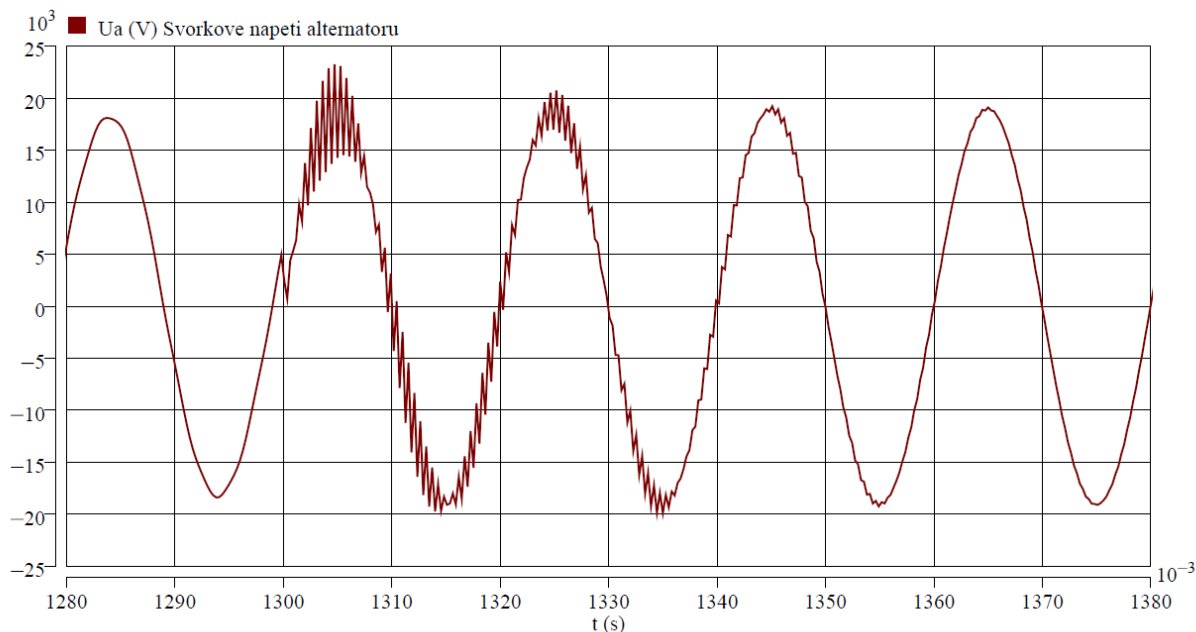
Obrázek 25: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 22 kV při připnutí k síti bez RC členu

Varianta s vypínačem na straně 6 kV se od předchozí verze příliš neliší. Bylo pouze nutné sepnout vypínač později, neboť v programu DYNAST došlo k ustálení stavu po nabití kondenzátorů až po první sekundě výpočtu.



Obrázek 26: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST pro připojení k síti s vypínačem na hladině 22 kV

Samotné sepnutí vypínače tedy proběhlo v čase 1,3 sekundy. V porovnání s předchozím případem nedošlo k výraznější změně, velikost i oscilace přepětí jsou si podobné. Vrcholová hodnota přepětí dosahuje 23,5 kV. Podobně jako u předchozí simulace také platí, že při sepnutí vypínače v čase napěťových maxim k přechodným dějům prakticky nedochází.

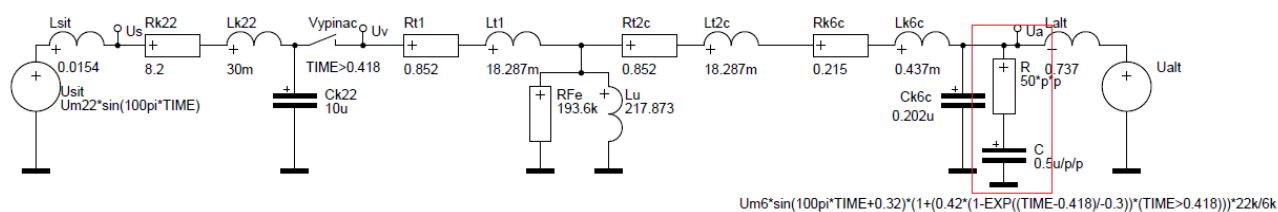


Obrázek 27: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 6 kV při připojení k síti bez RC členu

### 3.3.2.1 Připojení RC členu

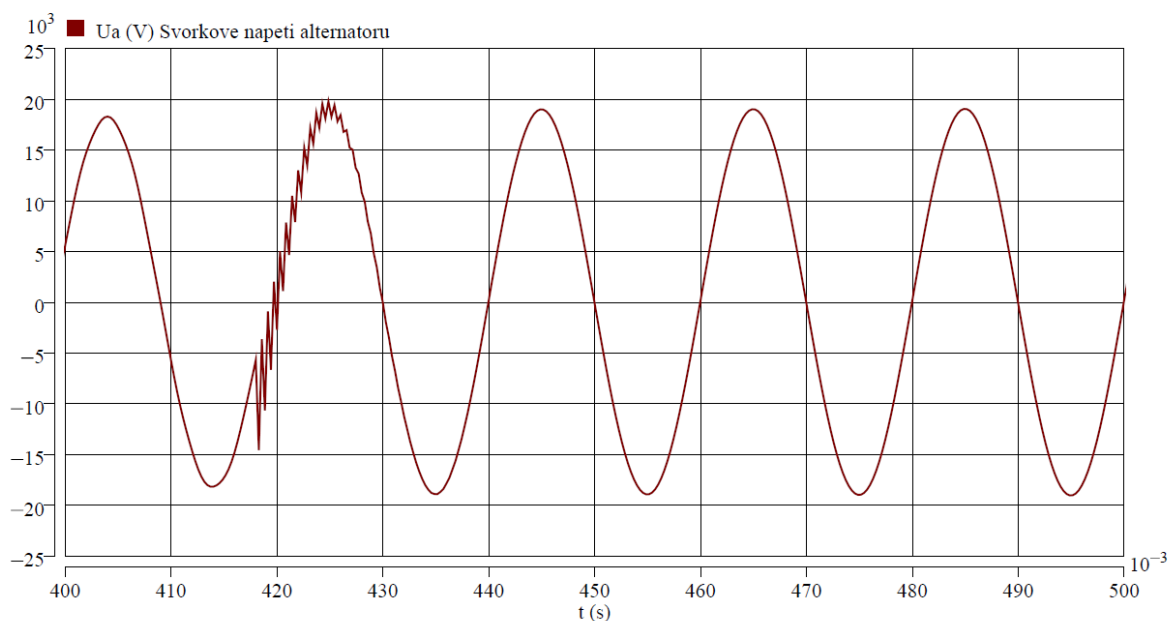
Po nalezení nejhoršího případu přepětí při připojení k síti bylo dalším krokem najít takový RC člen, jenž potlačuje napětovou špičku a také sníží vysokofrekvenční kmity. Předem zvolené články (viz kapitola 3.3.1) byly umístěny na několik míst náhradního obvodu a následně se porovnávaly jednotlivé grafické výsledky.

Z vybraných omezovacích členů není ani jeden schopný snížit přepětí, pokud je umístěn na stranu 22 kV. Z charakteru samotného přepětí, které vzniká na alternátoru, je takový závěr logický a simulace jej potvrdila.



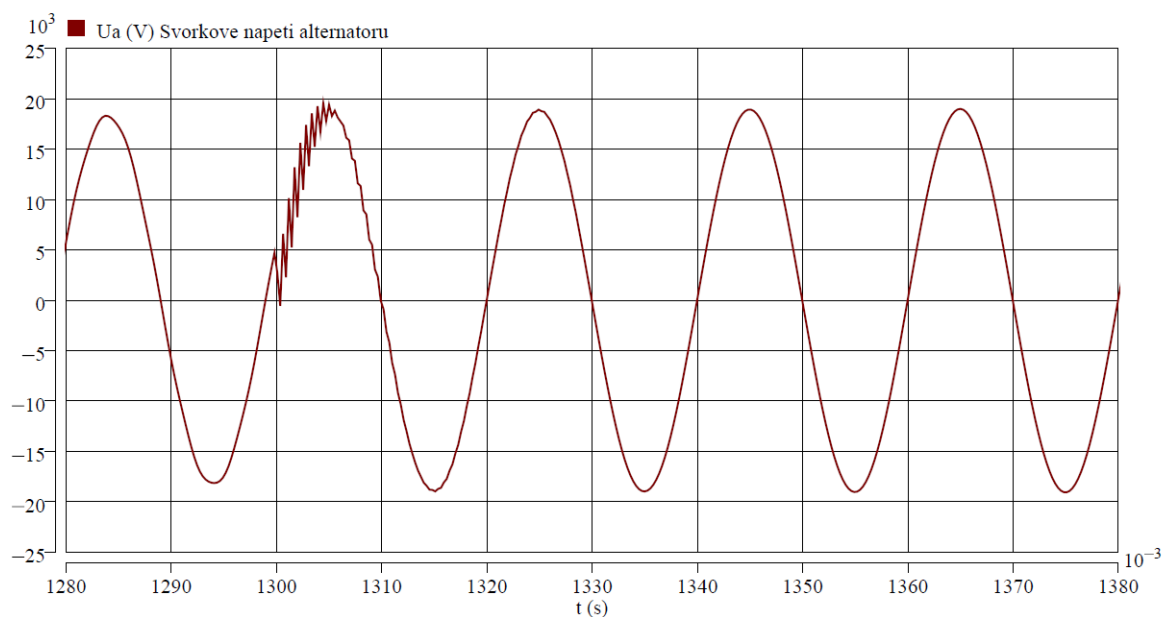
Obrázek 28: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST pro připojení k síti s vypínačem na hladině 22 kV s RC členem na straně alternátoru

Pro RC články umístěné těsně za alternátor je situace výrazně příznivější. I ten nejlevnější článek ( $R=30 \Omega$  a  $C=0,125 \mu\text{F}$ ) sníží oscilace i napětovou špičku. Porovnáním jednotlivých průběhů můžeme soudit, že nejlépe omezují členy nejdražší, tedy s kapacitou rovnou  $0,5 \mu\text{F}$  (člen 3 a člen 6). Poměrně slušných výsledků lze dosáhnout i s členem 5, jenž oscilace výrazně sníží. Zajímavostí je, že napětová špička je pro členy s kapacitou rovnou  $0,25 \mu\text{F}$  vyšší, než pro levnější kapacity  $0,125 \mu\text{F}$ . Nejvhodnější je ale rozhodně člen 6, jenž téměř úplně oscilace utlumí a nevznikne přepětí, pouze nevýrazný nárůst na  $19,75 \text{ kV}$ .



Obrázek 29: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 22 kV při připojení k síti s RC členem 6

Podobné průběhy jsou i pro případ s vypínačem na straně 6 kV. Opět platí, že nejvhodnějším členem je ten nejdražší, tedy člen 6. Oscilace omezí na minimum a napěťová špička nepřesáhne 20 kV. Člen 3 je také ještě pod hladinou přepětí. Ostatní již přechodový děj natolik neomezí a kvůli vysokofrekvenčním oscilacím stále nastává přepětí.

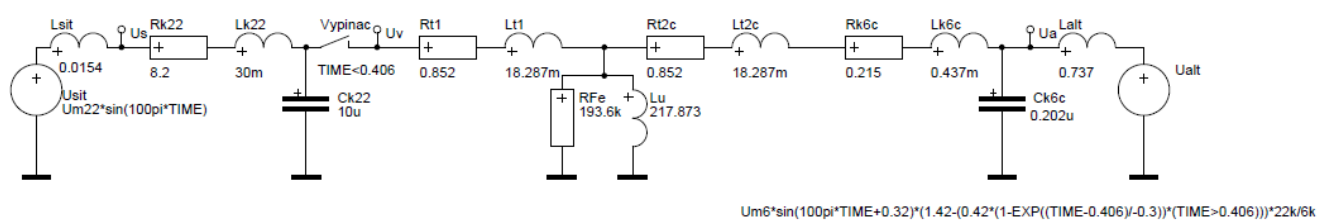


Obrázek 30: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 6 kV při připojení k síti s RC členem 6

Pro každou z navrhovaných variant bylo následně vytvořené v programu DYNAST schéma, v němž byl magnetický obvod transformátoru, respektive indukčnost  $L_u$ , nahrazen pomocí zdrojů napětí. V takovém případě jsou jednotlivé prvky na hladině 6 kV počítány s převodem na tuto hladinu. V Příloze D jsou zobrazeny grafy, které se svými průběhy prakticky rovnají s variantou rozebranou výše. Oscilace i napěťové špičky se shodují.

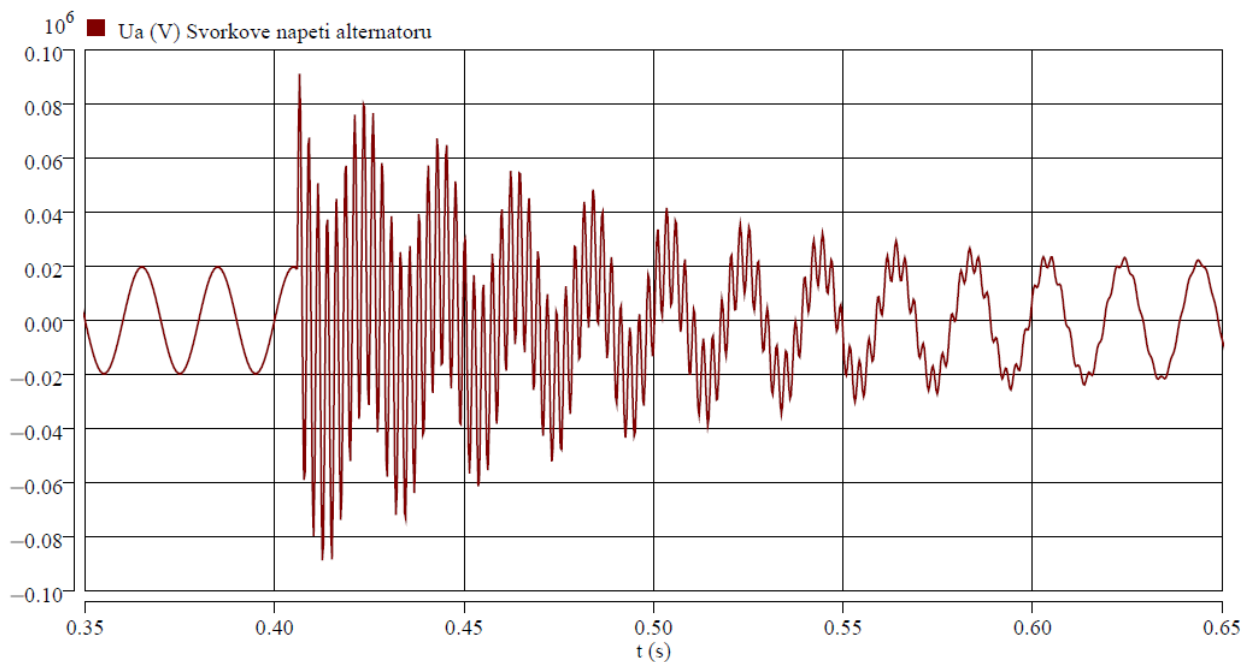
### 3.3.3 Odepnutí alternátoru od sítě při provozu

Dalším spínacím dějem, u kterého můžeme očekávat přepětí, je odepínání alternátoru při zatížení. Obvykle je snaha alternátor odepínat nezatížený, protože v takové chvíli by prakticky nemělo dojít k výrazným přechodovým dějům. Avšak při zatížení je tato situace zcela odlišná. Odepnutí při provozu může nastat například, pokud selže napěťový regulátor, kvůli poruše se musí vypnout turbína, nebo i při neopatrné manipulaci s vypínačem. Podobně jako v předchozí podkapitole, i zde budeme zkoumat simulaci s vypínačem na hladině 6 i 22 kV. Je uvažována situace, kdy se alternátor po odepnutí od sítě postupně odbuzuje na běh naprázdno.



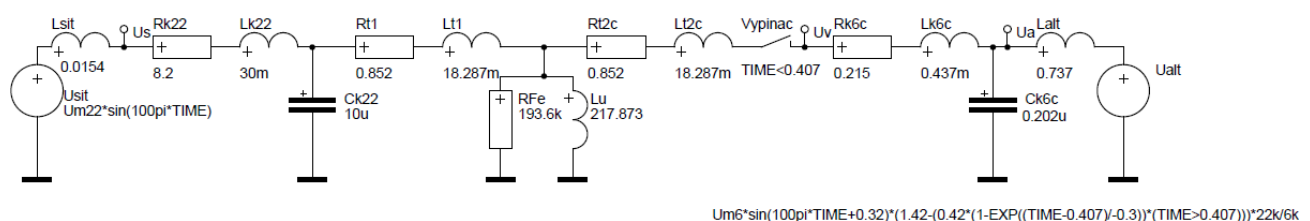
Obrázek 31: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání od sítě s vypínačem na hladině 22 kV bez RC členu

Na rozdíl od připínání, kdy dochází pouze k malému přepětí, při odepínání dochází k několikanásobnému přepětí pro většinu spínacích časů vypínače s výraznými oscilacemi trvajících několik period. Nejvyšší hodnota přepětí vzniká při vypnutí v čase 0,406 sekundy, kdy napěťová špička dosahuje 91 kV.



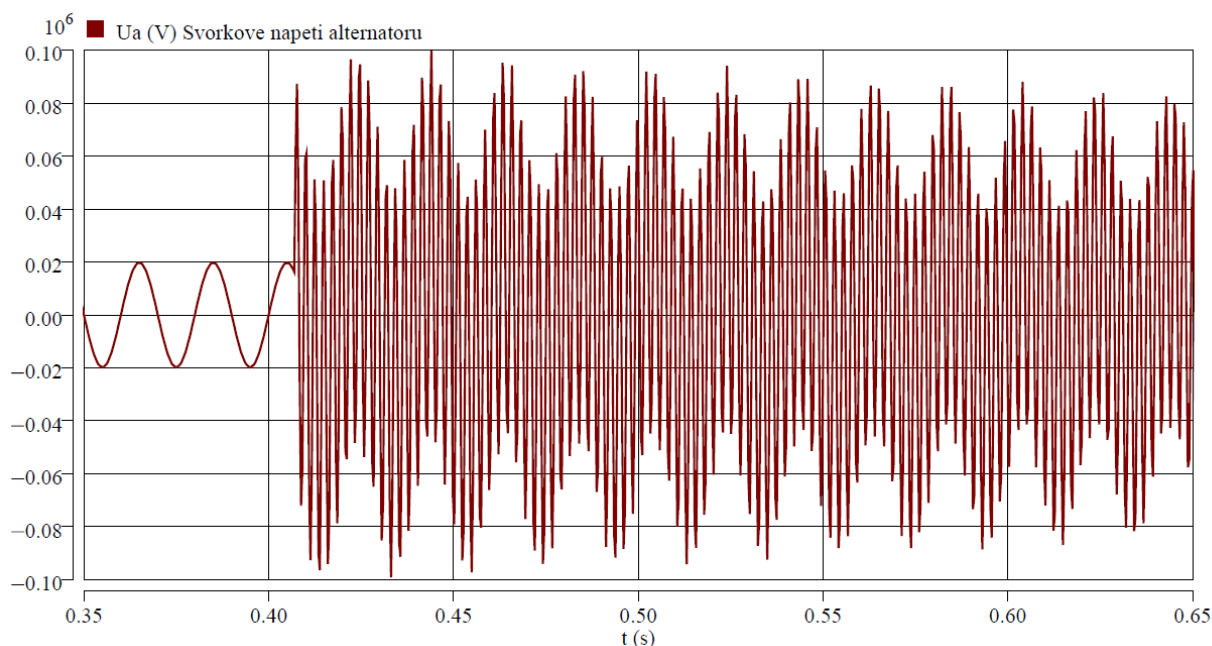
Obrázek 32: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 22 kV při odepínání od sítě bez RC členu

Pro variantu s vypínačem na hladině 6 kV je přechodový jev výrazně odlišný. Napěťová špička se liší oproti případu výše jen o několik kilovoltů, ale vždy je vyšší. Radikálnější odlišné jsou ale oscilace, které trvají až několik sekund, než se ustálí a dlouho drží hodnotu napětí vysoko nad povolenou mezí.



Obrázek 33: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání od sítě s vypínačem na hladině 6 kV bez RC členu

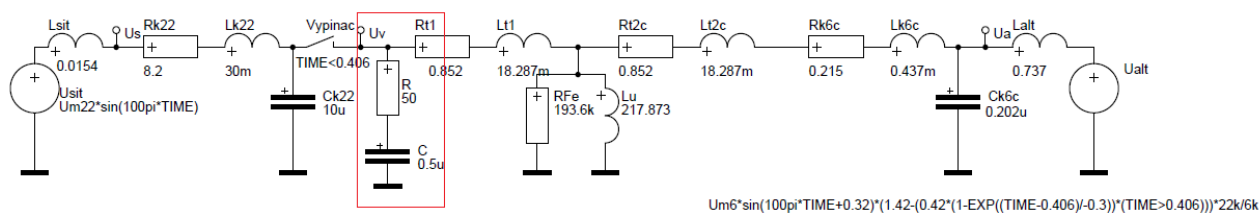
Při nejhorším možném scénáři, tedy při odepnutí nabuzeného alternátoru v čase 0,407 s, dojde k přechodovému ději s napěťovou špičkou rovnou až 100 kV. Oscilace vzniklé tímto odepnutím udržují po dlouhou dobu vysokou hodnotu přepětí. Napětí alternátoru by se teoreticky ustálilo až po více jak dvou sekundách.



Obrázek 34: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 6 kV při odepínání od sítě bez RC členu

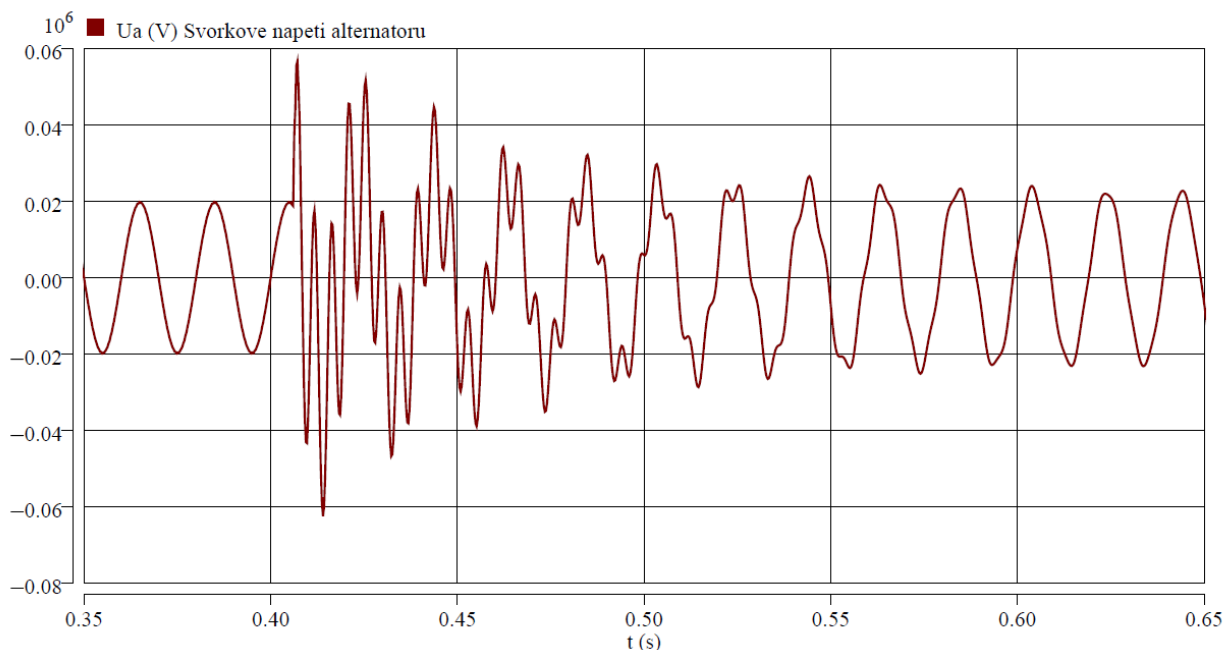
### 3.3.3.1 Připojení RC členu

Vzhledem k vysokým přepětím již nelze předpokládat, že by samotný RC člen dokázal úplně eliminovat tento přechodný děj. Přesto i zde je nutné vhodně zvolit správný člen, aby byly pokud možno co nejvíce omezeny negativní účinky přepětí.

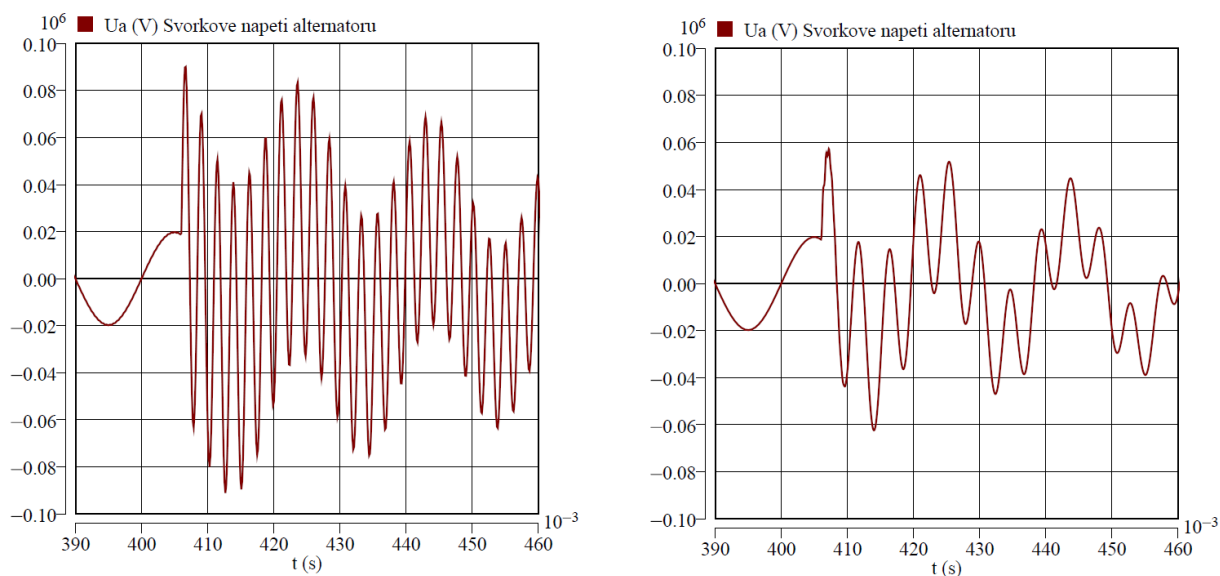


Obrázek 35: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání od sítě s vypínačem na hladině 22 kV s RC členem 6 na hladině 22 kV

Pro vypínač na hladině 22 kV poměrně překvapivě dobře funguje člen 6, pokud jej umístíme hned za transformátor na hladině 22 kV. Přepětí lze snížit až k hodnotě 62,5 kV. Jak můžeme vidět na Obrázku 36 níže, kromě sníženého přepětí se výrazněji omezí i oscilace, kdy se dříve ustalují ony charakteristické „zuby“.



Obrázek 36: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 22 kV při odepínání od sítě s RC členem 6 na hladině 22 kV

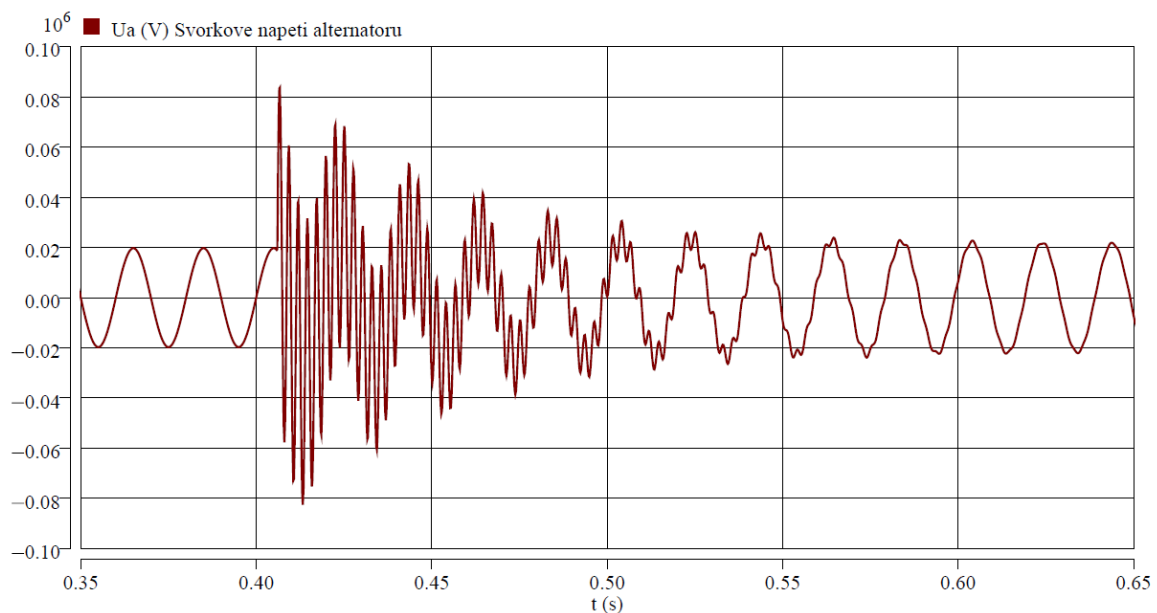


Obrázek 37: Detail grafů napětí alternátoru při odepínání vypínačem na 22 kV bez RC členu (vlevo) a s RC členem 6 (vpravo)

Tentokrát není výhodnější RC člunek umístit na hladinu 6 kV k alternátoru. Zde platí schéma, jako je vidět na *Obrázku 28*. Člen 6 je zde opět nejvhodnější variantou, která nejnápadněji sníží přepětí a omezí oscilace. V tomto případě ale není toto omezení tak

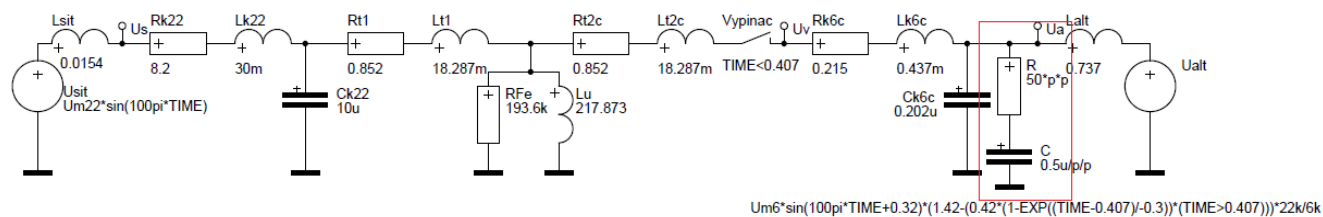


výrazné, jako pro předchozí situaci. Oscilace jsou oproti případu bez RC článku utlumeny pouze o několik ms dříve a přepětí taktěž není omezeno o tolik, přibližně na 83,5 kV.



Obrázek 38: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 22 kV při odepínání od sítě s RC členem 6 na hladině 6 kV

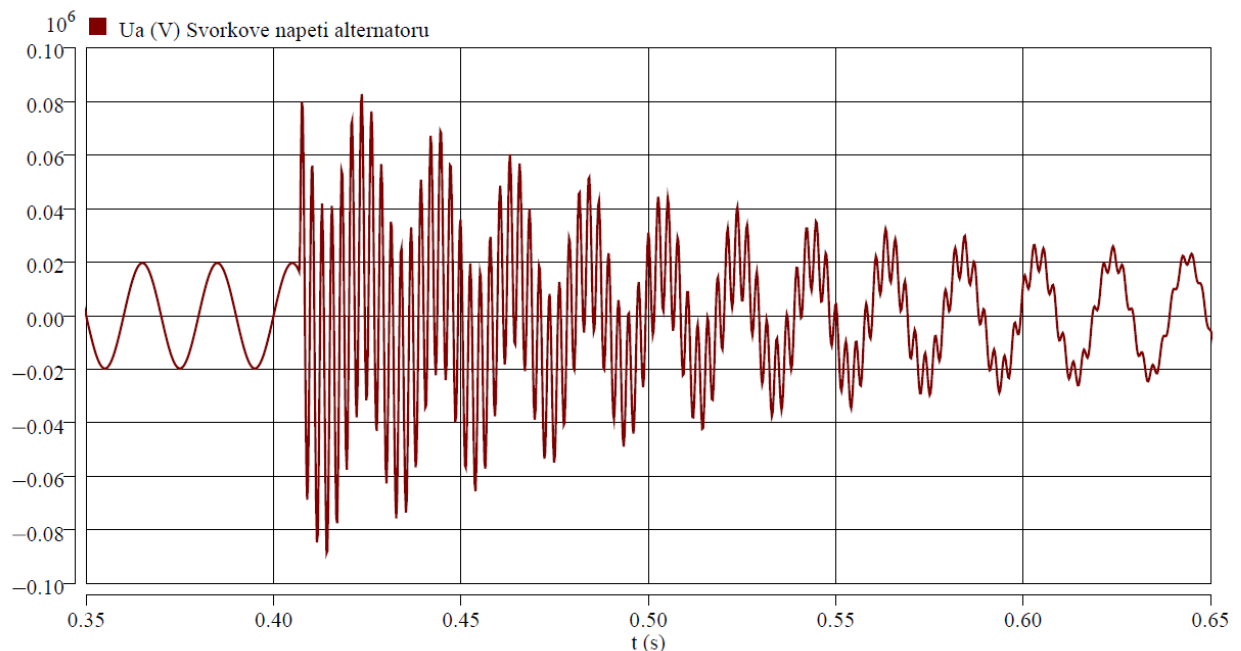
Pokud je vypínač umístěn na hladině 6 kV, tak naopak žádný RC člen nefunguje, pokud jej připojíme na hladině 22 kV. V takovém případě prakticky nedochází k žádnému zlepšení. Je to logický závěr, neboť zdroj přepětí je až za článkem a ten tedy nemůže přechodový děj nijak ovlivnit. Je nutné RC člen připojit co nejbližší k alternátoru, tedy na hladinu 6 kV.



Obrázek 39: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání od sítě s vypínačem a RC členem 6 na hladině 6 kV

Přepětí je sníženo na špičkovou hodnotu 88 kV a oscilace jsou výrazně utlumeny. Z původních několikasekundových oscilací dojde k razantnímu utlumení již po několika desetínách sekundy. Takový případ nastává opět pro nejdražší RC člen 6, ostatní články snižují přepětí méně a taktěž doba oscilací je delší (o několik desetín sekundy). Přesto i

nejlevnější RC článek dokáže omezit přepětí podobně jako člen 6 a oscilace utlumí mnohem dříve než bez využití této ochrany (téměř o sekundu).

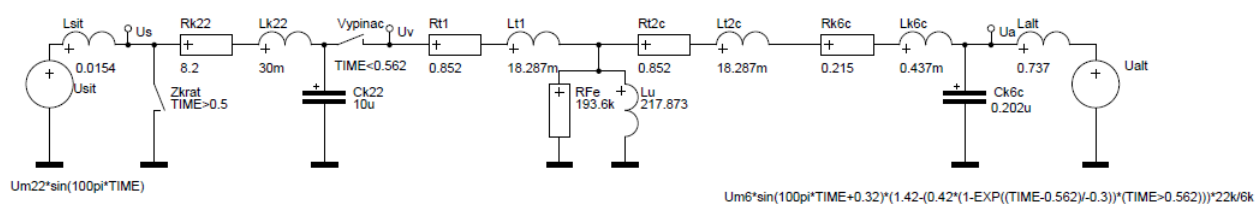


Obrázek 40: Graf napětí alternátoru s vypínačem na straně 6 kV při odepínání od sítě s RC členem 6 na hladině 6 kV

Opět lze v Příloze E nalézt grafy pro schéma s transformátorem sestaveným pomocí náhradních zdrojů napětí. Průběhy se shodují se simulací náhradního obvodu s klasickým schématem.

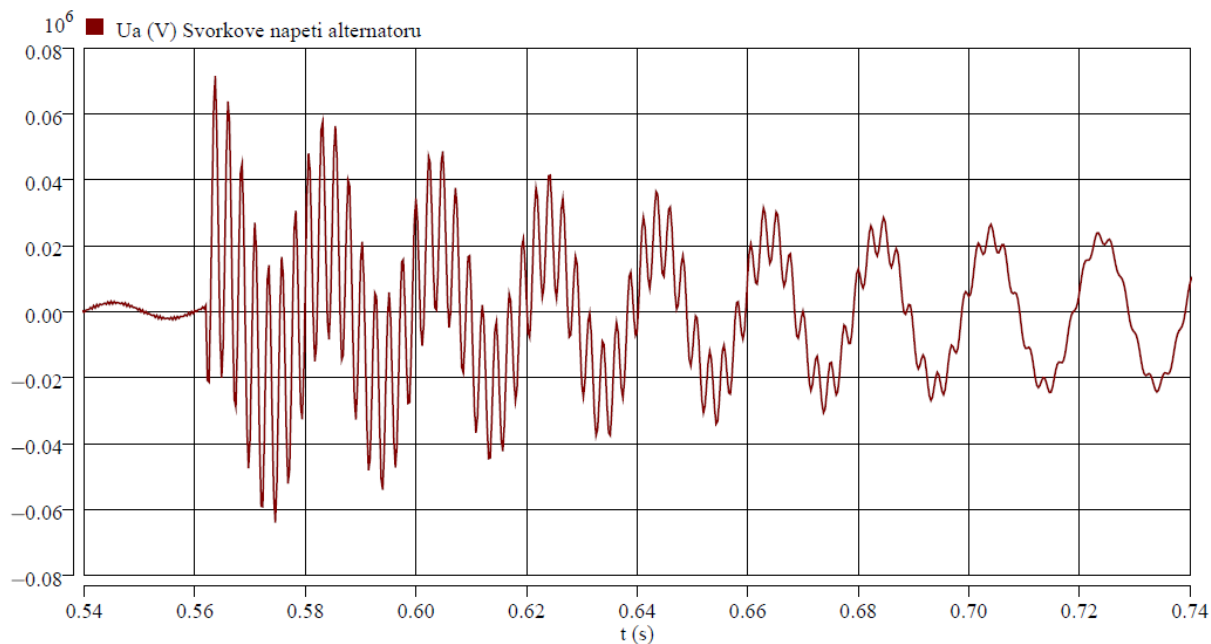
### 3.3.4 Odepnutí alternátoru od sítě při zkratu na lince 22 kV

V této podkapitole bude simulována situace, kdy na vedení 22 kV vznikne zkrat. V programu DYNAST je tento problém vyjádřen pomocí ideálního paralelního vypínače, jenž v čase 0,5 s sepne. V této části budou uvažovány dvě situace. Po zaregistrování zkratu ochranou sepne vypínač buď v proudové nule, nebo naopak v maximu. První simulace je poměrně věrná skutečnosti, mělo by nastat nejmenší přepětí a je snaha takto vypínat. Naopak vypínání v proudovém maximu je jevem značně namáhajícím vypínač, jenž by musel být výrazně předimenzován, aby byl schopen vypnout. Také by mělo nastat největší možné přepětí (několikanásobek jmenovité hodnoty napětí).



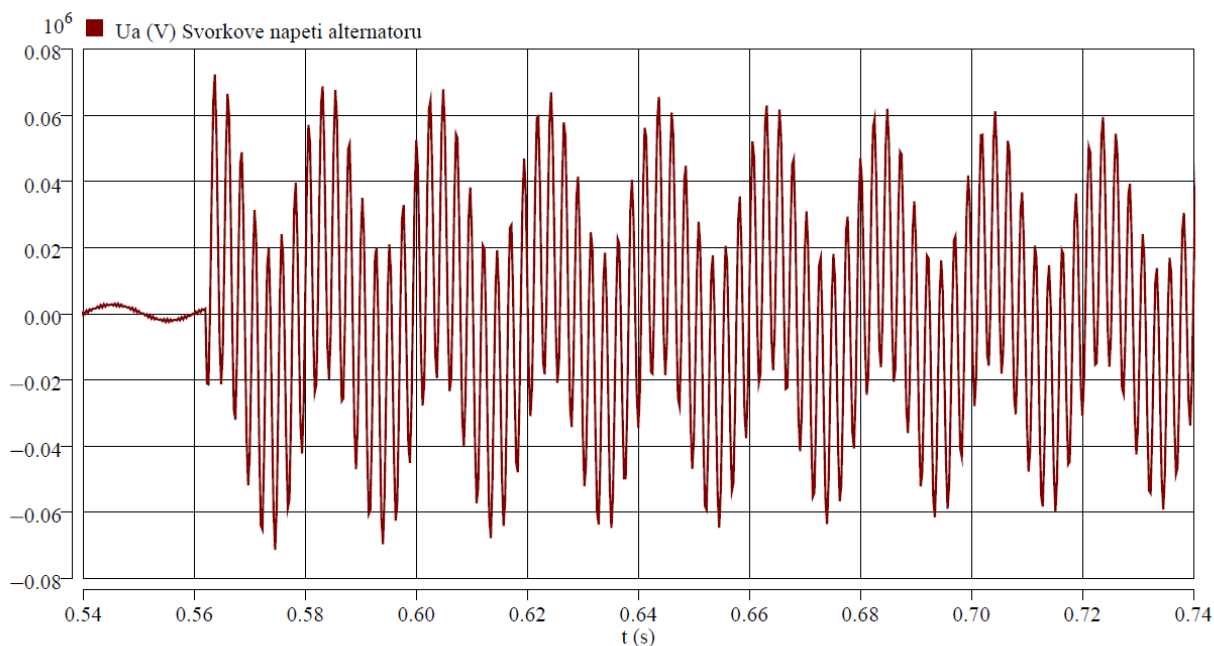
Obrázek 41: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání zkratu v proudové nule s vypínačem na hladině 22 kV bez RC členu

Aby byla situace při vypínání v proudové nule ještě příznivější, byl zvolen případ, kdy zkrat vznikne na konci vedení, daleko od transformátoru. Zkrat nastane v čase 0,5 sekundy. Uvažujeme vcelku rychlé zapůsobení ochran a sepnutí vypínače v proudové nule, jenž nastane v čase 0,562 s. Pro vypínač na hladině 22 kV dojde k přepětí dosahujícímu 71,5 kV s výraznými oscilacemi. Tento průběh je velmi podobný odepínání při provozním zatížení.



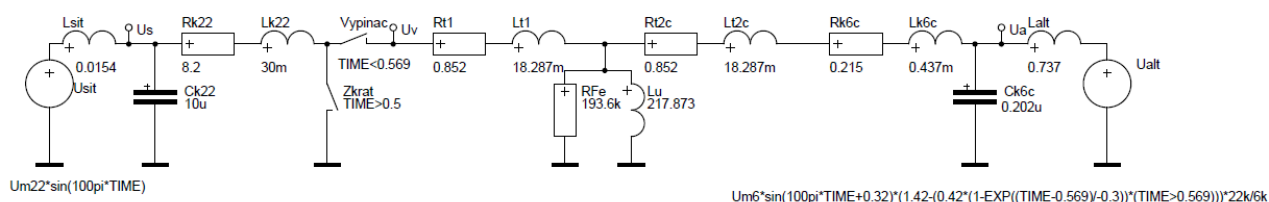
Obrázek 42: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudové nule s vypínačem na straně 22 kV bez RC členu

Pro vypínač na hladině 6 kV je průběh opět velmi podobný, jako tomu bylo v kapitole 3.3.3. Napěťová špička dosahuje 72,5 kV a vysokofrekvenční oscilace trvají několik sekund.



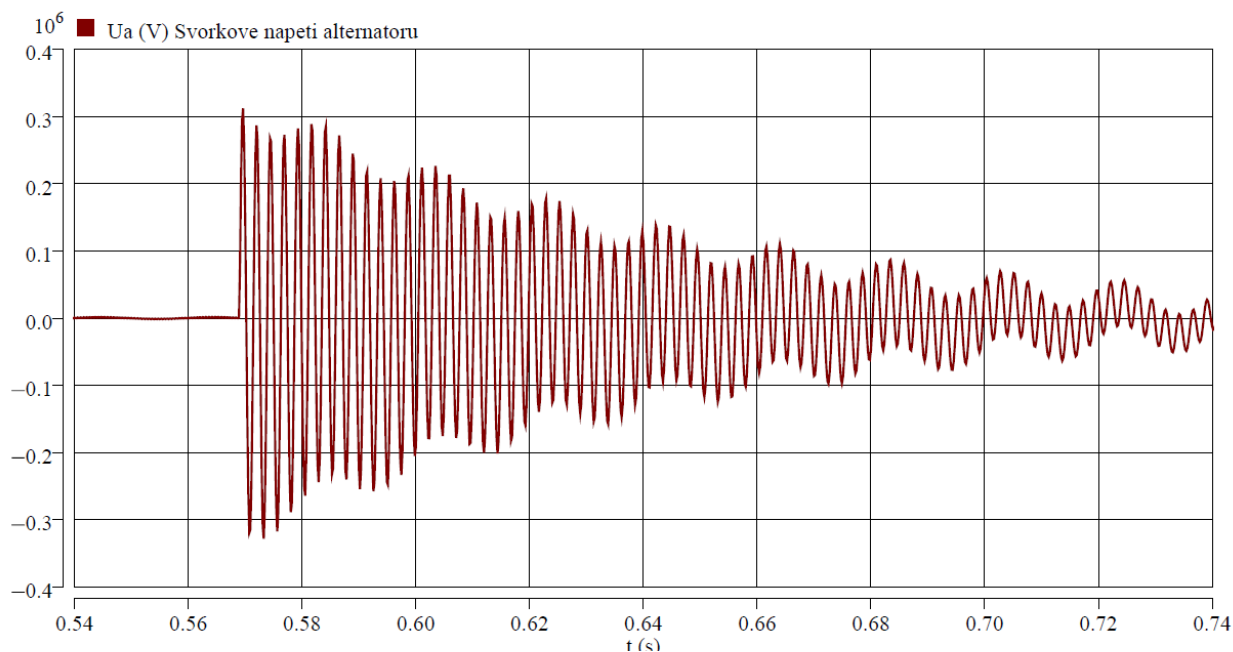
Obrázek 43: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudové nule s vypínačem na straně 6 kV bez RC členu

Pro scénář se sepnutím vypínače v proudovém maximu bude navíc uvažována situace, kdy zkrat vznikne na hladině 22 kV co nejbližže transformátoru. Díky tomu by přepětí mělo dosahovat extrémních, prakticky nedosažitelných hodnot.



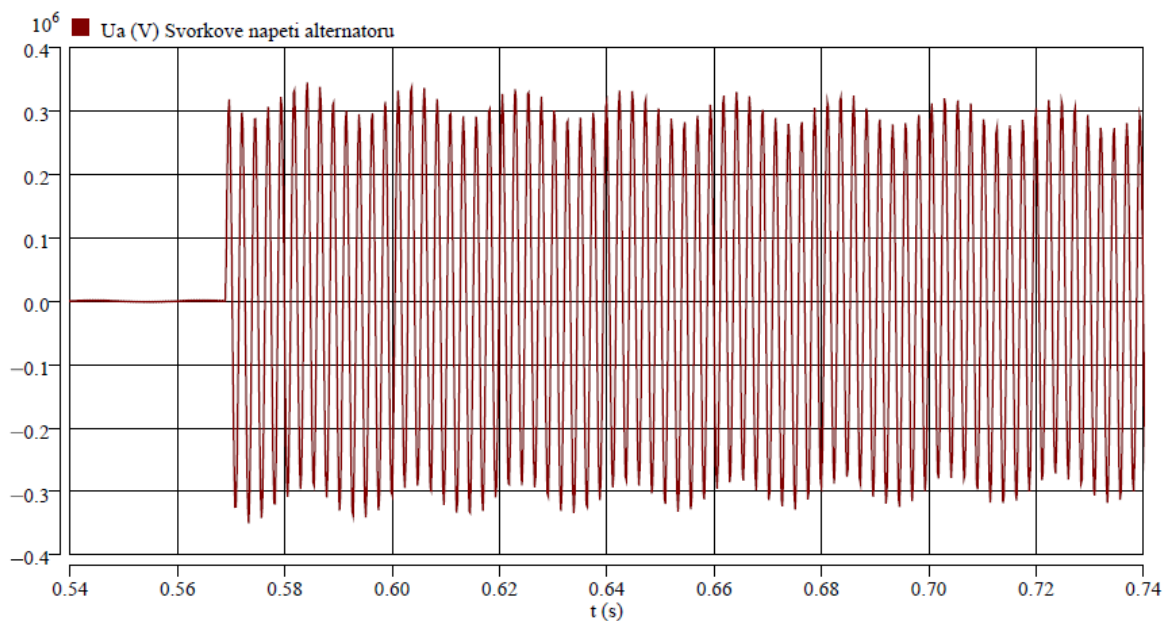
Obrázek 44: Náhradní elektrické schéma v programu DYNAST při odepínání zkratu v proudovém maximu s vypínačem na hladině 22 kV bez RC členu

V čase 0,569 sekundy při průchodu proudovým maximem dojde k sepnutí, jehož napěťová špička dosahuje až 330 kV. Vysokofrekvenční oscilace se postupně tlumí v podobném trendu jako u všech předchozích případu s vypínačem na hladině 22 kV.



Obrázek 45: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu s vypínačem na straně 22 kV bez RC členu

Pro vypínač na hladině 6 kV platí podobný graf, jako u předchozích odepínání s vypínačem na hladině 6 kV. Napěťová špička je mírně vyšší než u vypínače 22 kV a oscilace trvají opět více jak sekundu. Přepětí dosahuje až 350 kV.

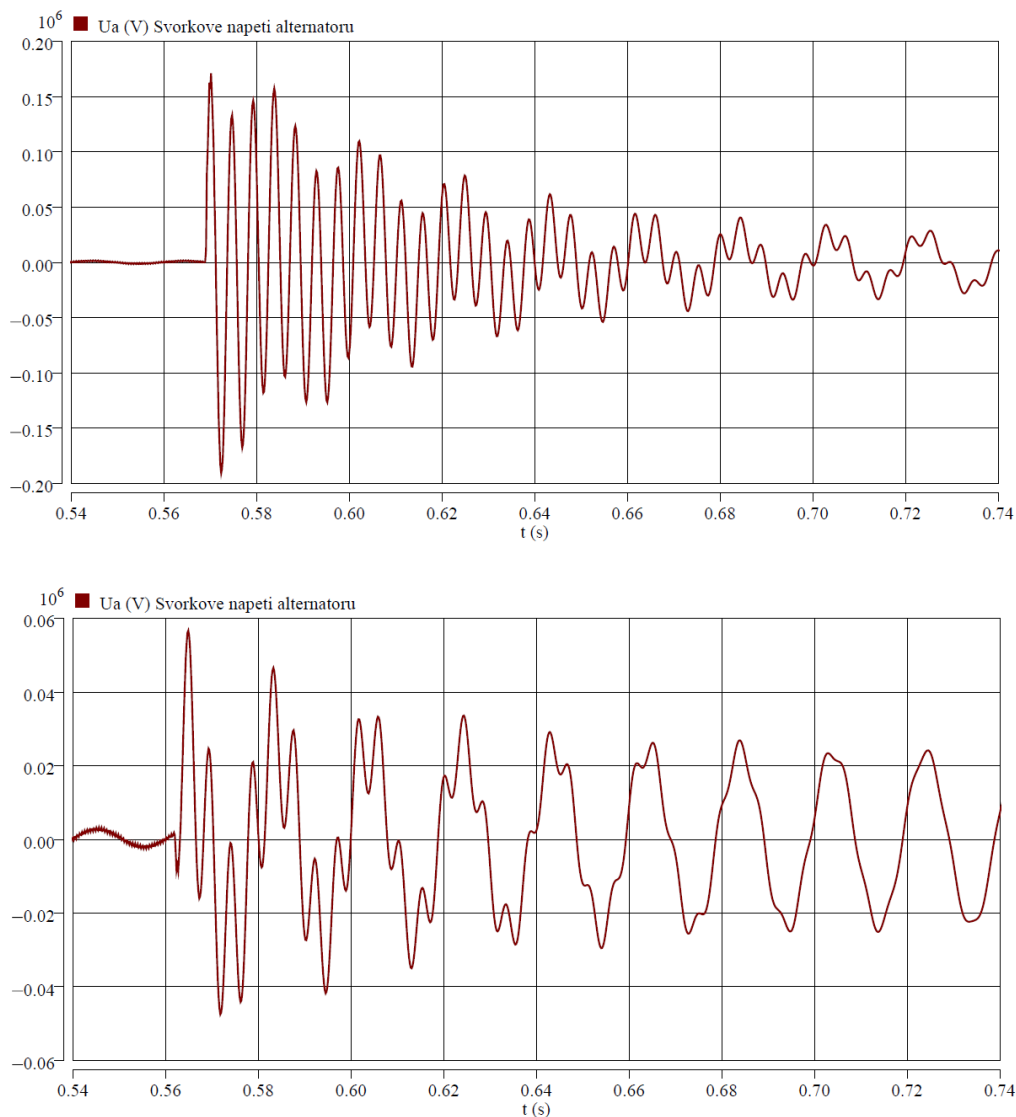


Obrázek 46: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu s vypínačem na straně 6 kV bez RC členu

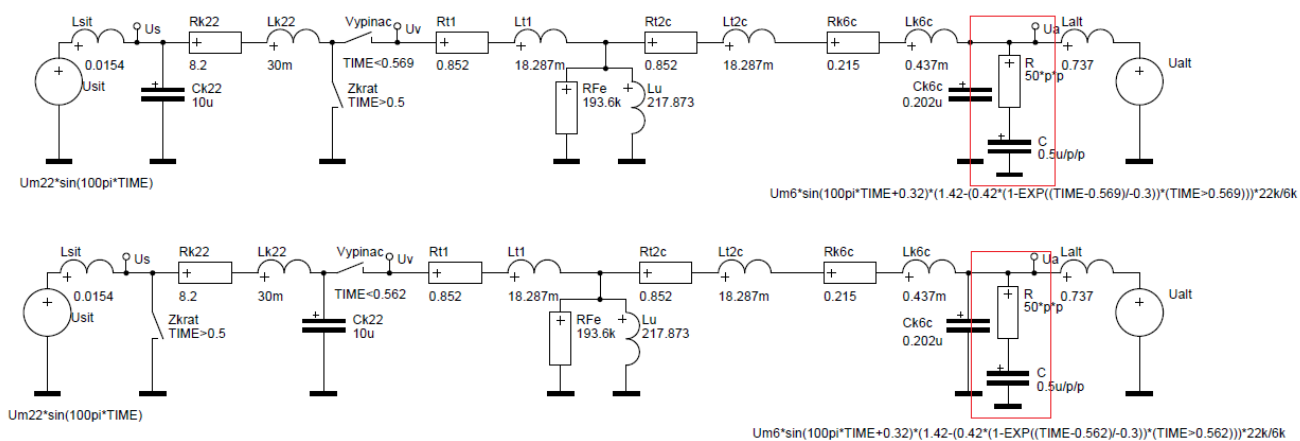
### 3.3.4.1 Připojení RC členu

Následující situace by měly být podobné jako při využití RC článku pro provozní stavy popisované v kapitole 3.3.3.1. Opět by mělo platit, že budou omezeny jak oscilace, tak samotná napěťová špička.

Pro vypínač na hladině 22 kV opět platí, že nejvíce snižuje přepětí RC člen 6 zapojený na hladině 22 kV těsně u transformátoru. Jak pro odepínání v proudovém maximu, tak i v proudové nule každý z členů snižuje velikost přepětí i oscilace. Napěťová špička u vypínání při proudovém maximu dosahuje 191 kV a při proudové nule 57 kV.

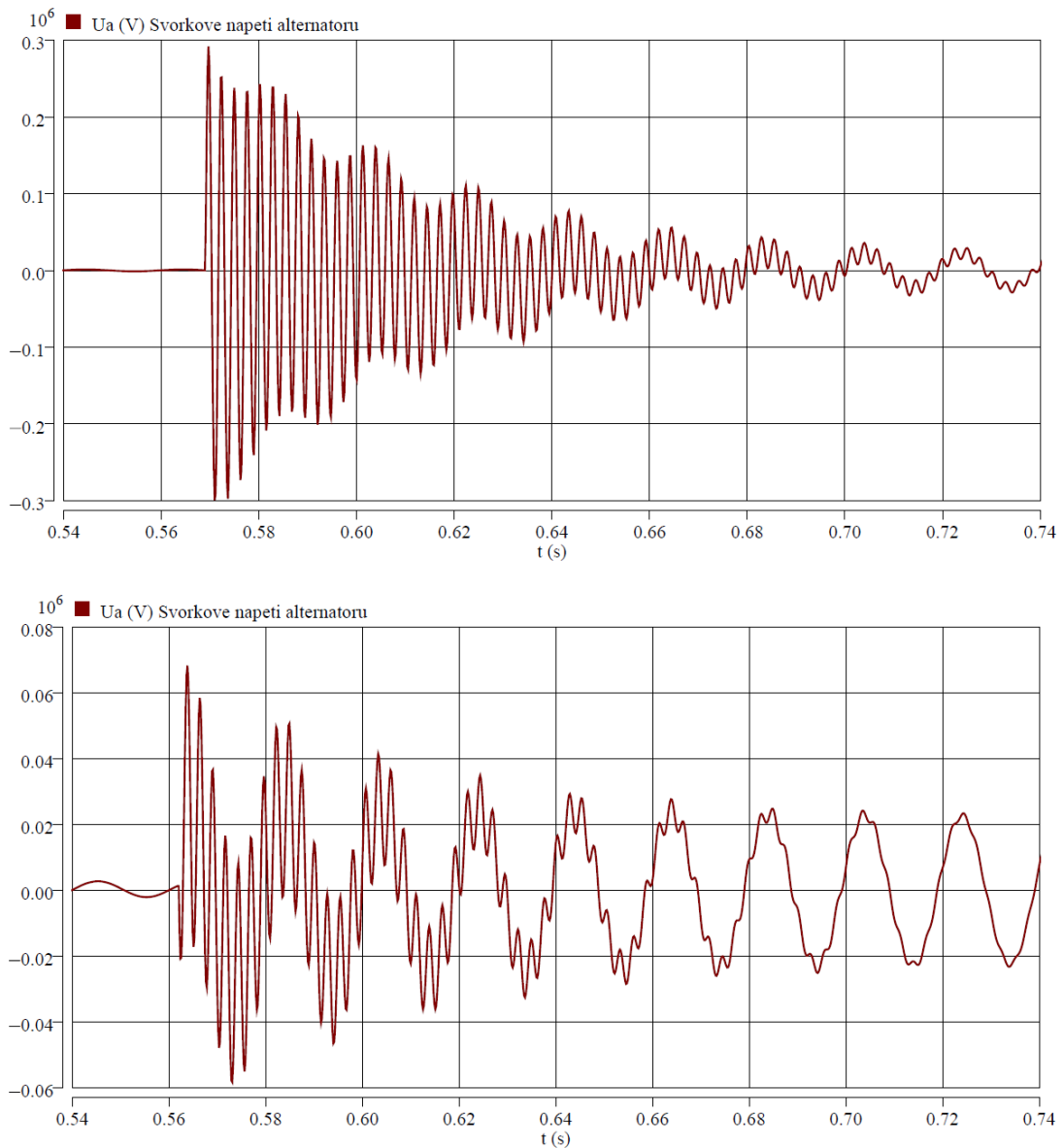


Obrázek 47: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu (nahore) a v proudové nule (dole) s vypínačem a RC členem 6 na straně 22 kV



Obrázek 48: Náhradní elektrická schémata v programu DYNAST při odepínání zkratu v proudovém maximu (nahore) a v proudové nule (dole) s vypínačem na hladině 22 kV s RC členem 6 na hladině 6 kV

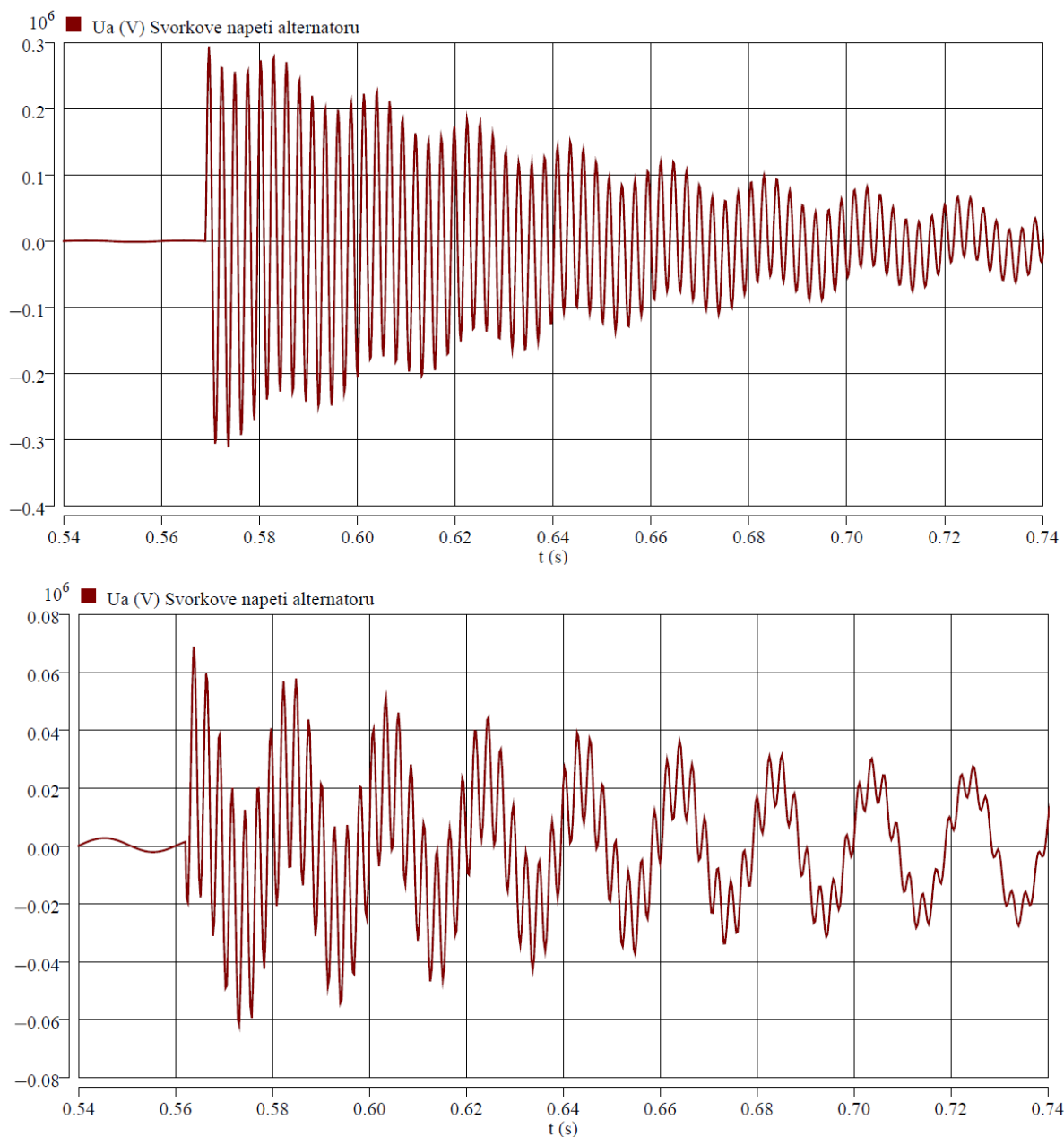
Člen 6 je znovu jedinou volbou, pokud jej využijeme na hladině 6 kV pro vypínač na hladině 22 kV. Pro vypnutí zkratu v proudové nule tento člen omezí napětí na 68,5 kV a rychleji tlumí oscilace. Podobně i pro druhý případ v proudovém maximu je napětí sníženo na 299 kV a oscilace ustalují dříve o několik desetín sekundy. Znovu tedy platí, že výhodnější je využít RC člunek na hladině 22 kV, pokud je vypínač umístěn na 22 kV.



Obrázek 49: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu (nahore) a v proudové nule (dole) s vypínačem na straně 22 kV s RC členem 6 na hladině 6 kV

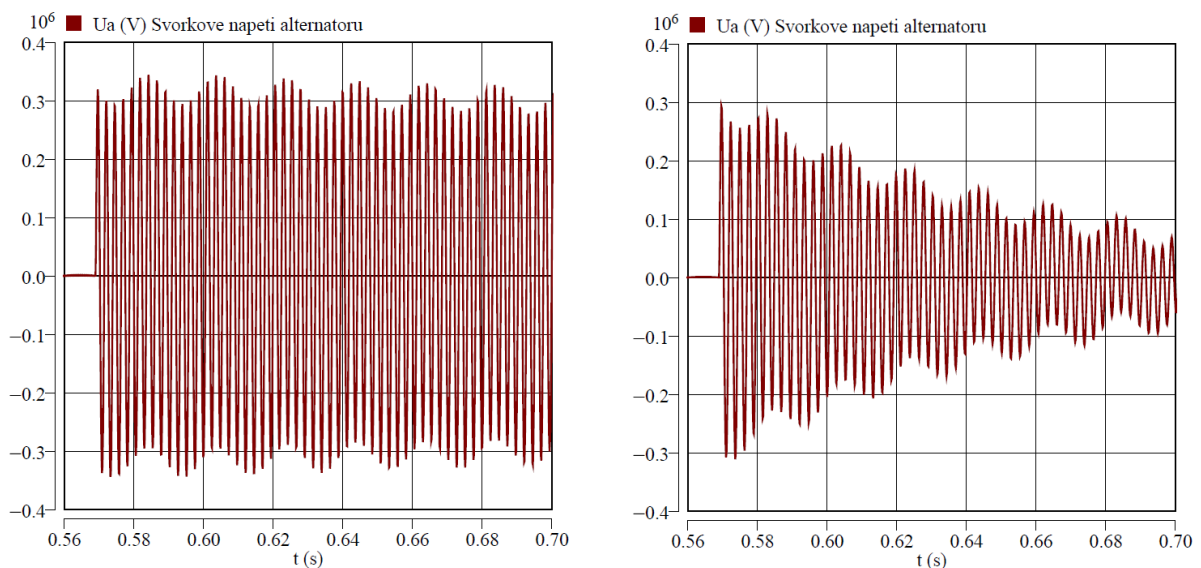
Pro vypínač a RC článek na hladině 6 kV platí stejné závěry jako u odpojení od sítě při provozním zatížení. Při vypnutí v proudové nule i maximu se výrazně rychleji tlumí oscilace, z několika sekund na pár desetiny sekundy až sekundu. Také napěťové špičky jsou sníženy. Opět platí, že nejvýhodnějším je RC člen 6 umístěný na hladině 6 kV. Využití RC článku na hladině 22 kV není vhodné, na velikost přepětí a oscilace nemá vliv.





Obrázek 50: Graf napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu (nahore) a v proudové nule (dole) s vypínačem a RC členem 6 na straně 6 kV

V proudovém maximu byla napěťová špička snížena na 311 kV a pro situaci pro vypnutí v proudové nule dojde ke snížení na 69 kV. I ostatní RC články jsou schopny výrazně snížit dobu oscilací i velikost napětí, ale ne tolik jako člen 6.



Obrázek 51: Detail grafů napětí alternátoru při odepínání zkratu v proudovém maximu vypínačem na 22 kV bez RC členu (vlevo) a s RC členem 6 (vpravo)

Opět jako v minulých případech, i pro odepínání při zkratu bylo vytvořeno náhradní schéma se zdroji nahrazujícími magnetický obvod transformátoru. Výsledky se shodují, viz Příloha F.

### 3.4 Vyhodnocení výsledků

Základním výsledkem těchto simulací je fakt, že RC členy jsou schopné výrazně omezit přepětí i vysokofrekvenční oscilace. Při správném umístění v náhradním schématu je zde možnost snížit napětí až o desítky kV a stejně tak utlumit oscilace o více jak polovinu času dříve. Ukazuje se také, že RC členy jsou schopny omezovat napětí okamžitě, není zde nutnost zapalovacího napětí, jako je například u starších ochran.

Další důležitý poznatek je ten, že slabší (tedy i levnější) RC články jsou pro případ provozu malé vodní elektrárny nevhodné. Členy s kapacitou rovnou 0,125  $\mu\text{F}$  a 0,25  $\mu\text{F}$  nemají dostatečný výkon, aby dokázaly dostatečně rychle omezit vzniklé přepětí. Tyto články nižších řad jsou vhodné pro jiné aplikace, například pro ochranu průmyslových motorů výkonů do stovek kW. Pouze články s nejvyšší uvažovanou katalogovou kapacitou  $C=0,5 \mu\text{F}$  jsou schopny správně omezovat.

Pokud bychom uvažovali situaci, kdy jsme ochotni vložit do RC článků větší finanční obnos, doporučil bych využít možnosti instalace ještě silnějšího, a tedy i dražšího RC

článku, například speciální člen s kapacitou rovnou 1  $\mu\text{F}$ . Článek s takto velkou kapacitou je schopen výrazně omezit i velká přepětí a pro uvažovaný případ, kde se výkon pohybuje okolo jedné megawatty, by mohl být vhodný. Možná by také mohl být výhodnější, než spojení slabšího RC článku se svodičem přepětí. V *Příloze H* je naznačen ještě jeden graf, který porovnává průběhy napětí bez RC členu s uvažovaným členem 6 a ještě s RC článkem s parametry  $R=50\ \Omega$  a  $C=1\ \mu\text{F}$ . V grafu je uvažována situace odepínání od sítě při provozním zatížení s vypínačem na hladině 6 kV.

Simulace dále odhalily, že při odepínání vypínače na hladině 22 kV, ať při provozu nebo při zkratu, je výhodnější umístit RC člen také na 22 kV. Jednak více omezí přepětí, ale také rychleji utlumí oscilace. Kromě toho chrání transformátor před jinými přechodovými stavy ze sítě. Například při uvažovaném „nejhorším“ zkratu byl RC člen schopen omezit přepětí o více jak 100 kV. Nejúčinnějším je člen 6 s parametry  $R=50\ \Omega$  a  $C=0,5\ \mu\text{F}$ .

Pro schémata odepínání s vypínačem na hladině 6 kV je vhodná pouze varianta s RC článkem na hladině 6 kV. Největší problém schémat s vypínačem na 6 kV byly několikasekundové oscilace, jež dokáže RC člen výrazně zkrátit. Například pro zkrat trvaly oscilace více jak 1,5 s, zatímco s RC členem 6 byly oscilace sníženy na 0,25 s. Dále také omezí i velikost přepětí, i když zde jsou vidět určité nedostatky, které by dle mého názoru dokázal vynahradit silnější RC člen zmíněný výše.

Závěrem by bylo také vhodné zmínit, že v práci se řešily tři hlavní spínací jevy: připínání k síti, odepínání od sítě při provozu a odepínání od sítě, když na hladině 22 kV vznikne zkrat. Postupovalo se tedy od zdánlivě přepět'ově nejslabší po nejhorší situaci. Tyto předpoklady se naplnily, připínání nenabuzeného alternátoru není příliš výrazný jev, projeví se pouze „malým“ přepětím. Podobně i při odepínání se předpoklady potvrdily, kdy přechodové jevy s odepínáním spojené dosahovaly několikanásobku jmenovitého napětí alternátoru. A jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, potvrdil se i poslední předpoklad. Vhodně zvolené a umístěné RC články jsou schopny omezovat spínací přepětí a oscilace.

## **Závěr**

Tato diplomová práce byla zaměřena na možnosti omezení spínacích přepětí pomocí RC článků. Tato práce měla dvě části, teoretickou, kde se rozebíraly různé druhy přepětí, a praktickou, ve které byla snaha simulačním výpočtem ověřit možnost praktického omezení spínacího přepětí u malé vodní elektrárny pomocí RC členu.

V první části byla zmíněna jednotlivá přepětí, kde a při jakých příležitostech či jevech se s nimi můžeme setkat. Krátce popsáno bylo například atmosférické přepětí, přepětí vznikající při vypínání malých induktivních proudů nebo rezonanční přepětí. V této kapitole byly hojně využity obrázky grafů, například i z praktického měření společnosti ČEZ. Dále byly popsány různé ochrany proti přepětí, ať už jednoduchá ochranná jiskřiště, nebo modernější svodiče přepětí a RC články.

Další kapitola se zabývala simulací omezení spínacích přepětí pomocí RC členu. Byl vytvořen model náhradního schématu malé vodní elektrárny s vyvedením výkonu na hladinu 22 kV. Tento model byl pro různé spínací operace simulován v programu DYNAST, z něhož byly následně odečteny výsledky bez a s instalovaným RC členem. Tyto výsledky byly následně porovnány.

Ze simulací vyplývá, že RC články jsou schopné omezit spínací přepětí a případné vysokofrekvenční oscilace s nimi spojené. Při vhodně zvolené velikosti RC článku a jeho správném umístění v obvodu lze očekávat výrazné snížení přepětí i oscilací. Například člen s parametry  $R=50 \Omega$  a  $C=0,5 \mu\text{F}$  je schopen snížit přepětí o desítky kV a taktéž minimálně v řádech desetin sekund omezit vysokofrekvenční oscilace. Také ale platí, že RC články z nižších kapacitních řad ( $0,125 \mu\text{F}$  a  $0,25 \mu\text{F}$ ) nejsou pro tuto aplikaci vhodné. Jejich výkon není pro ochranu MVE dostatečný.

Je vhodné zmínit, že při využití vypínače na hladině 22 kV dosahuje nejlepších výsledků umístění RC členu taktéž na hladinu 22 kV. Podobně při využití vypínače na hladině 6 kV je výhodnější umístit RC článek těsně k alternátoru na hladinu 6 kV.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí : vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty* / [online]. 2., přepra. B.m.: Státní nakladatelství technické literatury, 1978 [vid. 2017-10-08]. Řada elektrotechnické literatury. Dostupné z: <https://vufind.mzk.cz/Record/MZK01-000762117>
- [2] BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí : systémová řešení ochran* [online]. B.m.: FCC Public, 2006 [vid. 2017-10-08]. ISBN 8086534103. Dostupné z: <https://www.alescenek.cz/zbozi/74460/blesk-a-prepeti-systemova-reseni-ochran/>
- [3] LAURENC, Jiří. *Poznámky k předmětu technika vysokého napětí*. Plzeň: ZČU, 1999.
- [4] TOMAN, P., J. DRÁPELA, S. MIŠÁK, J. ORSÁGOVÁ, M. PAAR, D. TOPOLÁNEK, J. BOK, J. NOVOTNÝ a J. ŠKODA. *Provoz distribučních soustav* [online]. Praha: ČVUT, 2011 [vid. 2017-11-27]. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: [k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf)
- [5] Interní materiály firmy ČEZ. nedatováno.
- [6] PROCHÁZKA, Radek. *Elektrické přechodné děje* [online]. Praha: ČVUT. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/EN1Podklady>
- [7] WEIFENG, Xin, Zhang GUOGANG, Wang JIANQIANG, Liu KAI a Geng YINGSAN. Simulation of very fast transient overvoltage caused by disconnecter switch operation in SF6 Gas insulated switchgear using multi-restrike arcing model. In: *2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)* [online]. B.m.: IEEE, 2013, s. 1–4 [vid. 2017-11-27]. ISBN 978-1-4799-3817-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPE-ST.2013.6804370
- [8] NOVAK, Pavel, Mario HAIM, Peter BEER a Uwe KALTENBORN. Switching of small inductive currents using vacuum circuit-breakers [online]. 2011, **21**, 6–9 [vid. 2017-11-27]. Dostupné z: [http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011\\_0488\\_final.pdf](http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_0488_final.pdf)
- [9] HASMAN, Tomáš. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01699-4.
- [10] TESAŘOVÁ, Miloslava, Milada. ŠTROBLOVÁ a ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA. ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA. *Průmyslová elektroenergetika*. B.m.: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070827033.
- [11] PROCHÁZKA, Radek. *Ferorezonance* [online]. Praha: ČVUT. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/wiki/TVNPodklady>
- [12] HORÁK, Jiří. Opatření proti nárůstu poruchovosti PTN VN vlivem ferorezonance. In: [online]. B.m.: ČEZ, 2016. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file-other/distribucni-sluzby/konference-2016/12\\_cds.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file-other/distribucni-sluzby/konference-2016/12_cds.pdf)

- [13] MÜLLER, Vladislav. *Rozdělení přístrojů: Funkční stavy kontaktů spínacích přístrojů. Rozdělení přístrojů: - PDF* [online]. [vid. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5298239-Rozdeleni-pristroju-funkcni-stavy-kontaktu-spincich-pristroju-rozdeleni-pristroju.html>
- [14] *LUMAPLUS hromosvody a přepětová ochrana - Přepětová ochrana* [online]. [vid. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.lumaplus.cz/index.php?polozka=prepeti>
- [15] *Přepětí a svodiče přepětí* [online]. nedatováno [vid. 2017-11-27]. Dostupné z: [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/esp/prepeti\\_svodice\\_prepeti.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/prepeti_svodice_prepeti.pdf)
- [16] ČENES. *Ochrana distribučních sítí nn, vn a 110 kV před přepětím*. In: [online]. 2010. Dostupné z: [www.csvts.cz/cenes/prezentace/prepeti/sbornik.doc](http://www.csvts.cz/cenes/prezentace/prepeti/sbornik.doc)
- [17] *Spolehlivost omezovačů přepětí. ELEKTRO* [online]. 2009, **5** [vid. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39027.pdf>
- [18] IBRAYEV, Nurlan a Aigerim UYZBAYEVA. *Application of nonlinear surge arrestors for lightning protection of overhead power lines and modeling of overvoltage in dead-end substation*. In: *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* [online]. B.m.: IEEE, 2013, s. 1156–1161 [vid. 2018-03-10]. ISBN 978-1-4673-6392-1. Dostupné z: doi:10.1109/PowerEng.2013.6635774
- [19] HE, Jinliang. *Deeply suppressing switching overvoltage of 1000kV ac ultra-high voltage system (invited)*. In: *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application* [online]. B.m.: IEEE, 2010, s. 65–68 [vid. 2018-03-10]. ISBN 978-1-4244-8283-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICHVE.2010.5640863
- [20] *Over-voltage suppression with RC-filter networks in multiple drives for long cable drives applications*. In: *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering* [online]. B.m.: IEEE, 2014, s. 1662–1667 [vid. 2018-03-28]. ISBN 978-1-4799-3197-2. Dostupné z: doi:10.1109/InfoSEEE.2014.6946204
- [21] PENKOV, D., C. VOLLET, B. DE METZ-NOBLAT a R. NIKODEM. *Overvoltage protection study on vacuum breaker switched MV motors*. In: *2008 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 1–7 [vid. 2018-03-28]. ISBN 978-3-9523333-1-0. Dostupné z: doi:10.1109/PCICEUROPE.2008.4563537
- [22] SANTOS, M. E., M. I. C. SANTOS a V. C. ONOFRI. *Performance analysis of the RC clampers in switching off no load arc furnace transformers*. In: *IEEE PES T&D 2010* [online]. B.m.: IEEE, 2010, s. 1–6 [vid. 2018-03-28]. ISBN 978-1-4244-6546-0. Dostupné z: doi:10.1109/TDC.2010.5484290
- [23] DIONISE, Thomas a Steven JOHNSTON. *Surge Protection for Ladle Melt Furnaces: LMF Transformer Terminals were Equipped with Primary Surge Protection Consisting of Surge Arresters and RC Snubbers*. *IEEE Industry Applications Magazine* [online]. 2015, **21**(5), 43–52 [vid. 2018-03-29]. ISSN 1077-2618. Dostupné z: doi:10.1109/MIAS.2014.2345823

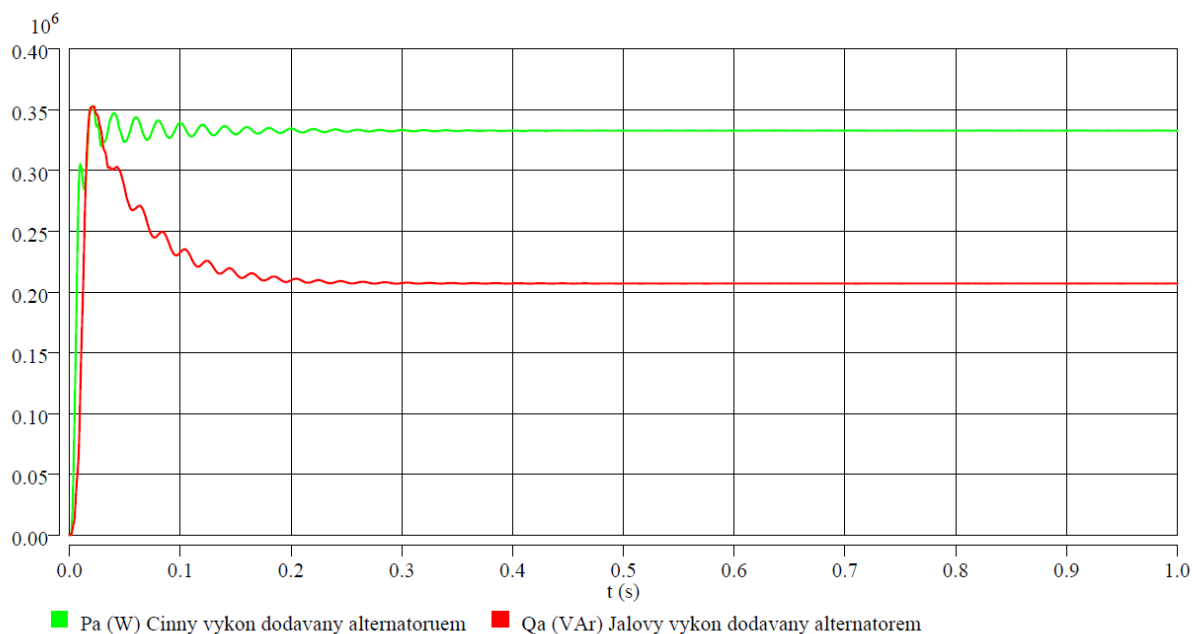
- [24] BABAEI, Mehdi a A. ABU-SIADA. Preventing transformer internal resonance under very fast transient overvoltage using RC surge suppressor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2017, **24**(2), 1263–1272 [vid. 2018-03-29]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2017.006422
- [25] ZOU, Lin, Zhihui HUANG, Song WANG, Ruihai LI a Jiyan ZOU. Simulation on the overvoltage of 500 kV fault current limiter based on fault current capture technology. In: *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)* [online]. B.m.: IEEE, 2017, s. 505–508 [vid. 2018-03-29]. ISBN 978-1-5386-1651-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPE-ST.2017.8188895
- [26] NOHÁČ, Karel a Jan MÜHLBACHER. *Výzkumné zprávy - omezení přepětí pomocí RC členu*. nedatováno.
- [27] *Výrobky a služby firmy ABB* [online]. Dostupné z: <http://new.abb.com/cz/vyrobky-a-sluzby>

## Přílohy

### Příloha A – Tabulka s parametry využitými pro výpočet náhradního schématu

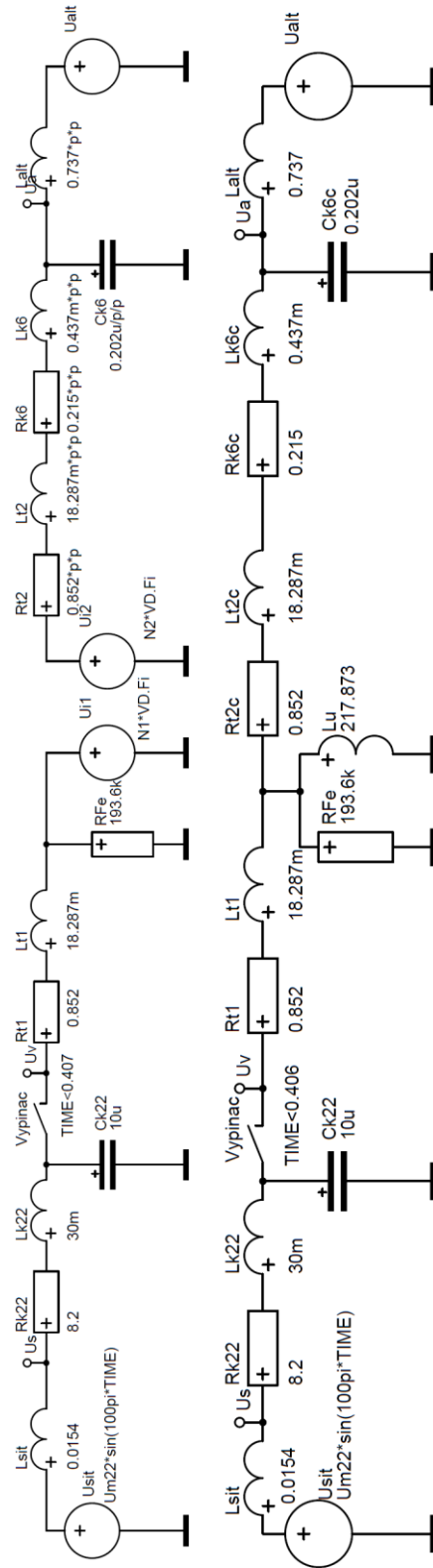
Alternátor MVE Pardubice	
Zdánlivý výkon	$S_n=2300$ kVA
Provozní napětí	$U_n=6$ kV
Účinnost	$\cos \varphi=0,85$
Poměrná reaktance	$x_d=1,1$
Transformátor DOTUL 2500/20	
Zdánlivý výkon	$S_n=2500$ kVA
Primární/sekundární napětí	$U_{n1}=22/U_{n2}=6$ kV
Napětí nakrátko	$u_k=6$ %
Proud naprázdno	$i_0=0,3$ %
Ztráty nakrátko	$\Delta P_k=0,88$ %
Ztráty naprázdno	$\Delta P_0=0,1$ %
Kabel NA2SX(FL) 6/10 kV (výrobce NKT)	
Jádro/izolace	Hliník/Zesítený polyetylen
Odpor na kilometr	$R_{k6}=0,32$ $\Omega$ /km
Kapacita na kilometr	$C_{k6}=0,3$ $\mu$ F/km
Indukčnost na kilometr	$L_{k6}=0,65$ mH/km
Kabel NA2SX(FL) 18/30 kV (výrobce NKT)	
Jádro/izolace	Hliník/Zesítený polyetylen
Odpor na kilometr	$R_{k22}=0,164$ $\Omega$ /km
Kapacita na kilometr	$C_{k22}=0,2$ $\mu$ F/km
Indukčnost na kilometr	$L_{k22}=0,6$ mH/km

### Příloha B – Činný a jalový výkon v ustáleném stavu zobrazený pomocí programu DYNAST





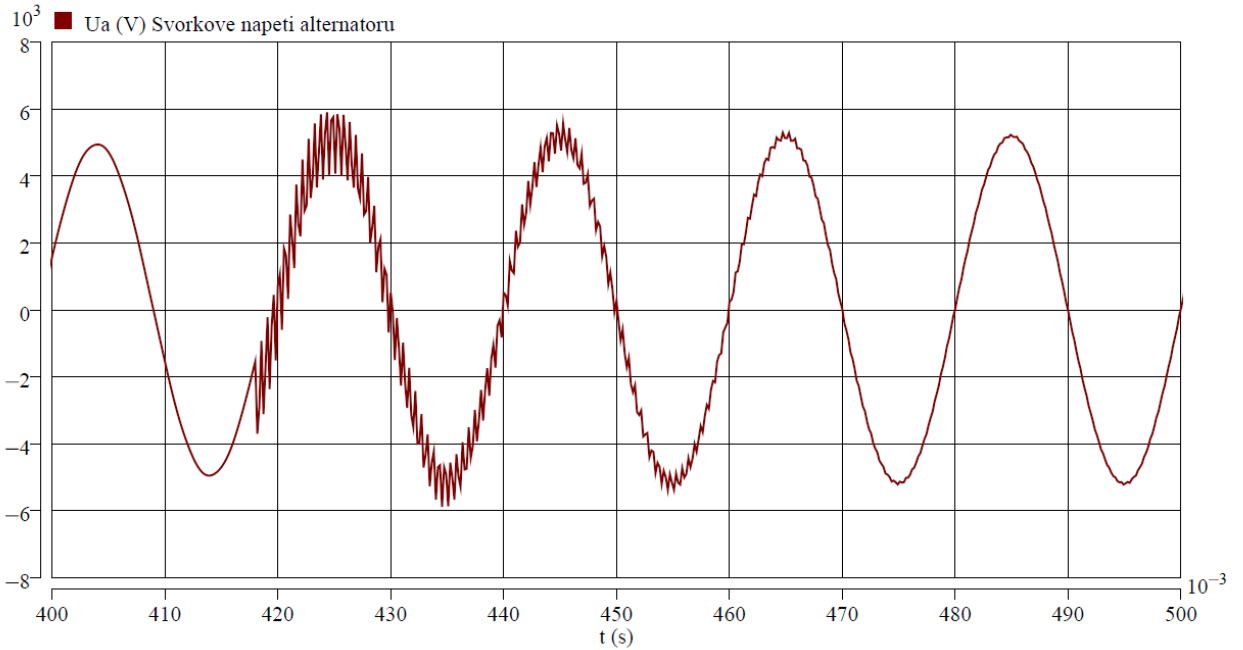
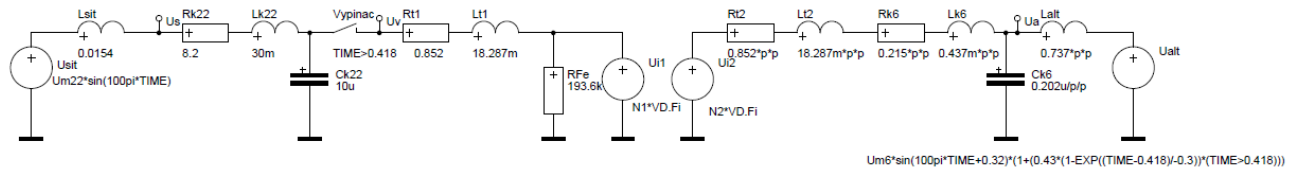
**Příloha C – Základní schémata vytvořená v programu DYNAST**



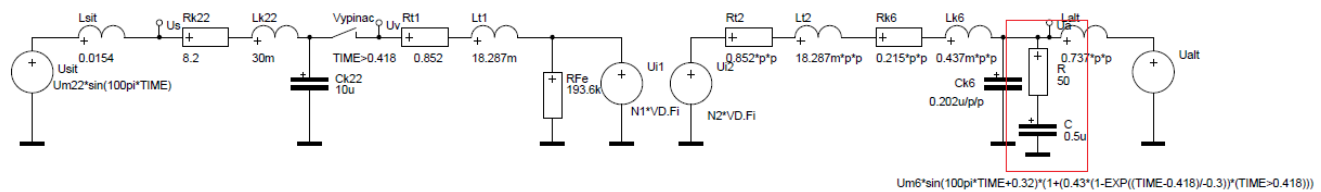
$U_{m6} \cdot \sin(100\pi \cdot TIME + 0.32) \cdot (1.42 - 0.42 \cdot (1 - \exp((TIME - 0.406) / -0.3))) \cdot 22k/6k$

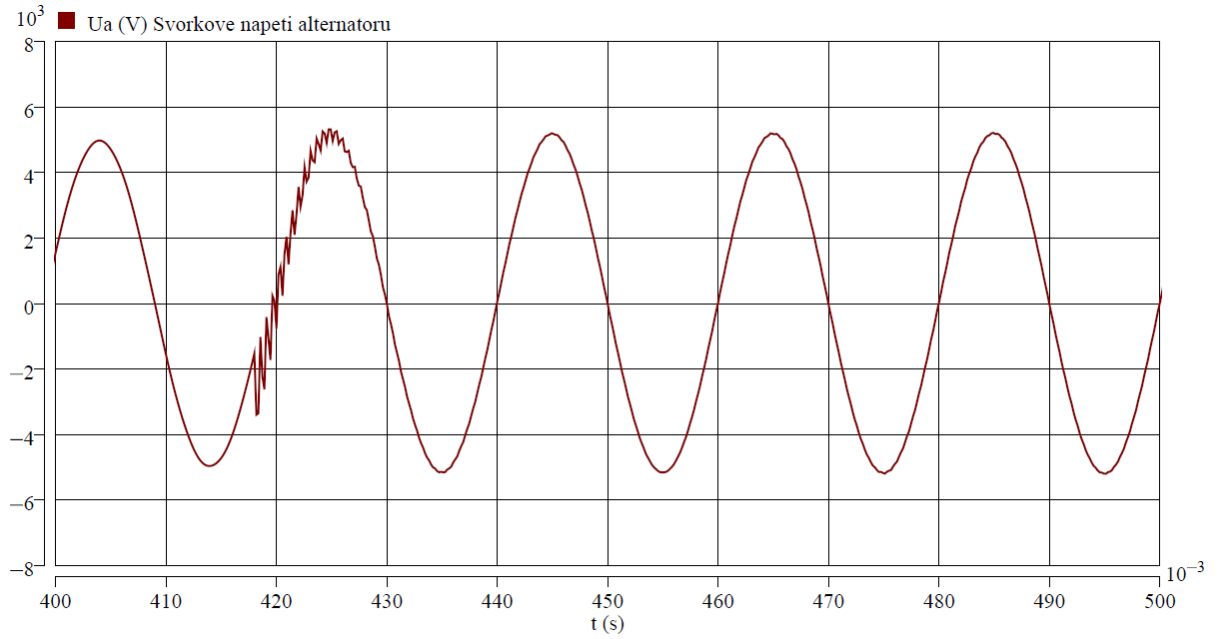
## Příloha D – Připnutí alternátoru k síti pomocí náhradního obvodu s transformátorem nahrazeným zdroji napětí

Připínání s vypínačem na hladině 22 kV:

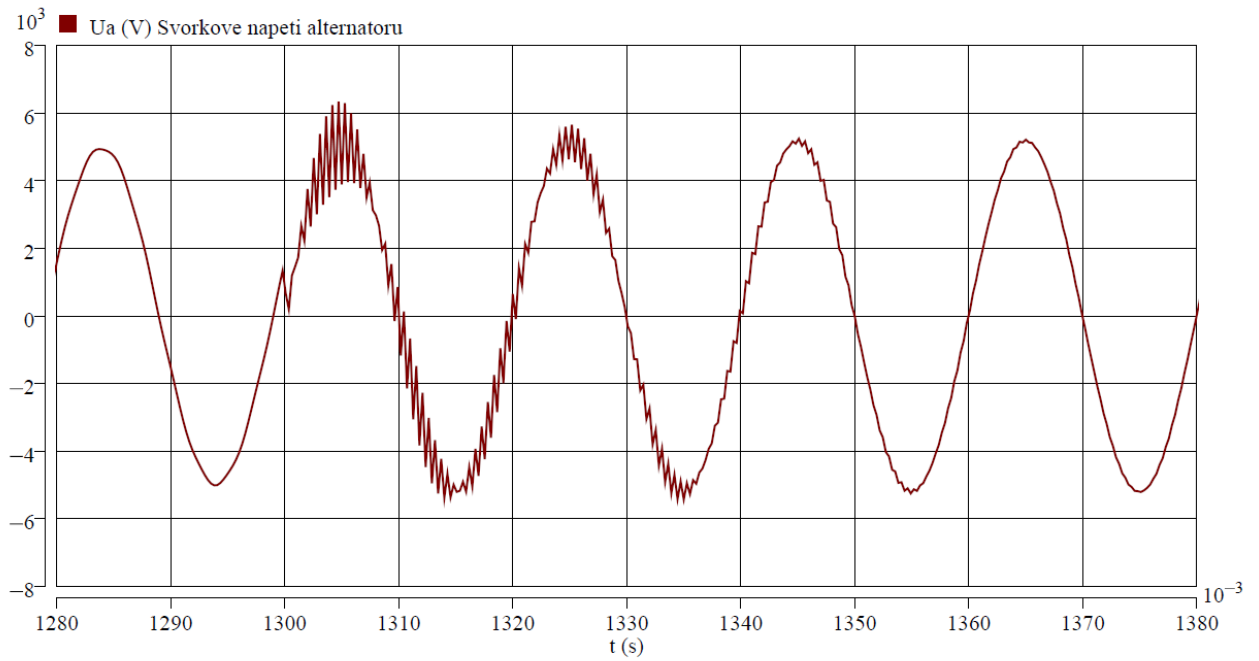
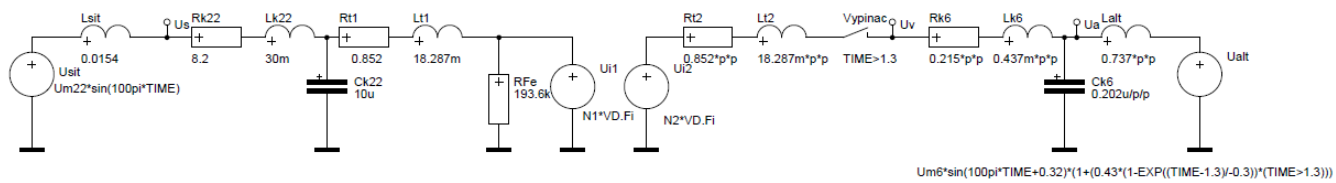


Připínání s vypínačem na hladině 22 kV a s RC členem 6 na 6 kV:

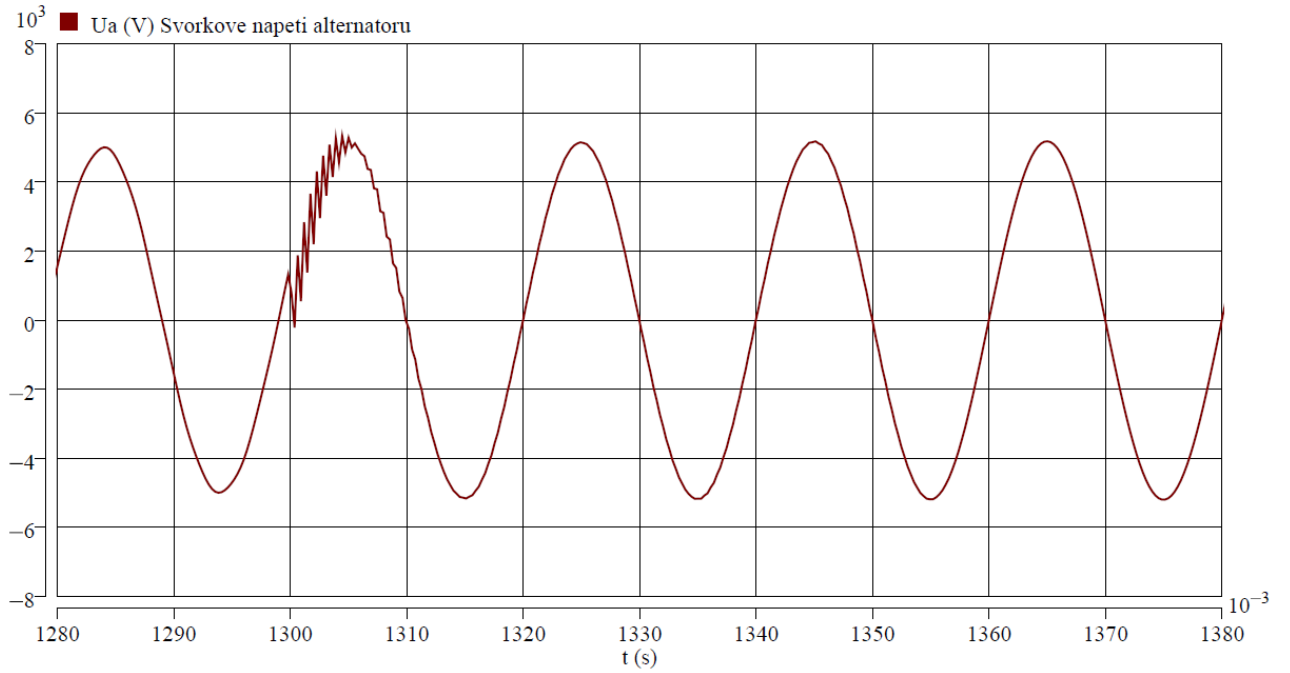
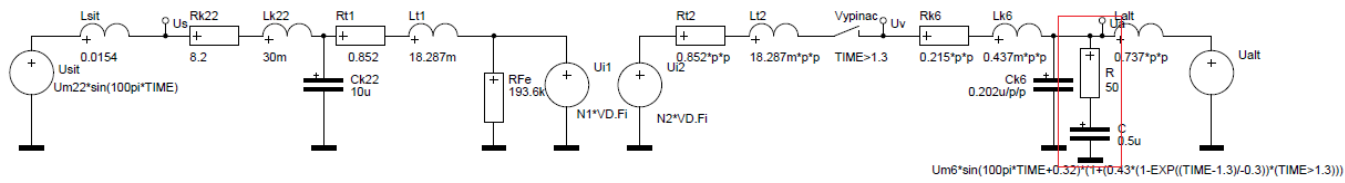




Připínání s vypínačem na hladině 6 kV:

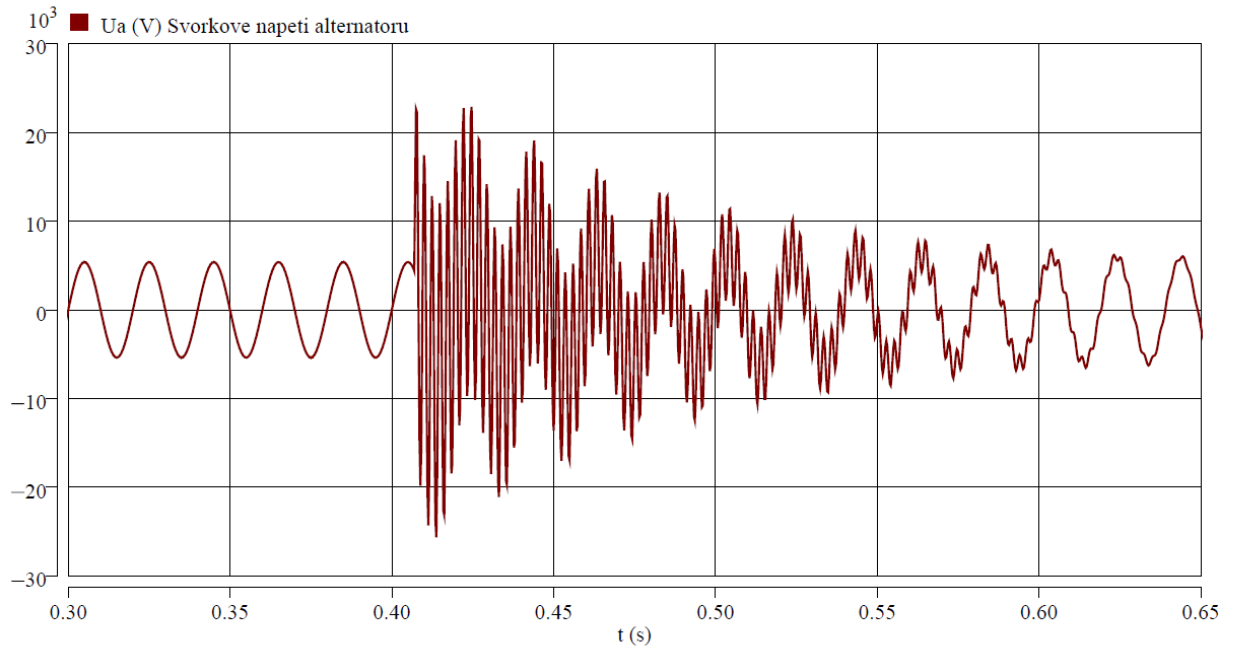
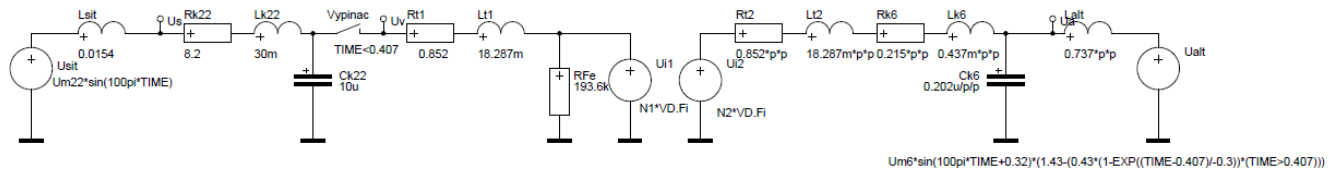


Připínání s vypínačem na hladině 6 kV a s RC členem 6 na 6 kV:

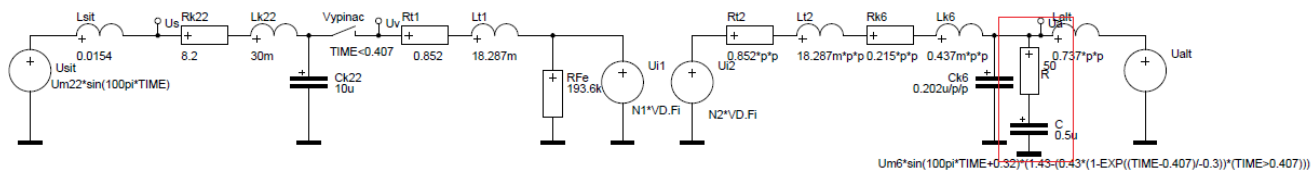


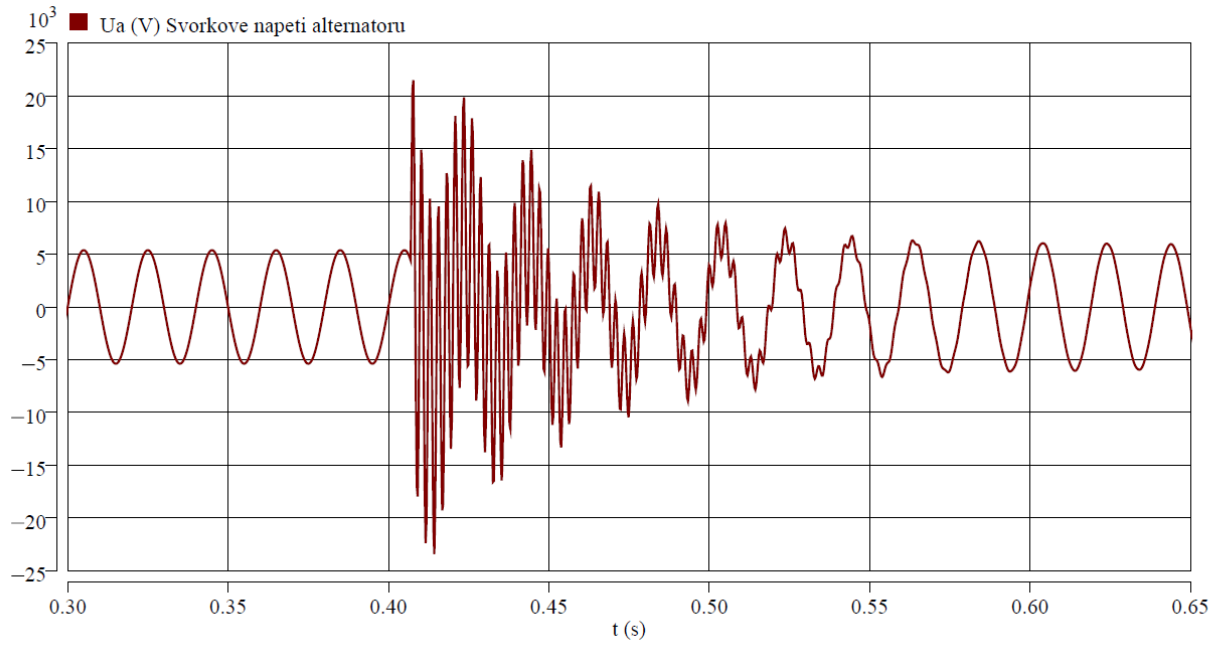
## Příloha E – Odepnutí alternátoru od sítě při provozu pomocí náhradního obvodu s transformátorem nahrazeným zdroji napětí

Odepínání při provozu s vypínačem na hladině 22 kV:

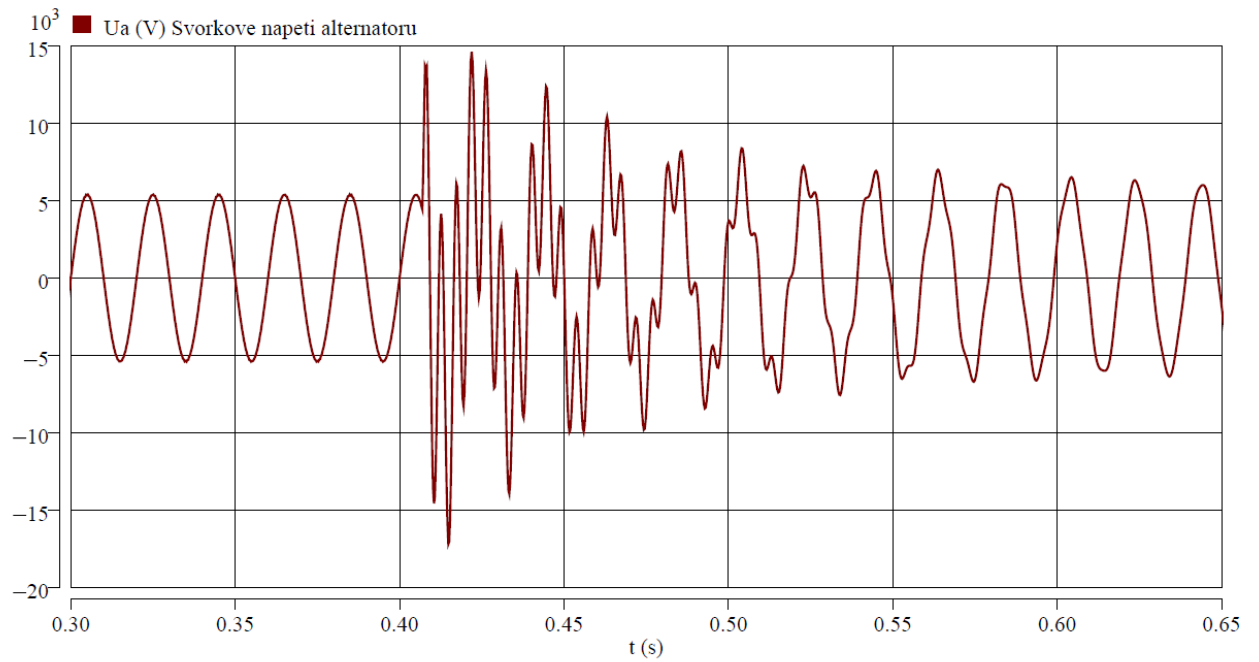
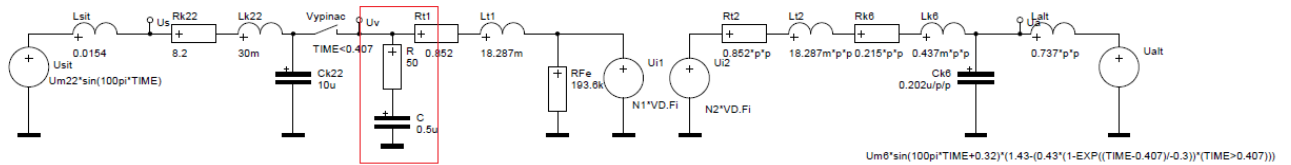


Odepínání při provozu s vypínačem na hladině 22 kV a s RC členem 6 na 6 kV:

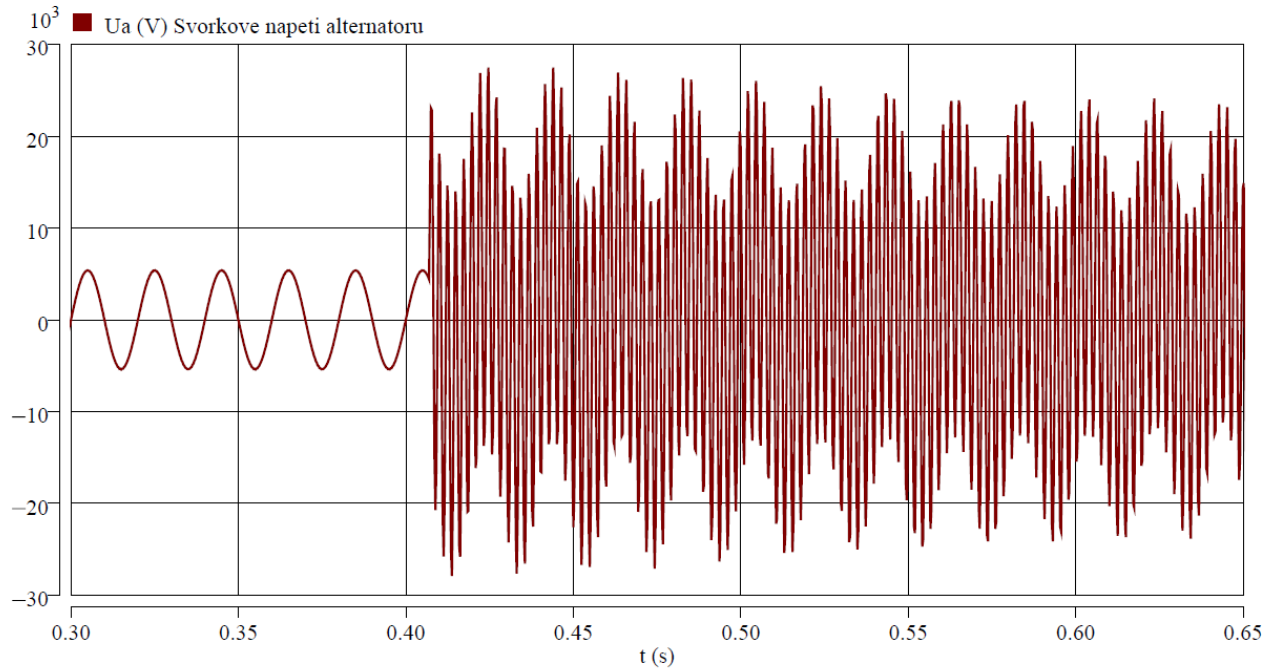
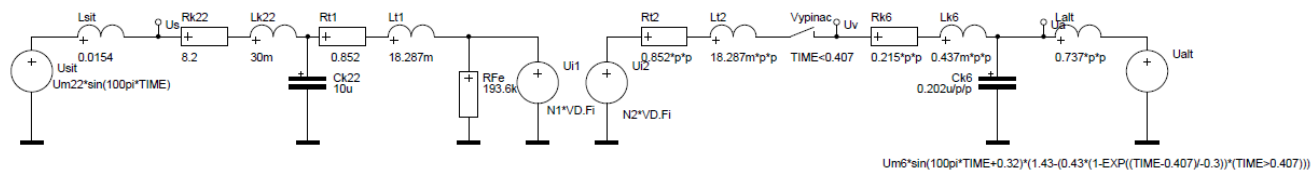




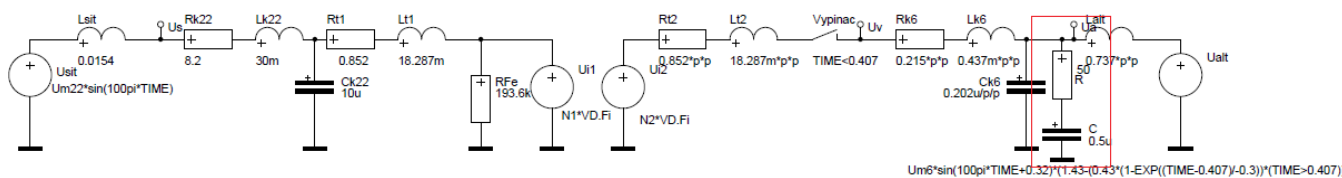
Odepínání při provozu s vypínačem na hladině 22 kV a s RC členem 6 na 22 kV:

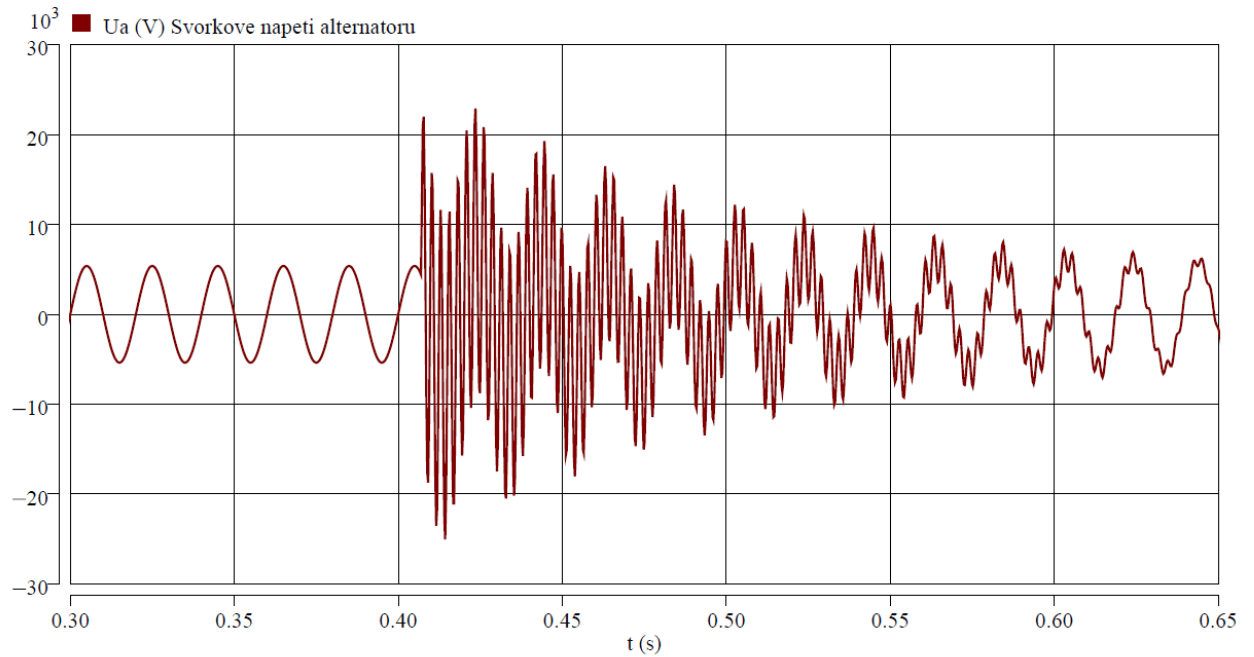


Odepínání při provozu s vypínačem na hladině 6 kV:



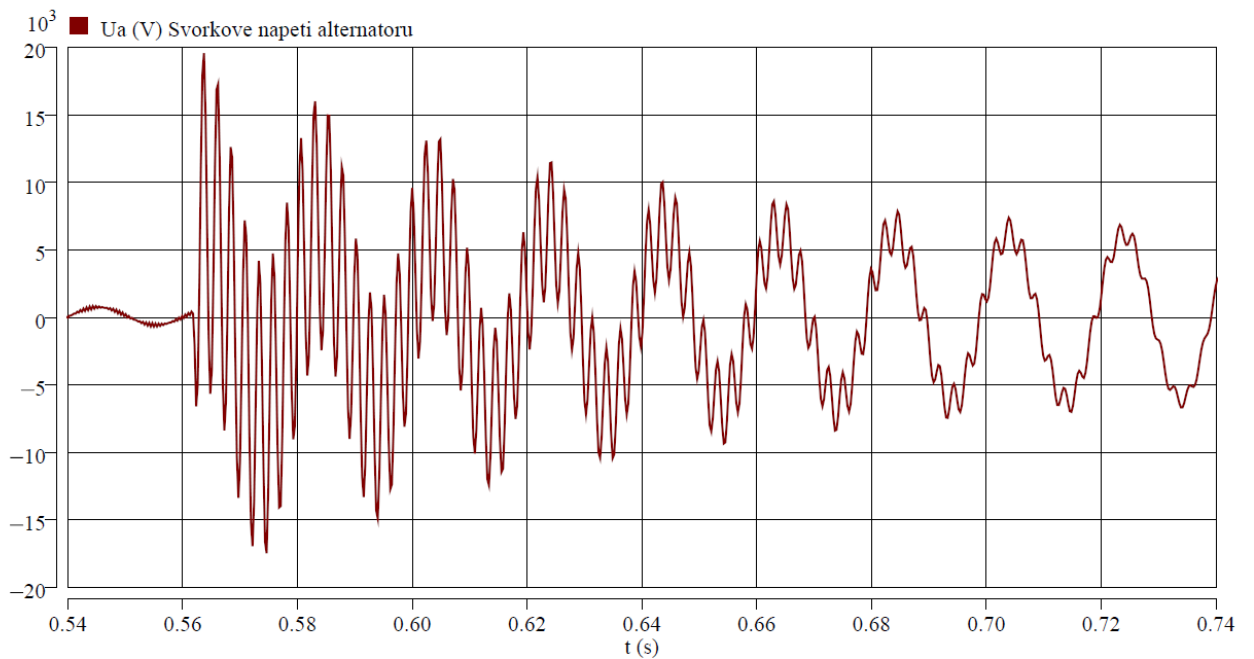
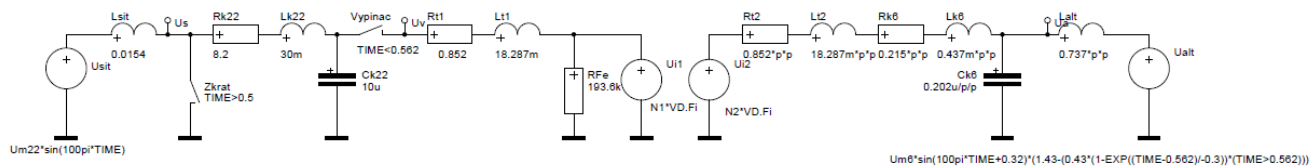
Odepínání při provozu s vypínačem a RC členem 6 na hladině 6 kV:





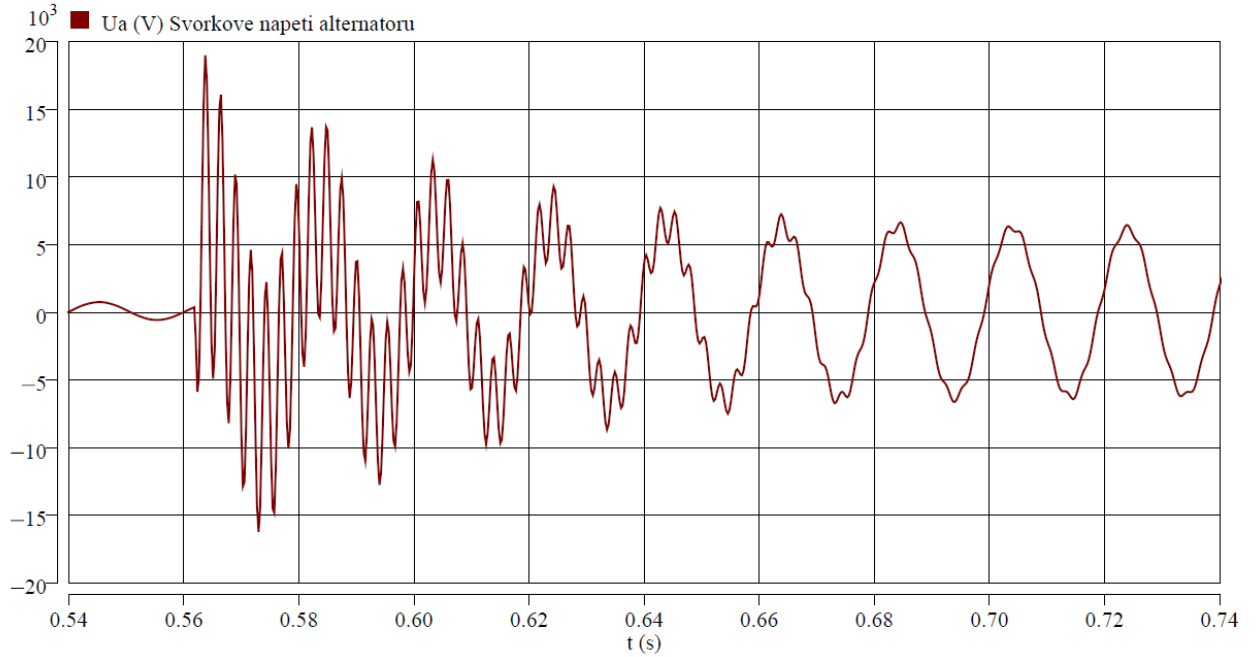
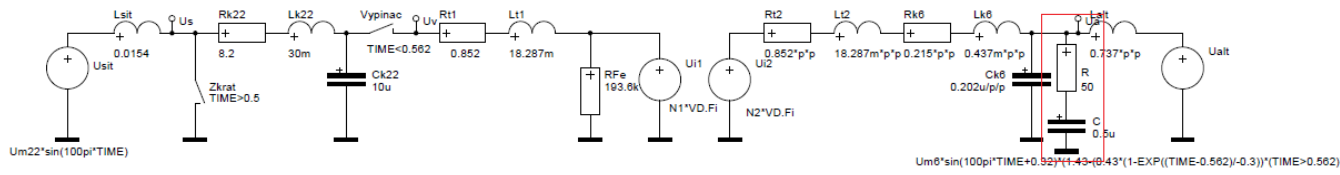
**Příloha F – Odepnutí alternátoru od sítě při zkratu pomocí náhradního obvodu s transformátorem nahrazeným zdroji napětí**

Zkrat v proudové nule s vypínačem na hladině 22 kV:

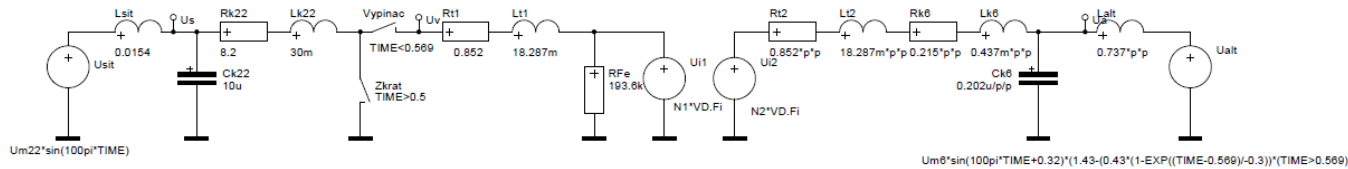


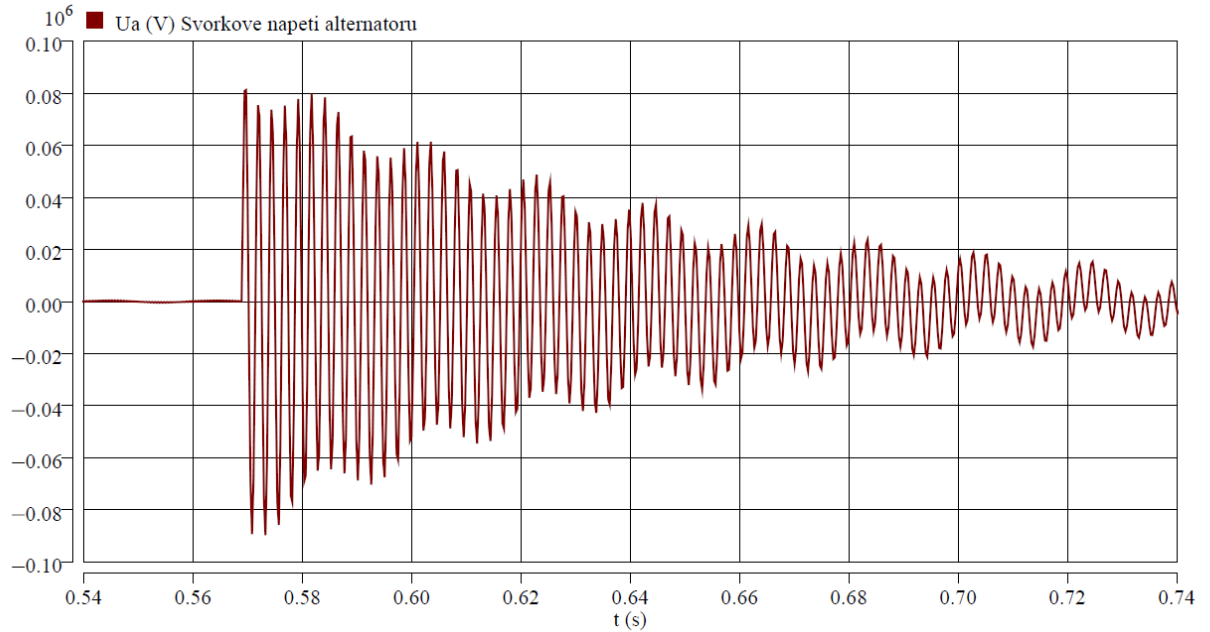


Zkrat v proudové nule s vypínačem na hladině 22 kV a RC členem 6 na hladině 6 kV:

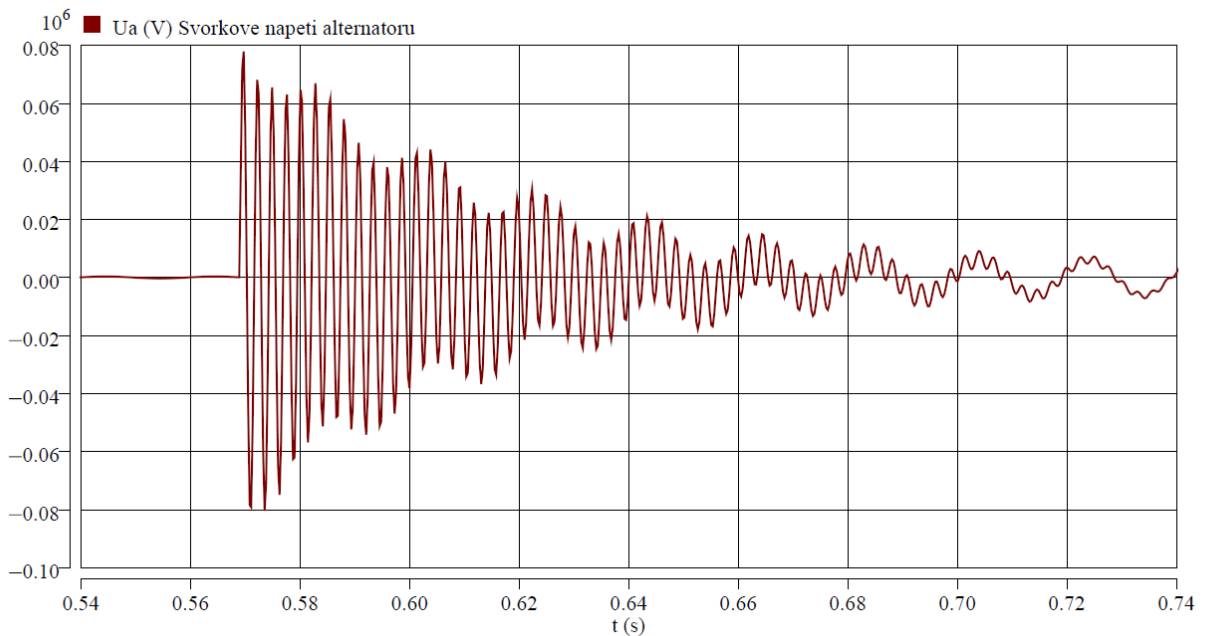
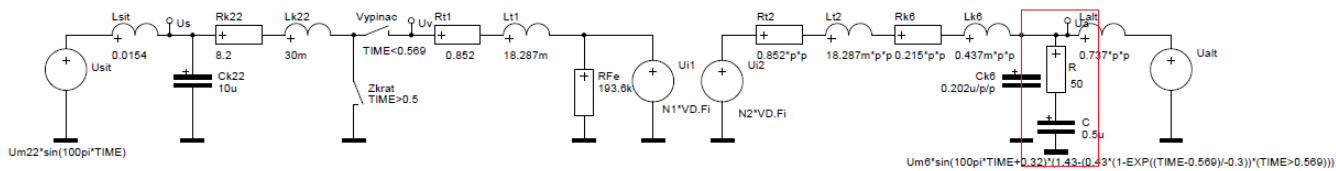


Zkrat v proudovém maximu s vypínačem na hladině 22 kV:

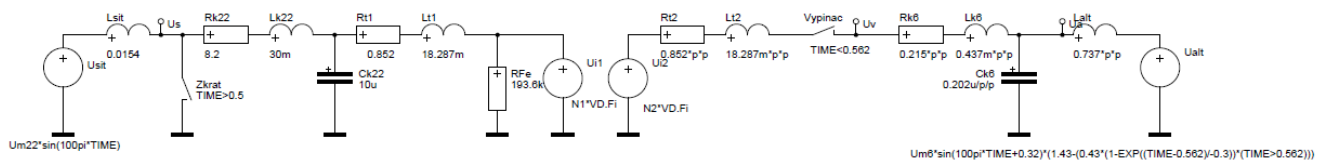


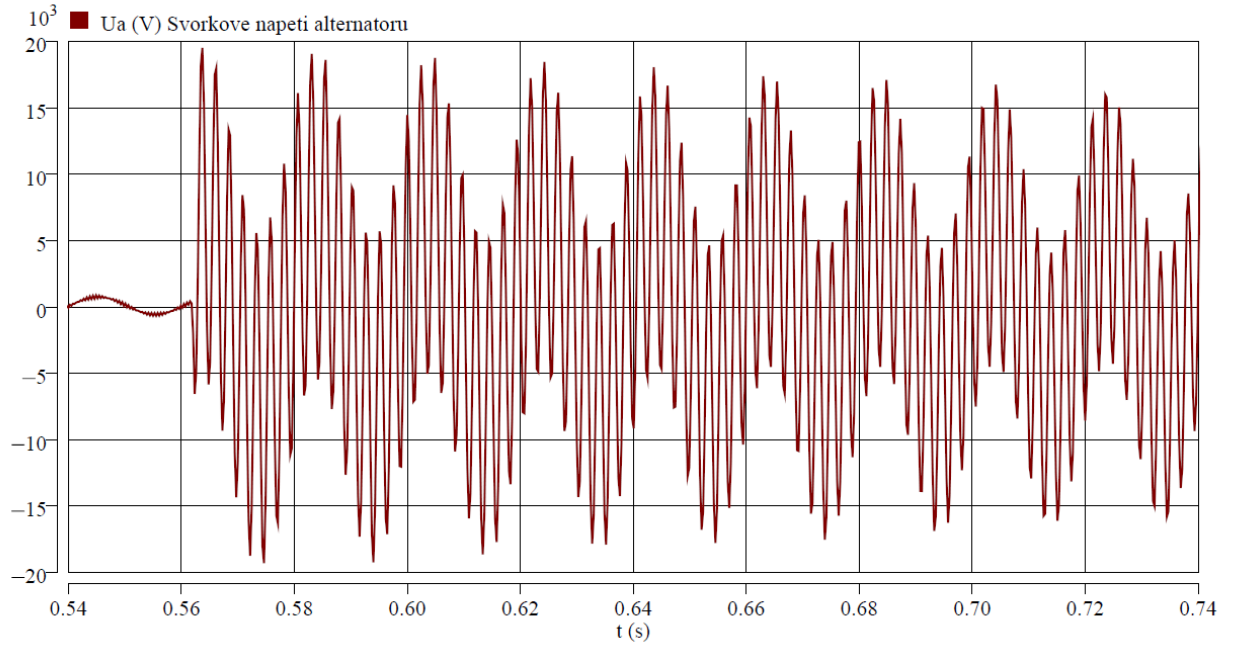


Zkrat v proudovém maximum s vypínačem na hladině 22 kV a RC členem 6 na 6 kV:

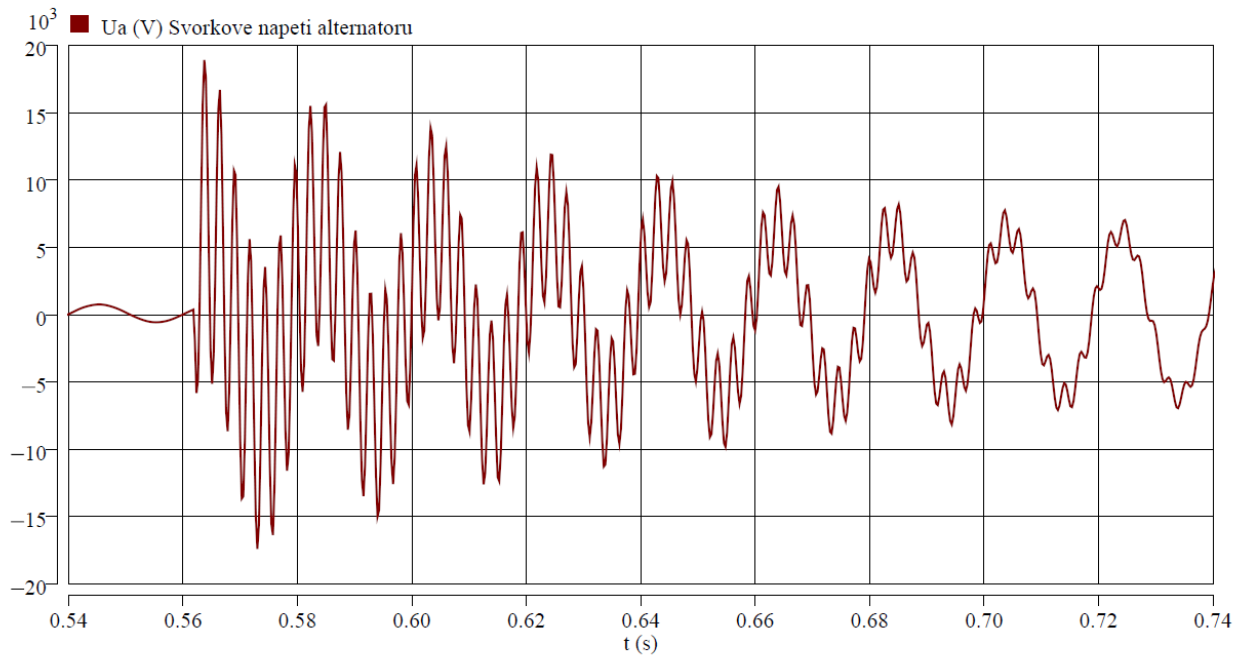
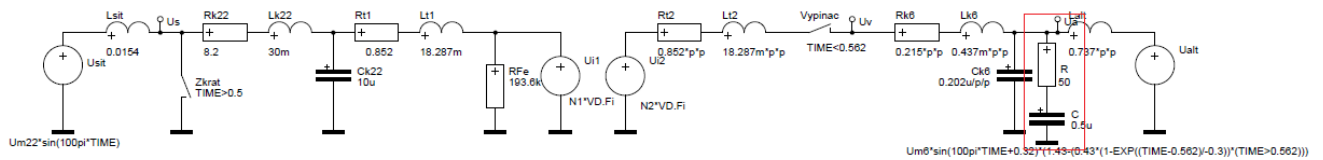


Zkrat v proudové nule s vypínačem na hladině 6 kV:

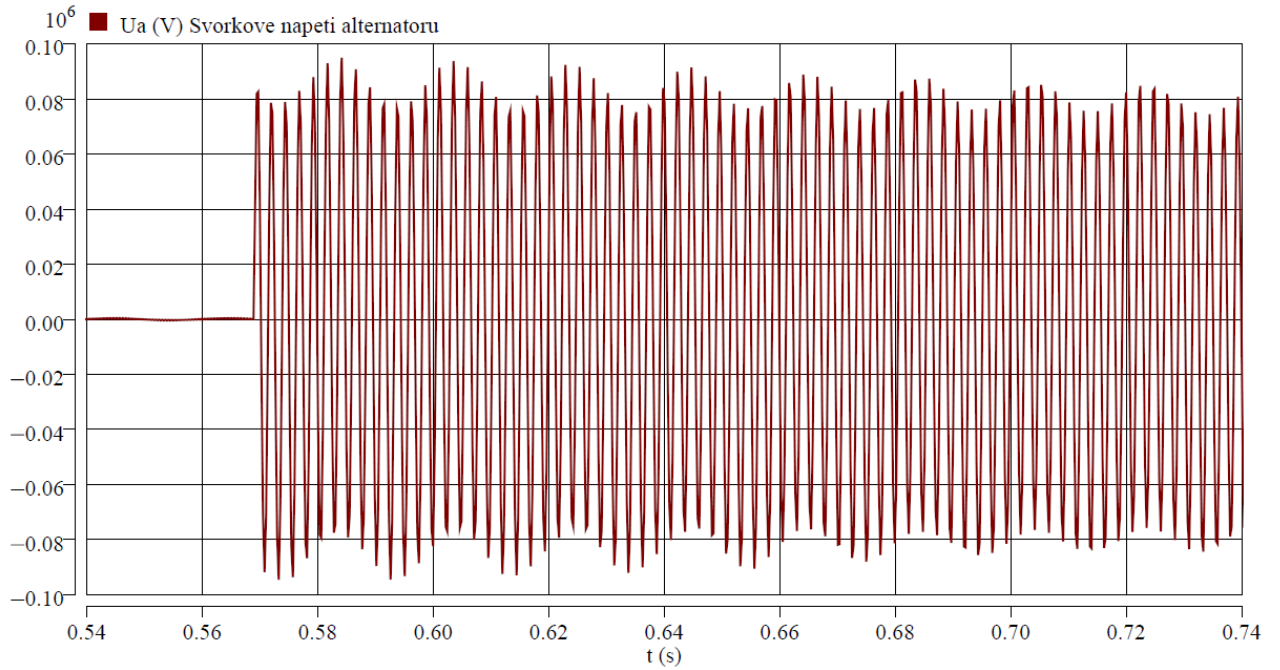
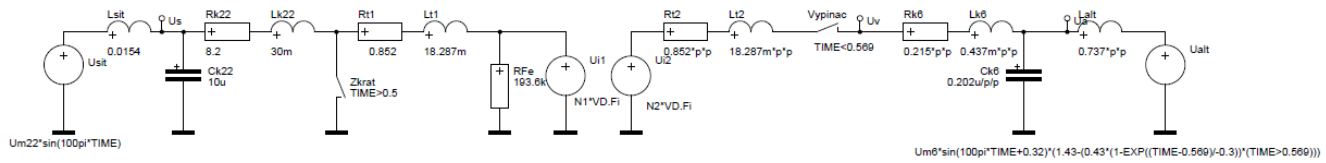




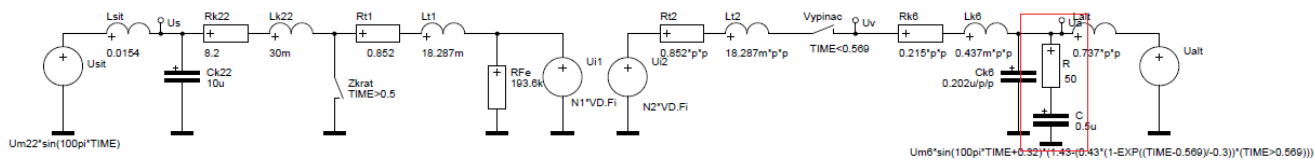
Zkrat v proudové nule s vypínačem a RC členem 6 na hladině 6 kV:

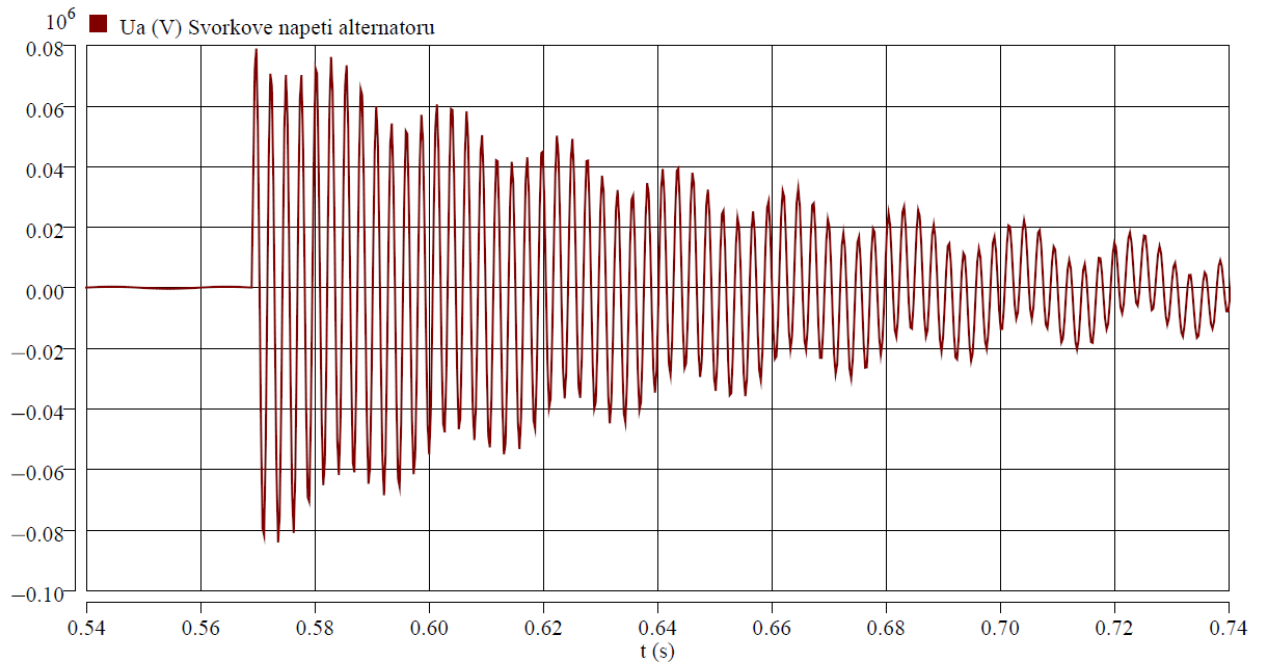


Zkrat v proudovém maximum s vypínačem na hladině 6 kV:



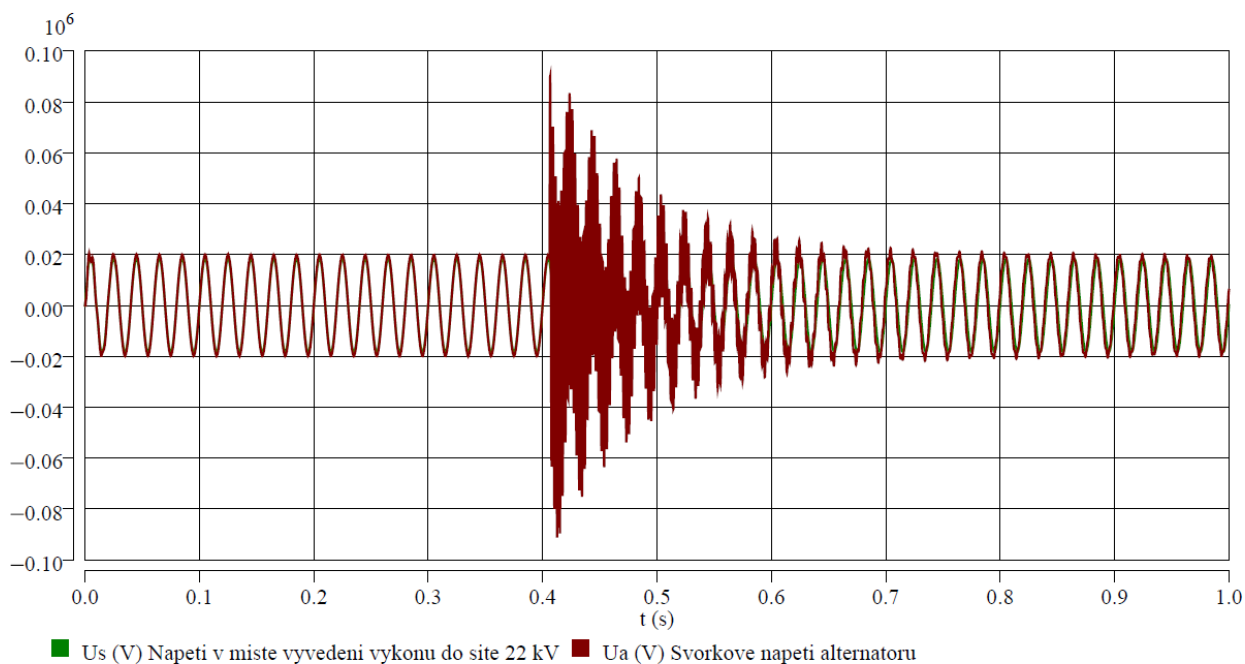
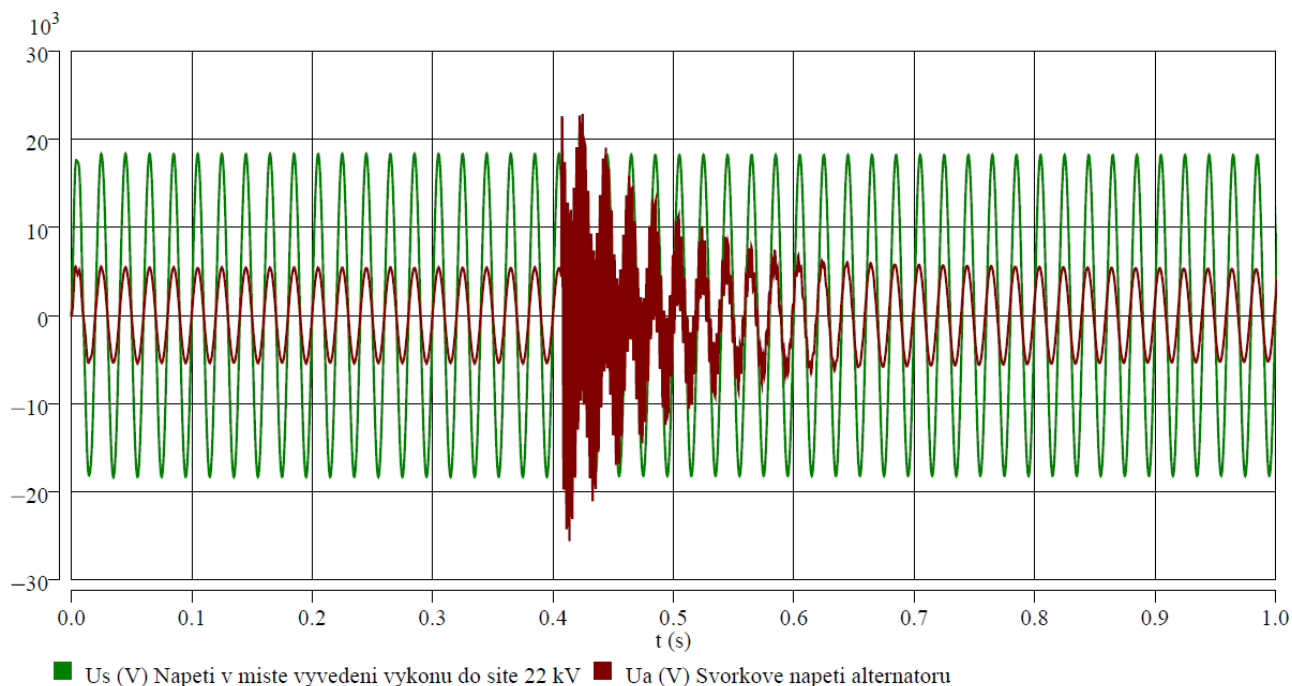
Zkrat v proudovém maximum s vypínačem a RC členem na hladině 6 kV:



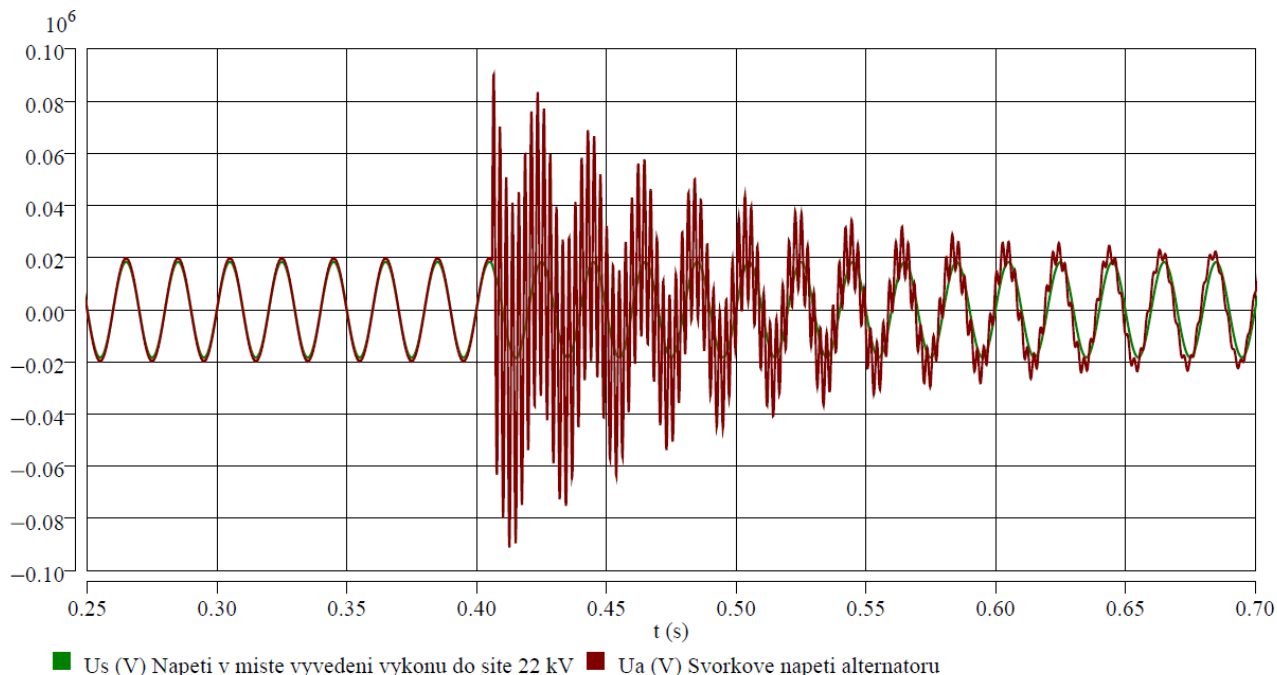
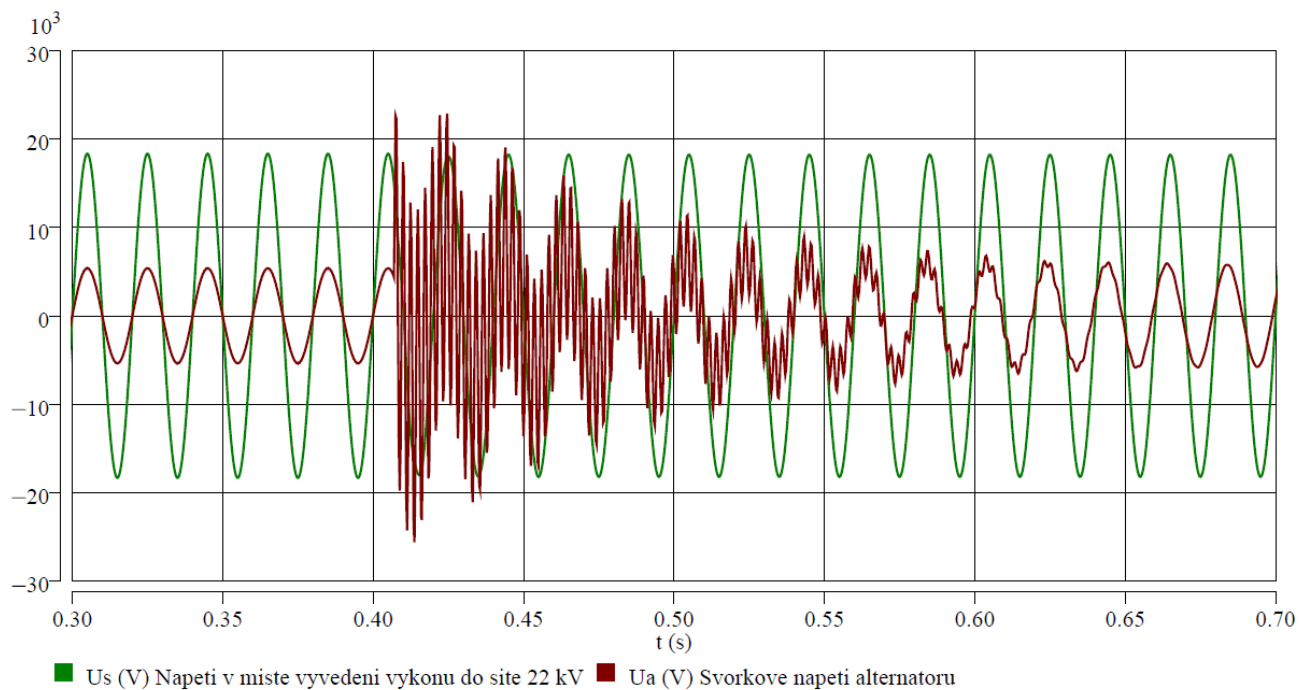


## Příloha G – Porovnání celých průběhů a detailů náhradního obvodu s transformátorem nahrazeným zdroji napětí a obyčejného obvodu

Je zde vidět základní rozdíl mezi jednotlivými typy schémat. Nahoře je graf vytvořený pomocí schématu se zdroji napětí místo transformátoru, dole je graf vytvořený pomocí obyčejného schématu v programu DYNAST. Tyto grafy jsou pro situaci odepínání při provozu s vypínačem na hladině 22 kV. Trendem poklesu i špičkami napětí si tyto grafy odpovídají, podobně jako grafy ostatních situací.



Níže je uveden detail téže situace, opět je horní graf vytvořený pomocí schématu se zdroji napětí místo transformátoru, dolní je graf vytvořený pomocí obyčejného schématu v programu DYNAST.



Hlavní rozdíl je patrný na první pohled: Zatímco u obyčejného schématu se všechny veličiny a parametry počítají na hladině 22 kV, pro schéma s náhradními zdroji jsou parametry počítány pro své reálné napěťové hladiny. Proto je napětí na alternátoru v tomto

případě na hladině 6 kV.

### Příloha H – Využití silnějšího RC členu

Jak lze vidět v porovnání níže, využití finančně více náročného RC členu  $R=50 \Omega$  a  $C=1 \mu\text{F}$  ještě více sníží přepětí a oscilace. Graf byl vytvořen pro situaci odepínání při provozu pro vypínač na hladině 6 kV. Vlevo je graf bez RC členu, uprostřed graf s RC členem 6 a vpravo je graf s nejsilnějším, speciálním členem.

