

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Spínání kompenzačních kondenzátorů**

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

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

Jméno a příjmení: **Tomáš VORÁČEK**  
Osobní číslo: **E13B0096P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Spínání kompenzačních kondenzátorů**  
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. Popište provedení a zapojení kondenzátorů používaných pro kompenzaci účinníku v sítích NN a VN.
2. Proveďte teoretický rozbor spínacích dějů při připínání kompenzačních stupňů.
3. Proveďte pro zvolený kompenzační rozváděč namodelování spínacích dějů a výsledky porovnejte s teoretickým rozbohem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. KORENC, V., HOLOUBEK, J. Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL Praha, 1999.
2. TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. Průmyslová elektroenergetika. ZČU v Plzni, 2000.
3. HÁLA, P., LACINA, B. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. Brno, Elektromanagement, 1994.
4. Kompenzace jalového výkonu sborník přednášek. Trutnov, Propag Team, 1997.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015  
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na spínací děje při připínání kompenzačních kondenzátorů a chráněných kompenzačních sekcí. Teoretická část popisuje základy kompenzace, technické prostředky používané ke kompenzaci, způsoby řízení a matematický popis spínacích dějů. V praktické části jsou namodelovány spínací děje s různými počátečními podmínkami pro konkrétní případ.

## **Klíčová slova**

Kompenzace jalového výkonu, účinník, kompenzační kondenzátor, ochranná tlumivka, kondenzátorový stykač, spínání, simulace

**Abstract**

The bachelor thesis is focused on switching processes during capacitor or protected switching capacitors for power factor correction and detuned capacitor banks. The theoretical part describes the basics of power factor correction, the technical devices used to compensate, control methods and mathematical description of switching processes. In the practical part there are modelled switching processes with different initial conditions.

**Key words**

Power factor correction, power factor, non-detuned and detuned capacitor, protection reactor, capacitor switching contactor, switching, simulation

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 29.5.2016

Tomáš Voráček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce paní doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADY KOMPENZACE ÚČINÍKU</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	12
1.2 ZÁKLADY KOMPENZACE ÚČINÍKU.....	12
<b>2 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PRO KOMPENZACI ÚČINÍKU</b> .....	<b>15</b>
2.1 PROSTÉ KONDENZÁTORY.....	15
2.1.1 Provedení a vlastnosti kondenzátorů na hladinách NN.....	16
2.1.2 Provedení a vlastnosti kondenzátorů na hladinách VN.....	18
2.2 CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE.....	19
2.2.1 Provedení a vlastnosti ochranných tlumivek.....	21
<b>3 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KOMPENZAČNÍHO VÝKONU</b> .....	<b>22</b>
3.1 STUPŇOVITÉ.....	22
3.2 PLYNULÉ.....	23
<b>4 TEORETICKÝ ROZBOR PŘECHODOVÝCH SPÍNACÍCH DĚJŮ</b> .....	<b>24</b>
4.1 PŘIPÍNÁNÍ PRVNÍHO KOMPENZAČNÍHO STUPNĚ.....	24
4.1.1 Prostá kompenzace.....	24
4.1.2 Prostá kompenzace s odporovým spínáním.....	27
4.1.3 Chráněná kompenzace.....	30
4.2 PŘIPÍNÁNÍ DALŠÍCH STUPŇŮ.....	31
<b>5 MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÝCH DĚJŮ PŘI SPÍNÁNÍ KONDENZÁTORŮ A KOMPENZAČNÍCH STUPŇŮ</b> .....	<b>33</b>
5.1 PŘIPÍNÁNÍ PRVNÍHO KOMPENZAČNÍHO STUPNĚ.....	33
5.1.1 Výpočet impedancí.....	33
5.1.2 Model prosté kompenzace.....	35
5.1.3 Model prosté kompenzace s odporovým spínáním.....	39
5.1.4 Model chráněné kompenzace.....	43
5.1.5 Popis programu.....	47
5.2 PŘIPÍNÁNÍ DRUHÉHO KOMPENZAČNÍHO STUPNĚ.....	48
5.2.1 Prostá kompenzace.....	48
5.2.2 Prostá kompenzace s odporovým spínáním.....	51
5.2.3 Chráněná kompenzace.....	54
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>57</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Ztráty energie počínaje výrobou až po její spotřebu patří v současnosti k velmi diskutovaným otázkám. V této práci jsou popsána kompenzační zařízení, která omezují ztráty energie při přenosu, ale zároveň způsobují zpětné negativní rušivé vlivy, mezi něž patří například spínací rázy či vznik rezonancí v síti. Tato práce je zaměřena na rušivé vlivy způsobené spínáním kompenzačních kondenzátorů. Spínací děje jsou v práci teoreticky popsány a namodelovány. Účelem práce je zdokumentovat závažnost spínacích rázů a prokázat účinnost opatření, která uvádějí výrobci kompenzačních zařízení.

Práce je rozčleněna do několika kapitol. V úvodní kapitole jsou vysvětleny základní pojmy a vztahy týkající se problematiky kompenzace jalového výkonu, základní rozdělení kompenzace z hlediska připojení k síti a některé důvody kompenzace. Následuje kapitola, ve které je provedeno základní rozdělení technických prostředků používaných ke kompenzaci jalového výkonu. Kapitola je zaměřena především na prostředky využívající ke své činnosti kompenzační kondenzátory. Výkonové kompenzační kondenzátory používané na hladinách nízkého a vysokého napětí jsou zde detailněji popsány z hlediska jejich provedení. Dále jsou pak zmíněny způsoby řízení jalového výkonu. V kapitole č. 4 je vysvětlen obecný matematický postup výpočtu spínacích přechodových dějů, které vznikají při připínání kompenzačních stupňů k síti. S pomocí jednoduchých náhradních schémat je zde popsáno připínání kondenzátoru, chráněné kompenzační sekce a spínání stykači s předstihovými kontakty s odpory. Poslední kapitola je zaměřena na modelování přechodových dějů vycházející z obecného matematického popisu. S využitím softwaru jsou zde zobrazeny průběhy proudu a napětí na kondenzátoru s různými počátečními podmínkami. Proto, aby děje odpovídali reálnému případu, jsou dopočítány hodnoty impedancí jednoduché sítě a použity katalogové hodnoty kompenzačních prvků.

## Seznam symbolů a zkratek

1f, 3f	Počet fází	
$C, C_1, C_2$	Kapacita	[F]
$D$	Deformační výkon	[VA $d$ ]
$f$	Frekvence	[Hz]
$f_r$	Rezonanční frekvence	[Hz]
HDO	Hromadné dálkové ovládání	
$i, i_{C1}, i_{C2}$	Okamžitá hodnota proudu	[A]
$i_{1\infty}, i_{2\infty}, i_{3\infty}$	Okamžitý ustálený proud	[A]
$i_{1\infty}', i_{2\infty}', i_{3\infty}'$	Derivace okamžitého ustáleného proudu	[A]
$I_C$	Kapacitní proud	[A]
$I_K$	Vykompenzovaný proud	[A]
$I_L$	Induktivní proud	[A]
$I'$	Nevykompenzovaný proud	[A]
$K, K_1, K_2$	Kompenzační zařízení	
k1	Kabelové vedení	
$K_{11i}, K_{12i}, K_{13i}, K_{21i}, K_{22i}, K_{23i}$	Proudové integrační konstanty	
$K_{11u}, K_{12u}, K_{13u}, K_{21u}, K_{22u}, K_{23u}$	Napěťové integrační konstanty	
$l_k$	Délka kabelového vedení	[m]
$L$	Indukčnost	[H]
$L_H$	Indukčnost tlumivky	[H]
$L_K$	Indukčnost kabelu	[H]
$L_S$	Celková indukčnost sítě	[H]
$L_T$	Indukčnost transformátoru	[H]
$n$	Řád harmonické	
N	Počet kompenzačních stupňů	
NN	Nízké napětí	
$p$	Činitel zatlumení	
$P$	Činný výkon	[W]
$P_Z$	Ztrátový činný výkon	[W]
$Q$	Jalový výkon	[VA $r$ ]
$Q_{CL}$	Jalový výkon kompenzačního stupně	[VA $r$ ]
$Q_K$	Kompenzovaný jalový výkon	[VA $r$ ]
$Q_{kom}$	Kompenzační jalový výkon	[VA $r$ ]
$Q_L$	Jalový induktivní výkon	[VA $r$ ]
$R$	Činný odpor	[ $\Omega$ ]
$R_Q$	Činný odpor nadzařené sítě	[ $\Omega$ ]
$R_K, R_{K1}, R_{K2}$	Činný odpor kabelu	[ $\Omega$ ]
$R_P$	Předstihový odpor	[ $\Omega$ ]
$R_S$	Celkový činný výkon sítě	[ $\Omega$ ]
$R_T$	Činný odpor transformátoru	[ $\Omega$ ]
$s, s_1, s_2$	smyčka	
$S$	Zdánlivý výkon	[VA]
$S_k''$	Zkratový výkon	[VA]
$S_{nT}$	Jmenovitý zdánlivý výkon	[VA]
$S_P, S_{P1}, S_{P2}$	Spínací prvek	
$t_1$	Okamžik sepnutí hlavních kontaktů	[s]
T1	Distribuční transformátor	

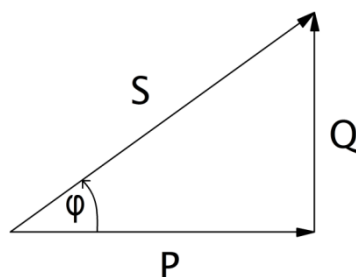
$u_0$	Okamžitá hodnota napětí zdroje	[V]
$u_C, u_{1C}, u_{2C}, u_{3C}$	Okamžitá hodnota napětí na kondenzátoru	[V]
$u_L, u_{L1}, u_{L2}$	Okamžitá hodnota napětí na indukčnosti	[V]
$u_R, u_{R1}, u_{R2}$	Okamžitá hodnota napětí na odporu	[V]
$U$	Napětí	[V]
$U_1$	Vstupní napětí	[V]
$U_2$	Výstupní napětí	[V]
$U_{Cn}$	Jmenovité napětí kondenzátoru	[V]
$U_f$	Fázové napětí	[V]
$U_m$	Amplituda napětí	[V]
$U_n$	Jmenovité napětí	[V]
$U_S$	Sdružené napětí	[V]
VN	Vysoké napětí	
$X_C$	Kapacitní reaktance	[ $\Omega$ ]
$X_Q$	Reaktance nadřazené sítě	[ $\Omega$ ]
$X_K, X_{K1}, X_{K2}$	Reaktance kabelového vedení	[ $\Omega$ ]
$X_L$	Induktivní reaktance	[ $\Omega$ ]
$X_S$	Celková reaktance sítě	[ $\Omega$ ]
$X_T$	Reaktance transformátoru	[ $\Omega$ ]
$Z, Z_1, Z_2, Z_3$	Impedance	[ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3$	Komplexní impedance	[ $\Omega$ ]
$\alpha$	Fázový posun napětí zdroje	[ $^\circ$ ]
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	Činitel tlumení	
$\delta$	Ztrátový úhel	[ $^\circ$ ]
$\varphi$	Fázový posun	[ $^\circ$ ]
$\varphi_K$	Kompenzovaný fázový posun	[ $^\circ$ ]
$\varphi_{Z1}, \varphi_{Z2}, \varphi_{Z3}$	Fázový posun impedance	[ $^\circ$ ]
$\omega$	Úhlová rychlost	[ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\omega_{v1}, \omega_{v2}, \omega_{v3}$	Frekvence vlastních kmitů	[ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\lambda$	Účinník	
$\lambda_1, \lambda_2$	Kořeny charakteristické rovnice	

## 1 Základy kompenzace účinníku

V této kapitole je s využitím literatury [1] a [2] stručně popsán teoretický úvod do problematiky kompenzace jalového výkonu. Je zde krátce vysvětlen princip a důvod paralelní kompenzace.

### 1.1 Základní pojmy

Na úvod je třeba připomenout základní veličiny a vztahy, které souvisejí s problematikou kompenzace jalového výkonu. Mezi základní veličiny patří zdánlivý výkon značený  $S$ . Zdánlivý výkon se skládá ze dvou složek a to činného a jalového výkonu. Vztah pro výpočet zdánlivého výkonu vyplývá z výkonového trojúhelníka (obr. 1.1).



Obr. 1.1: Výkonový trojúhelník

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (1.1)$$

Kosinus vyznačeného úhlu  $\varphi$  definujeme jako účinník. Přesněji lze účinník vysvětlit jako kosinus úhlu fázového posunu mezi 1. harmonickou napětí a proudem. Pro obvody s neharmonickými proudy platí pro zdánlivý výkon vztah:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (1.2)$$

kde  $D$  je tzv. deformační výkon. Skutečný účinník, který v sobě respektuje vliv vyšších harmonických proudů a napětí, je pak dán vztahem:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (1.3)$$

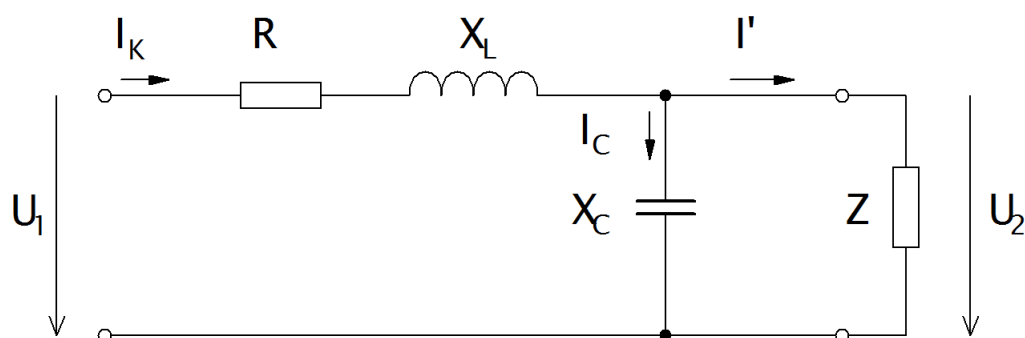
### 1.2 Základy kompenzace účinníku

Většina elektrických spotřebičů připojených do střídavé rozvodné sítě je induktivního charakteru (např. asynchronní motory), proto prochází všemi prvky elektrizační soustavy proud skládající se z činné i jalové složky. Všechny prvky sítě musejí být dimenzovány na celkový proud, který je dán vektorovým součtem činného a jalového proudu. Přenos jalového proudu zvyšuje úbytek napětí. Snahou je tedy tyto nepříznivé jalové proudy snížit. Toho lze docílit výrobou jalové energie v místě nebo v blízkosti její spotřeby, jejímž cílem je snížit nebo téměř úplně potlačit jalovou složku proudu v rozvodné síti. Toto snížení ztrát se nazývá kompenzace účinníku, nebo také kompenzace jalového výkonu.

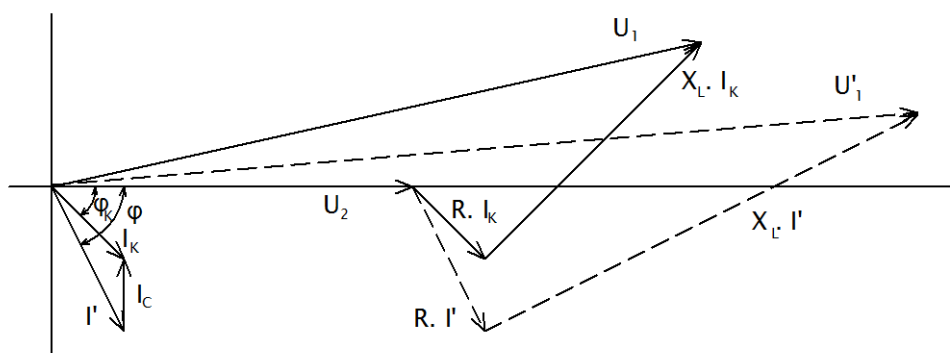
Kompenzace účinníku se provádí paralelním připojením kompenzačního zařízení ke spotřebiči. Dle místa připojení kompenzačního zařízení lze rozdělit na kompenzaci:

- individuální. Kompenzační zařízení je připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Tímto způsobem zapojení dojde k odlehčení celé elektrizační soustavy od zdroje ke spotřebiči, dosáhne se největší úspory ztrát, ale využití kompenzačních prostředků je závislé na provozu kompenzovaného zařízení.
- skupinovou, kdy je kompenzační zařízení připojeno na přípojnice rozvaděče pro skupinu spotřebičů a navrhováno na soudobý odebíraný výkon. Příkladem skupinové kompenzace je kompenzace na hlavních rozvaděcích VN/NN v rozvodech průmyslových podniků. Kompenzační baterie je většinou rozdělena na více samostatně ovládaných stupňů. Oproti individuální kompenzaci je zde lepší využití kondenzátorů s menšími kompenzačními výkony. Nevýhodou je nekompenzované vedení od skupinového rozvaděče ke spotřebiči a je zde nutnost automatické regulace jalového výkonu.

Náhradní schéma paralelní kompenzace je zobrazeno na *obr. 1.2*, kde  $R$  představuje odpor vedení,  $X_L$  induktivní reaktanci vedení a  $X_C$  kompenzační reaktanci. Ve fázorovém diagramu jsou přerušovaně naznačeny poměry v nevykompenzovaném stavu a plnou čarou poměry v částečně vykompenzovaném stavu.



*Obr. 1.2: Náhradní schéma paralelní kompenzace*

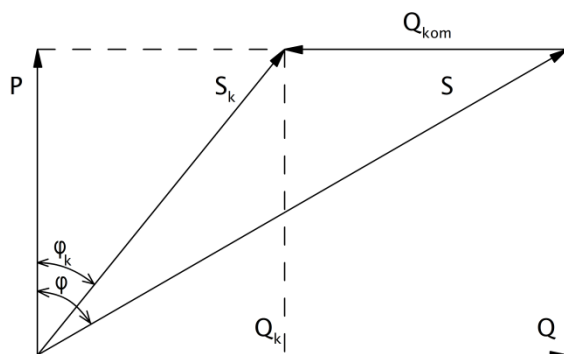


*Obr. 1.3: Fázorový diagram paralelní kompenzace*

Známe-li činný výkon, účinník kompenzovaného zařízení a požadovaný účinník, lze určit potřebný výkon kompenzačního zařízení dle vztahu (1.4).

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P(\tan \varphi - \tan \varphi_K) \quad (1.4)$$

Vztah lze odvodit pomocí diagramu na *obr. 1.4*, ze kterého je patrné, že kompenzační výkon se určí jako rozdíl jalového výkonu před kompenzací  $Q$  a po kompenzaci  $Q_k$ .



*Obr. 1.4: Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku*

Jak už bylo zmíněno dříve, kompenzace se provádí z důvodu snížení celkového proudu v rozvodné síti. Snížení proudu vede ke zmenšení úbytku napětí na vedení a ke zmenšení ztrát výkonu ve vedení, které jsou úměrné kvadrátu proudu. Dále dojde ke zlepšení zkratových poměrů v síti a z ekonomického hlediska ke snížení provozních nákladů.

Kompenzace má největší vliv na distribuční síť a její zařízení. Z tohoto důvodu distributor elektrické energie dbá na dodržování účinníku v určitých mezích. Hodnota tzv. neutrálního účinníku je stanovena v rozmezí 0,95 až 1 induktivního. Za nedodržení jsou odběrateli účtovány cenové přírážky k platbě za odebíraný výkon. Cenové přírážky jsou stanoveny podle typu sazby a jsou uvedeny v procentech platby za výkon a elektrickou energii.

## 2 Technické prostředky pro kompenzaci účinníku

Kapitola popisuje technické prostředky používané ke kompenzaci a jejich způsoby připojení k síti. V současné době jsou používány především statické kompenzátory. Mezi statické kompenzátory jsou zahrnována všechna kompenzační zařízení kromě rotačních kondenzátorů. Jedná se o zařízení, která využívají ke kompenzaci výkonové kompenzační kondenzátory. Rotační kompenzační zařízení (synchronní kompenzátory, synchronní motory) jsou z důvodu jejich pomalé reakce a vysokých provozních nákladů v útlumu, proto v této kapitole nejsou popsána. Je třeba se zmínit i o aktivních filtrech, které slouží ke kompenzaci nevhodných harmonických složek a tím ke zlepšení skutečného účinníku. Vzhledem k rozsáhlosti problematiky aktivních filtrů se jimi práce nebude zabývat.

### 2.1 Prosté kondenzátory

Prosté kondenzátory jsou nejčastěji používaným prostředkem ke kompenzaci jalového výkonu. Jedná se o nechráněnou kompenzaci. Hlavním parametrem kompenzačních kondenzátorů je kompenzační výkon. Obecně je kompenzační výkon jednofázového kondenzátoru dán vztahem:

$$Q_C = U^2 \omega C, \quad (2.1)$$

kde  $U$  je napětí na kondenzátoru a  $C$  kapacita kondenzátoru. Kompenzační výkon 3f kondenzátoru je dán způsobem zapojení.

Na úrovni NN jsou používány 3f kondenzátorové jednotky, jejichž 1f svitky jsou připojeny na sdružené napětí. Jedná se tedy o zapojení do trojúhelníka a kompenzační výkon lze vyjádřit vztahem:

$$Q_C = 3U_s^2 \omega C \quad (2.2)$$

Na úrovni VN jsou kondenzátory provedeny jako 1f nebo 3f kondenzátory zapojené do hvězdy. Na 1f svitku je fázové napětí a pro kompenzační výkon pak platí vztah:

$$Q_C = 3U_f^2 \omega C = U_s^2 \omega C \quad (2.3)$$

Další významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost reaktance. Ze vztahu (2.4) vyplývá, že s rostoucí frekvencí reaktance klesá.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2.4)$$

Připojíme-li kondenzátor do sítě s výskytem vyšších harmonických, dochází k odsávání harmonických. Celkový proud vlivem harmonických vzroste a dochází k proudovému a tepelnému namáhání samotného kondenzátoru. Nehrazené kondenzátory lze používat v sítích s nízkým podílem nelineárních spotřebičů.

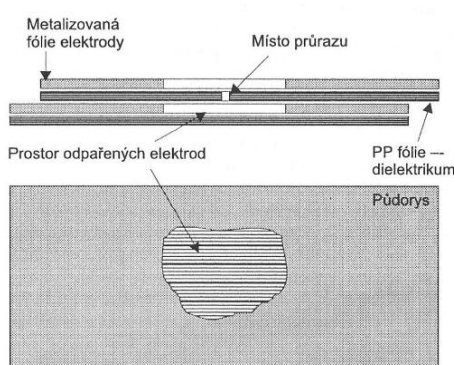
Provoz kondenzátorů ovlivňují ztráty, které jsou reprezentovány tzv. ztrátovým činitelem  $\delta$ . S respektováním vyšších harmonických platí vztah:

$$P_Z = \sum_{n=1}^{\infty} n Q_n \operatorname{tg} \delta_n = 2\pi C \sum_{n=1}^{\infty} n U_n^2 f_n \operatorname{tg} \delta_n, \quad (2.5)$$

kde  $n$  je řád harmonické,  $f_n$  frekvence harmonické a  $U_n$  napětí harmonické. Měrné ztráty dielektrika jsou maximálně 0,25 W/kVAr, měrné ztráty celého kondenzátoru včetně vybíjecích odporů kolem 0,5 W/kVAr [3].

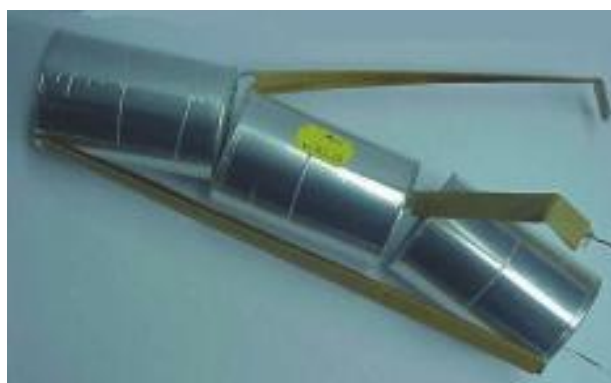
### 2.1.1 Provedení a vlastnosti kondenzátorů na hladinách NN

K výrobě dnešních nízkonapětových kondenzátorů je využíván zejména systém MKP. Jedná se o samoregenerační systém v suchém provedení. Princip samoregenerace je zobrazen na *obr. 2.1*. Samoregenerační vlastnost spočívá v tom, že při napětovém průrazu dielektrika dojde k odpaření pokovené vrstvy v oblasti průrazu. Tento děj způsobí úbytek kapacity kondenzátoru cca o 100 pF, který je v porovnání s vlastní kapacitou kondenzátoru zanedbatelný. [1,4]



*Obr. 2.1: Princip samoregenerace kondenzátorů NN (převzato z [1])*

Svitky kondenzátoru jsou tvořeny metalizovanou polypropylenovou folií s velmi nízkými dielektrickými ztrátami, která se vyrábí nanášením tenké vrstvy zinku a hliníku na jednu stranu polypropylenového filmu. Třífázové kondenzátory jsou tvořeny třemi svitky uspořádané buď nad sebou, nebo jsou tři svitky navinuty souose jeden na druhém. Vzhledem k tomu, že životnost kondenzátoru je závislá na provozní teplotě, je důležité, aby konstrukčním uspořádáním byl umožněn co nejintenzivnější odvod ztrátového tepla z vnitřku svitků. Proto je výhodnější uspořádání za sebou, přičemž je navíc zajištěno zmenšení nebezpečí zkratů mezi fázemi. Běžné provedení svitků je zobrazeno na *obr. 2.2*. [5,6]



*Obr. 2.2: Svitky 3f kondenzátoru NN v uspořádání za sebou (převzato z [6])*



Jako plnivo se používá pevná kompaktní hmota rostlinného původu, která je netoxická a ekologicky nezávadná, nebo netečný, ekologicky nezávadný plyn (směs dusíku s héliem). U těchto kondenzátorů nehrozí ani v případě havárie znečištění životního prostředí průsakem nebo vytečením impregnační kapaliny. [4]

Vše je umístěno do hermeticky uzavřené nádoby, která zajišťuje ochranu proti navlhání a oxidaci i ochranu z hlediska požární bezpečnosti [6]. Vzhled obvyklých kompenzačních kondenzátorů je zobrazen na *obr. 2.3*. Nádoby válcových kondenzátorů jsou taženy z hliníku. Pro speciální aplikace výrobci dodávají kondenzátory NN v nádobách z ocelových plechů v hranatém provedení.



*Obr. 2.3: Válcové kompenzační kondenzátory NN (převzato z [4])*

Při elektrickém a tepelné přetížení dochází v nádobě kondenzátoru vlivem vývinu plynu při odpařování elektrod k nárůstu tlaku. Z těchto důvodů je kondenzátor vybaven přetlakovou pojistkou. Princip funkce přetlakové pojistky je vidět z *obr. 2.4*. Při překročení dovoleného tlaku dojde k deformaci víka nádoby kondenzátoru a mechanickému přetržení přívodů ke svítkům. [1]



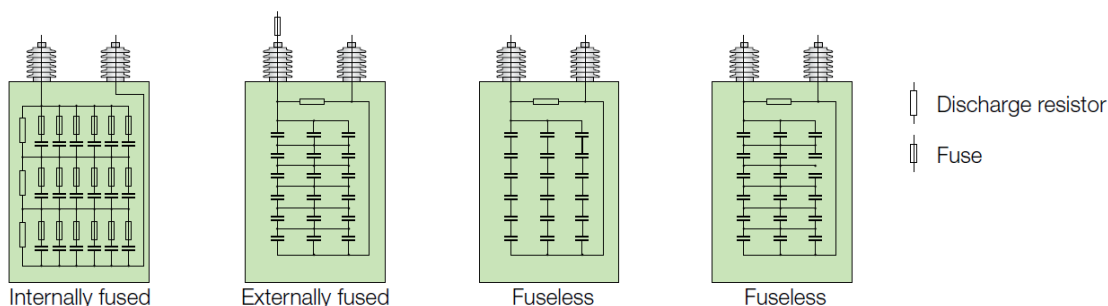
*Obr. 2.4: Přetlaková pojistka (převzato z [3])*

K zajištění provozní bezpečnosti patří také rychlé vybití zbytkového náboje po odpojení kondenzátoru od napájecího napětí. Proto jsou kondenzátory vybaveny vybíjecími odpory. Běžně jsou vybíjecí odpory připojeny ke svorkovnici na víku nádoby, někdy jsou u krabicových kondenzátorů umístěny uvnitř nádoby. Velikost odporů je volena s ohledem na ztráty vyvolané trvalým připojením odporů ke kondenzátoru a dobu poklesu zbytkového napětí. Nízkonapěťové kondenzátory jsou dodávány s odpory, které zajistí pokles zbytkového napětí na 50 V za minutu [6]. Dále bývají kondenzátory jištěny pojistkami s pomalou vypínací charakteristikou (gG) dimenzované na cca 1,6 až 1,8násobek jmenovitého proudu [4].

### 2.1.2 Provedení a vlastnosti kondenzátorů na hladinách VN

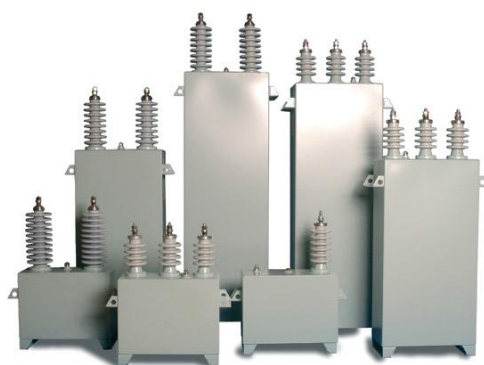
Vysokonapěťové kondenzátory jsou tvořeny dielektrikem z polypropylenové folie impregnované syntetickou, ekologicky i zdravotně nezávadnou kapalinou s vysokou elektrickou pevností. Elektrody tvoří hliníková folie. Tato konstrukce zajišťuje nízké dielektrické ztráty. Kondenzátory VN jsou provedeny jako jednofázové nebo třífázové jednotky. [4]

Kondenzátorová jednotka je složena s několika prvků (elementů) zapojených sériově a paralelně tak, aby byla docílena požadovaná kapacita a napětí kondenzátoru. Důležitým faktorem spolehlivosti kondenzátorových jednotek jsou mechanismy jištění. Pojistky mají za úkol odpojit kondenzátor nebo jen jeden element od napětí. V dnešní době jsou k dispozici různé pojistkové technologie, které lze rozdělit na vnější, vnitřní a bez jištění. Způsoby zapojení jednotlivých elementů a umístění jisticích prvků jsou zobrazeny na *obr. 2.5*. Rovněž jako kondenzátory NN jsou vybaveny vybíjecími odpory, které snižují napětí na 75 V do 10 minut. Kondenzátory lze vybavit tlakovým čidlem. [4,7]



*Obr. 2.5: Jednofázové kondenzátorové jednotky VN (převzato z [7])*

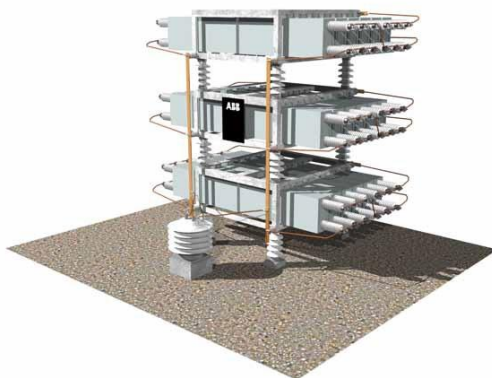
Nádoby jsou svařované z ocelových plechů s důkladně provedenou povrchovou úpravou, tak aby byla zajištěna schopnost odolávat těžkým povětrnostním podmínkám. Na víku nádoby jsou umístěny porcelánové průchodky. Vnější vzhled kondenzátorových jednotek VN je zobrazen na *obr. 2.6*. [7]



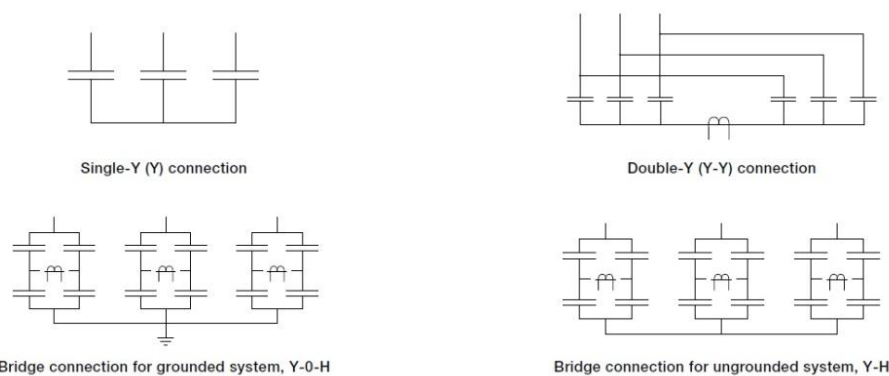
*Obr. 2.6: 1f a 3f kondenzátorové jednotky VN (převzato z [4])*

K dosažení širokého rozsahu výkonů jsou sestavovány tzv. kompenzační banky zobrazeny na *obr. 2.7*. Banky jsou sestaveny s jednofázových kondenzátorových jednotek různě umístěných na ocelových roštích a stojanech. Jednofázové jednotky jsou spojované sériově a paralelně dle požadovaného napětí a výkonu. Příklady zapojení jednofázových jednotek ukazuje *obr. 2.8*. Kondenzátorové baterie zapojené do dvojité hvězdy nebo H-můstku jsou vybaveny transformátorem balanční ochrany, který reaguje na nesymetrii,

vzniklou poškozením některých svitků způsobených elektrickými průrazy nebo výpadkem vnitřních pojistek v kondenzátorových jednotkách. [7,8]



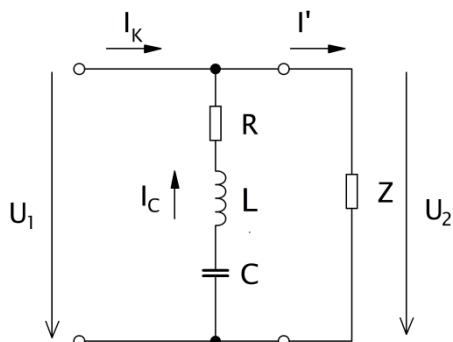
Obr. 2.7: Kmpenzační banka (převzato z [7])



Obr. 2.8: Kmpenzační banky – zapojení  $I_f$  kondenzátorových jednotek (převzato z [7])

## 2.2 Chráněná kompenzace

Z předchozí kapitoly vyplývají nedostatky prosté kompenzace. Proto je zavedena tzv. chráněná kompenzace. Principem chráněné kompenzace je zapojení ochranné tlumivky v sérii s kondenzátorem. Tlumivka snižuje namáhání kondenzátorů způsobené vyššími harmonickými a omezuje zapínací proudové rázy. Základní zapojení chráněného kompenzačního obvodu lze redukovat na jednoduchý sériový RLC článek.



Obr. 2.9: Náhradní schéma chráněné kompenzační sekce

Pro vysvětlení chráněné kompenzace je třeba uvést pomocné veličiny:

Činitel zatlumení:

$$p = \frac{x_L}{x_C} \quad (2.6)$$

Reaktance tlumivky:

$$X_L = -pX_C \quad (2.7)$$

Reaktance kompenzačního stupně:

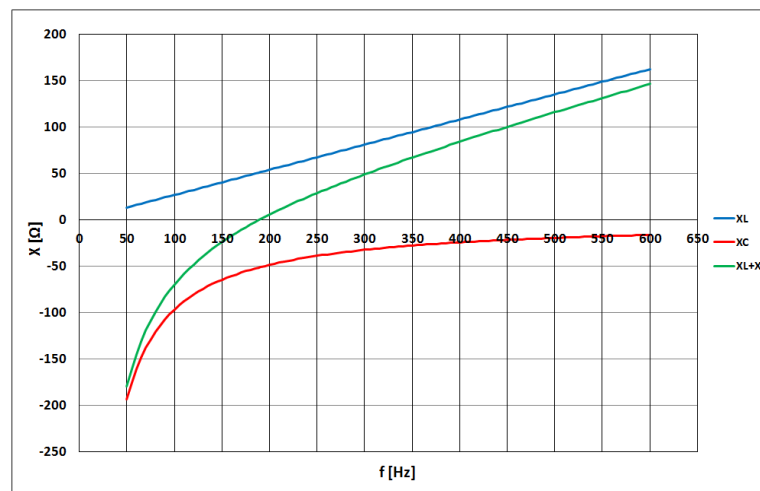
$$X_{komp} = (1 - p)X_C \quad (2.8)$$

Vlivem připojení tlumivky dojde k navýšení napětí na kondenzátoru dané vztahem (2.9). Z toho důvodu je pak potřeba volit kondenzátory s navýšeným jmenovitým napětím, ne 400 V ale např. 440 V.

$$U_{Cn} = \frac{U_n}{1-p} \quad (2.9)$$

Skutečný kompenzační výkon, který se vlivem předradné tlumivky snižuje, je dán vztahem:

$$Q_{komp} = \frac{U_n^2}{X_{komp}} = \left( \frac{U_n}{U_{Cn}} \right)^2 \frac{Q_C}{1-p} \quad (2.10)$$



Obr. 2.10: Frekvenční charakteristika LC článku

Z frekvenční charakteristiky je zřejmé, že pro  $f < f_r$  se RLC článek chová jako kapacita a pro  $f > f_r$  jako indukčnost. Mezní frekvence  $f_r$  nazývána rezonanční frekvence je dána tzv. Thomsonovým vztahem:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

Při  $f = f_r$  je RLC článek čistě ohmického charakteru. Rezonanční frekvence je volena co nejnižší, aby se v co nejširším spektru frekvencí choval kompenzační stupeň jako indukčnost. Cílem je zabránit odsávání harmonických proudů, přetěžování kondenzátoru a také vzniku případných rezonancí. Rezonanční frekvence chráněného kompenzačního stupně nesmí být volena na frekvenci významných harmonických, signálu HDO ( $216^{2/3}$  Hz) a samozřejmě ani na frekvenci 50 Hz. Kompenzační stupeň je obvykle nastaven na rezonanční frekvenci 189 Hz, pak je činitel zatlumení roven 7 %.

### 2.2.1 Provedení a vlastnosti ochranných tlumivek

Tlumivky jsou vyráběny z vysokojakostních transformátorových plechů. Jsou vinuty měděnými vodiči kruhového nebo pravoúhlého průřezu dimenzované pro teplotní třídu „F“. Vyznačují se vysokou linearitou a nízkými ztrátami. Jsou konstruovány jako třífázové na společném jádře. Vakuovou impregnací speciální pryskyřicí je dosažena vysoká elektrická pevnost a dlouhá životnost. Tlumivky jsou vybaveny vestavěným teplotním čidlem s odpojovačem. [4]



Obr. 2.11: Ochranné tlumivky NN (převzato z [4])

### 3 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

#### 3.1 Stupňovitě

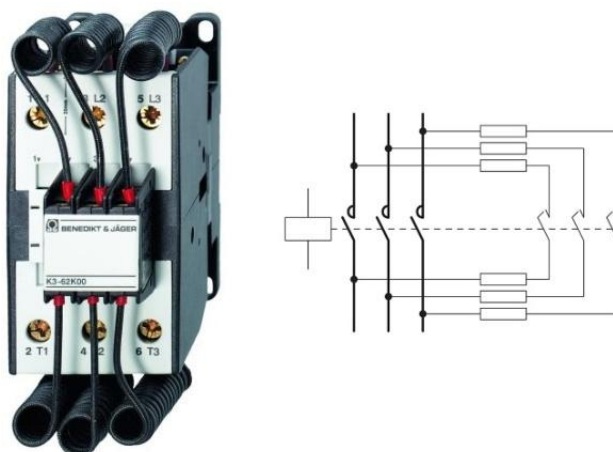
Stupňovité spínání kompenzačních zařízení je nejrozšířenější způsob kompenzace jak v sítích NN, tak i v sítích VN. Hlavní a důležitou otázkou při řešení stupňovitého řízení je správná volba počtu a velikosti jednotlivých stupňů. K určení správného počtu stupňů  $N$  platí vztah:

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan \varphi}{Q_{CL}}, \quad (3.1)$$

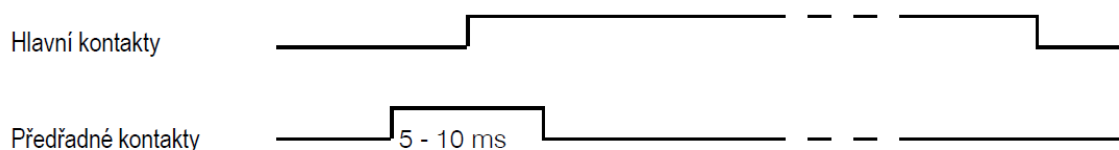
kde  $Q_L$  je jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu a  $Q_{CL}$  jalový výkon jednoho stupně.

Stupňovité spínání lze rozdělit dle typu spínání na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní spínání využívá ke spínání stykače, které přímo připojují kondenzátor nebo chráněnou kompenzační sekci na kompenzovanou síť. Velkým nedostatkem tohoto spínání je možnost vzniku přechodových a rušivých jevů. Tyto jevy jsou částečně eliminovány tlumivkami a použitím speciálních stykačů s odporovým spínáním.

Kompenzační stykače využívají tzv. dvoustupňové spínání, které je zajištěno pomocnými předkontakty. V prvním okamžiku sepnou předkontakty s tlumícími odpory tvořené odporovou spirálou, které potlačí vrcholové hodnoty proudu. S časovým zpožděním 2 až 3 ms dojde k sepnutí hlavních kontaktů a následně odpojení předkontaktů [10]. Časový diagram spínání je zobrazen na obr. 3.2.



Obr. 3.1: Stykač s odporovým spínáním [9]



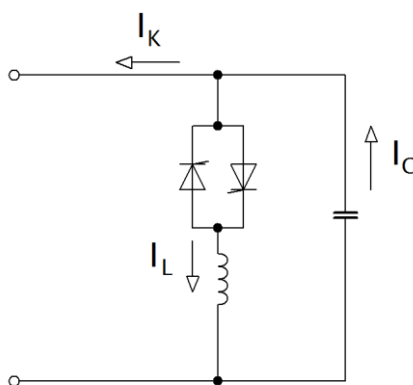
Obr. 3.2: Časový diagram spínání (převzato z [9])

Pro rychlejší změny jalového výkonu se používají bezkontaktní spínače (tyristorové moduly). Jedná se o tzv. dynamickou kompenzaci jalového výkonu. Na rozdíl od klasických stykačů je u bezkontaktního zapínání přesně definován okamžik sepnutí (při průchodu proudu nulou), čímž je omezen proudový ráz.

Automatické řízení jalového výkonu a tedy i ovládání spínačů zajišťují regulátory jalového výkonu. Dnešní regulátory využívají mikroprocesorové techniky, umožňují harmonickou analýzu a disponují mnoha dalšími funkcemi.

### 3.2 Plynulé

Plynulé řízení jalového proudu a tím i kompenzačního výkonu je možné řízením proudu procházejícího tlumivkou připojené paralelně ke kondenzátoru. K řízení je využíván fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení. Zapojení plynule řízeného kompenzátoru znázorňuje jednofázové náhradní schéma na obr. 3.3. [1]



Obr. 3.3: Plynulé řízený kompenzátor [1]

## 4 Teoretický rozbor přechodových spínacích dějů

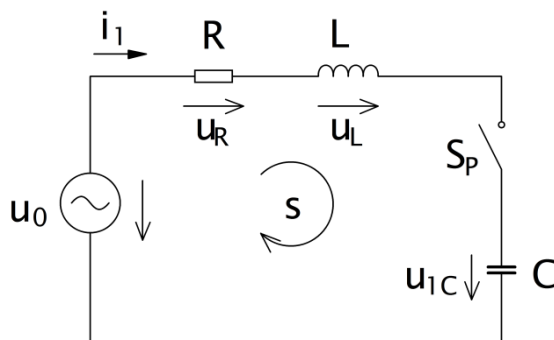
V kapitole je proveden teoretický rozbor přechodových spínacích dějů. Snahou je zjednodušit elektrický obvod tak, aby jej bylo možno matematicky popsat. Vyjádřené vztahy pak budou využity k namodelování přechodových spínacích dějů.

### 4.1 Připínání prvního kompenzačního stupně

V této kapitole je s pomocí literatury [11] popsán obecný matematický výpočet přechodových dějů při připnutí prvního kompenzačního stupně k síti.

#### 4.1.1 Prostá kompenzace

Pro výpočet přechodových dějů vycházím z náhradního schématu zobrazeného na obr. 4.1. Jedná se o klasický RLC článek kde  $R$  a  $L$  představují primární parametry vedení, kompenzační kondenzátor představuje kapacita  $C$  a stykač je nahrazen spínačem  $S_p$ .



Obr. 4.1: Náhradní schéma - spínání kondenzátoru

Úkolem výpočtu je určit časový průběh proudu  $i_1(t)$ . Vycházím z předpokladu, že pro čas  $t < 0$  obvodem protéká nulový proud. Pro čas  $t > 0$  dle II. Kirchhoffova zákona platí obvodová rovnice:

$$u_R + u_L + u_{1C} = u_0, \quad (4.1)$$

kteřá má po vyjádření jednotlivých napětí tvar:

$$Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + u_{1C}(0) = U_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (4.2)$$

kde úhel  $\alpha$  představuje fázový posun napětí zdroje.

Derivací rovnice (4.2) dostávám homogenní lineární diferenciální rovnici 2. řádu:

$$L \frac{d^2 i_1}{dt^2} + R \frac{di_1}{dt} + \frac{i_1}{C} = \omega U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (4.3)$$

Řešení diferenciální rovnice je složeno z obecného a partikulárního řešení. Obecné řešení je dáno kořeny charakteristické rovnice, kterou získám drobnými úpravami ve tvaru:



$$\lambda^2 + \frac{R}{L}\lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad (4.4)$$

Vzhledem k parametrům sítě budu předpokládat vznik tzv. kmitavého přechodového děje, a proto budu uvažovat komplexní kořeny charakteristické rovnice. Děj je charakterizován tzv. činitelem tlumení  $\beta_1$  a frekvencí vlastních kmitů  $\omega_{v1}$ .

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = -\beta_1 \pm j\omega_{v1} \quad (4.5)$$

Obecné řešení homogenní rovnice lze psát ve tvaru:

$$i_1(t) = e^{-\beta_1 t} (K_{11i} \cos \omega_{v1} t + K_{21i} \sin \omega_{v1} t) \quad (4.6)$$

Partikulární řešení představuje harmonický ustálený stav vyjádřený jako:

$$i_{1\infty}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{1Z}) \quad (4.7)$$

Parametry partikulárního řešení naleznou pomocí fázorů napětí zdroje a impedance obvodu. Fázor proudu vypočtu:

$$\overline{I_{1m}} = \frac{\overline{U_m}}{\overline{Z_1}}, \quad (4.8)$$

kde  $\overline{Z_1}$  je celková impedance obvodu dána vztahem:

$$\overline{Z_1} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.9)$$

Součtem obecného a partikulárního řešení dostanu úplné řešení diferenciální rovnice ve tvaru:

$$i_1(t) = e^{-\beta_1 t} (K_{11i} \cos \omega_{v1} t + K_{21i} \sin \omega_{v1} t) + i_{1\infty}(t) \quad (4.10)$$

Neznámé integrační konstanty  $K_{11i}$ ,  $K_{21i}$  určím z počátečních podmínek:

$$i_1(0) = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_L(0+)}{L} = \frac{u_0(0) - u_{1C}(0)}{L}. \quad (4.12)$$

Dosazením počátečních podmínek do rovnice (4.10) a jeho derivace dostanu soustavu rovnic:

$$0 = K_{11i} + i_{1\infty}(0) \quad (4.13)$$

$$\frac{u_0(0) - u_{1C}(0)}{L} = -\beta_1 K_{11i} + K_{21i} \omega_{v1} + i_{1\infty}'(0) \quad (4.14)$$

Řešením soustavy získám vztahy pro integrační konstanty:

$$K_{11i} = -i_{1\infty}(0) \quad (4.15)$$

$$K_{21i} = \frac{\frac{u_0(0)-u_{1C}(0)}{L} - \beta_1 i_{1\infty}(0) - i_{1\infty}'(0)}{\omega_{v1}} \quad (4.16)$$

Pro doplnění provedu výpočet časového průběhu napětí na kondenzátoru. K vyjádření napětí využiju obvodovou rovnici (4.2), do které dosadím proud vyjádřený pomocí napětí na kondenzátoru:

$$i_1 = \frac{du_{1C}}{dt} \quad (4.17)$$

a dostanu diferenciální rovnici 2. řádu:

$$LC \frac{d^2 u_{1C}}{dt^2} + (R + R_P)C \frac{du_{1C}}{dt} + u_{1C} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.18)$$

Obecné řešení získám s použitím již vyjádřených komplexních kořenů charakteristické rovnice (4.5) ve tvaru:

$$u_{1C}(t) = e^{-\beta_1 t} (K_{11u} \cos \omega_{v1} t + K_{21u} \sin \omega_{v1} t) \quad (4.20)$$

K sestavení úplného řešení musím určit ustálené napětí na kondenzátoru. K výpočtu využiji vztah pro fázor proudu proud (4.8). Ustálené napětí na kondenzátoru vypočtu:

$$\overline{U_{1Cm}} = \overline{I_{1m}} \overline{X_C}, \quad (4.21)$$

z toho pak:

$$u_{1C\infty}(t) = U_{1Cm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{Z1} - 90^\circ) \quad (4.22)$$

Úplné řešení diferenciální rovnice pro napětí na kondenzátoru je:

$$u_{1C}(t) = e^{-\beta_1 t} (K_{11u} \cos \omega_{v1} t + K_{21u} \sin \omega_{v1} t) + u_{1C\infty}(t) \quad (4.23)$$

Dosazením počátečních podmínek (4.24) a (4.25) v čase  $t = 0$  do rovnice (4.23) a její derivace a vyřešením soustavy rovnic dostanu výsledné vztahy integračních konstant  $K_{11u}$ ,  $K_{22u}$ .

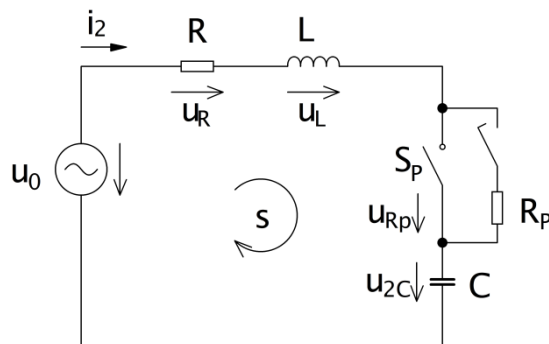
$$u_{1C}(0) \quad (4.24)$$

$$\frac{du_{1C}}{dt} = \frac{i_1(0)}{C} = 0 \quad (4.25)$$

$$K_{11u} = u_{1C}(0) - u_{1C\infty}(0) \quad (4.26)$$

$$K_{21u} = \frac{\beta_1 u_{1C}(0) - \beta_1 u_{1C\infty}(t) - u_{1C\infty}'(0)}{\omega_{v1}} \quad (4.27)$$

#### 4.1.2 Prostá kompenzace s odporovým spínáním



Obr. 4.2: Náhradní schéma – odporové spínání kondenzátoru

Přechodový děj lze rozdělit na dva časové intervaly. Časový interval  $< 0; t_1 >$  představuje sepnutí předstihového kontaktu a tedy počáteční sepnutí přes odpor  $R_p$ . Pro tento případ se změjí obvodová rovnice:

$$u_R + u_L + u_{2C} + u_{Rp} = u_0 \quad (4.28)$$

Dosazením vztahů za jednotlivá napětí a provedením několika úprav dostávám rovnici:

$$L \frac{d^2 i_2}{dt^2} + (R + R_p) \frac{di_2}{dt} + \frac{i_2}{C} = \omega U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (4.29)$$

a z ní dále charakteristickou rovnicí:

$$\lambda^2 + \frac{(R+R_p)}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad (4.30)$$

Vlivem navýšení odporu se změjí přechodový děj na aperiodický a kořeny charakteristické rovnice jsou reálné různé:

$$\lambda_{12} = -\frac{(R+R_p)}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{(R+R_p)}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (4.31)$$

Úplné řešení diferenciální rovnice je ve tvaru:

$$i_2(t) = K_{12i} e^{\lambda_1 t} + K_{22i} e^{\lambda_2 t} + i_{2\infty}(t) \quad (4.32)$$

Při výpočtu partikulárního řešení vycházím ze vztahu:

$$\overline{I_{2m}} = \frac{\overline{U_m}}{\overline{Z_2}}, \quad (4.33)$$

kde:

$$\overline{Z_2} = (R + R_p) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.34)$$

Integrační konstanty  $K_{12i}$  a  $K_{22i}$  určím ze soustavy rovnic dané dosazením počátečních podmínek (4.35) a (4.36) do rovnice (4.32) a její derivace.

$$0 = K_{12i} + K_{22i} + i_{2\infty}(0) \quad (4.35)$$

$$\frac{u_0(0) - u_{2C}(0)}{L} = K_{12i}\lambda_1 + K_{22i}\lambda_2 + i_{2\infty}'(0) \quad (4.36)$$

$$K_{12i} = \frac{\frac{u_0(0) - u_{2C}(0)}{L} + \lambda_2 i_{2\infty}(0) - i_{2\infty}'(0)}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (4.37)$$

$$K_{22i} = -K_{12i} - i_{2\infty}(0) \quad (4.38)$$

K vyřešení intervalu pro čas  $\langle t_1; \infty \rangle$  potřebuji znát časový průběh napětí na kondenzátoru v intervalu  $\langle 0; t_1 \rangle$ . Důvodem je určení počátečních podmínek v čase  $t_1$ . Vycházím opět z obvodové rovnice (4.28), kde proud vyjádřím pomocí napětí  $u_{2C}$ :

$$i_2 = \frac{du_{2C}}{dt} \quad (4.39)$$

Výsledný tvar diferenciální rovnice představuje rovnice:

$$LC \frac{d^2 u_{2C}}{dt^2} + (R + R_p)C \frac{du_{2C}}{dt} + u_{2C} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.40)$$

K sestavení úplného řešení (4.43) je třeba určit ustálené napětí na kondenzátoru. K výpočtu využiju vztah pro fázor proudu (4.33). Ustálené napětí na kondenzátoru vypočtu:

$$\overline{U_{2Cm}} = \overline{I_{2m}} \overline{X_C}, \quad (4.41)$$

z toho:

$$u_{2C\infty}(t) = U_{2Cm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{Z2} - 90^\circ) \quad (4.42)$$

$$u_{2C}(t) = K_{12u} e^{\lambda_1 t} + K_{22u} e^{\lambda_2 t} + u_{2C\infty}(t) \quad (4.43)$$

Počáteční podmínky dosadím do rovnice (4.43) a její derivace. Získám soustavu rovnic:

$$u_{2C}(0) = K_{12u} + K_{22u} + u_{2C\infty}(0) \quad (4.44)$$

$$0 = K_{12u}\lambda_1 + K_{22u}\lambda_2 + u_{2C\infty}'(0) \quad (4.45)$$

ze které vyjádřím vztahy pro integrační konstanty  $K_{12u}$ ,  $K_{22u}$ .

$$K_{12u} = \frac{-\lambda_2 u_{2C}(0) + \lambda_2 u_{2C\infty}(0) - u_{2C\infty}'(0)}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (4.46)$$

$$K_{22u} = u_{2C}(0) - K_{12u} - u_{2C\infty}(0) \quad (4.47)$$

Překlenutím předstihového kontaktu s odporem hlavním kontaktem stykače odpor  $R_p$  odpadá a není ve výpočtu uvažován. Přechodový děj v intervalu  $\langle t_1; \infty \rangle$  se změní na děj kmitavý. Výpočet se shoduje s výpočtem časového průběhu proudu v kapitole 4.1. Vycházím z rovnice:

$$Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt + u_{2C}(t_1) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.48)$$

Úplné řešení dostávám ve tvaru:

$$i_2(t) = e^{-\beta_2(t-t_1)} (K_{12i} \cos \omega_{v2}(t-t_1) + K_{22i} \sin \omega_{v2}(t-t_1)) + i_{2\infty}(t) \quad (4.49)$$

Partikulární řešení určím z fázoru:

$$\overline{I_{2m}} = \frac{\overline{U_m}}{\overline{Z_2}}, \quad (4.50)$$

kde:

$$\overline{Z_2} = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (4.51)$$

Počáteční podmínky (4.52) a (4.53) dostanu dosazením času  $t_1$  do rovnic vyjadřující proud a napětí na kondenzátoru v intervalu  $\langle 0; t_1 \rangle$ .

$$i_2(t_1) \quad (4.52)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{u_L(t_1+)}{L} = \frac{u_0(t_1) - u_{2C}(t_1)}{L} \quad (4.53)$$

Dosazením počátečních podmínek do rovnice (4.49) a její derivace vypočtu integrační konstanty  $K_{12i}$ ,  $K_{22i}$ .

$$K_{12i} = i_2(t_1) - i_{2\infty}(t_1) \quad (4.54)$$

$$K_{22i} = \frac{\frac{u_0(t_1) - u_{2C}(t_1)}{L} + \beta_2 i_2(t_1) - \beta_2 i_{2\infty}(t_1) - i_{2\infty}'(t_1)}{\omega_{v2}} \quad (4.55)$$

$$u_{2C}(t_1) \quad (4.56)$$

$$\frac{du_{2C}}{dt} = \frac{i_2(t_1)}{C} \quad (4.57)$$

Pro úplnost dokončím výpočet napětí na kondenzátoru na intervalu  $\langle t_1; \infty \rangle$ . S využitím předchozích postupů výpočtu napětí a využitím počáteční podmínky (4.56) a (4.57) v čase  $t_1$  dostanu předpis funkce pro napětí na kondenzátoru ve tvaru:

$$u_{2C}(t) = e^{-\beta_2(t-t_1)}(K_{12u} \cos \omega_{v2}(t - t_1) + K_{22u} \sin \omega_{v2}(t - t_1)) + u_{2C\infty}(t) \quad (4.58)$$

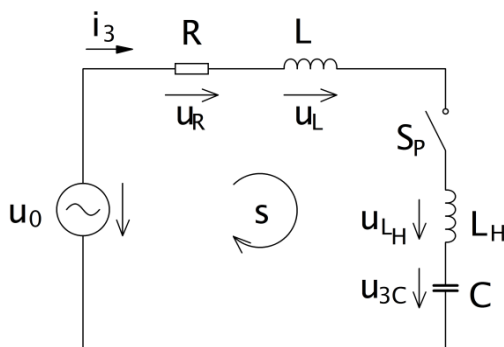
Integrační konstanty jsou dány vztahy:

$$K_{12u} = u_{2C}(t_1) - u_{2C\infty}(t_1) \quad (4.59)$$

$$K_{22u} = \frac{\frac{i_2(t_1)}{C} + \beta_2 u_{2C}(t_1) - \beta_2 u_{2C\infty}(t_1) - u_{2C\infty}'(t_1)}{\omega_{v2}} \quad (4.60)$$

### 4.1.3 Chráněná kompenzace

Jak již bylo zmíněno, chráněná kompenzace spočívá v zapojení ochranné tlumivky v sérii s kompenzačním kondenzátorem. Náhradní schéma obvodu s ochrannou indukčností  $L_H$  je zobrazeno na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Náhradní schéma – spínání chráněné kompenzační sekce

Využiji-li postupu výpočtu proudu a napětí na kondenzátoru v kapitole 4.1 a dosadíme-li celkovou indukčnost obvodu danou součtem indukčnosti vedení a indukčnosti hradící tlumivky získám tyto vztahy:

Obvodová rovnice:

$$u_R + u_L + u_{L_H} + u_{3C} = u_0 \quad (4.61)$$

Diferenciální rovnice pro proud a napětí na kondenzátoru:

$$Ri_3 + (L + L_H) \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_3 dt + u_{3C}(0) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.62)$$

$$(L + L_H)C \frac{d^2 u_{3C}}{dt^2} + RC \frac{du_{3C}}{dt} + u_{3C} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.63)$$

Charakteristická rovnice:

$$\lambda^2 + \frac{R}{(L+L_H)} \lambda + \frac{1}{(L+L_H)C} = 0 \quad (4.64)$$

Komplexní kořeny charakteristické rovnice:

$$\lambda_{13,23} = -\frac{R}{2(L+L_H)} \pm j \sqrt{\frac{1}{(L+L_H)C} - \left(\frac{R}{2(L+L_H)}\right)^2} = -\beta_3 \pm j\omega_{v3} \quad (4.65)$$

Úplná řešení diferenciálních rovnic (4.62) a (4.63):

$$i_3(t) = e^{-\beta_3 t} (K_{13i} \cos \omega_{v3} t + K_{23i} \sin \omega_{v3} t) + i_{3\infty}(t) \quad (4.66)$$

$$u_{3C}(t) = e^{-\beta_3 t} (K_{13u} \cos \omega_{v3} t + K_{23u} \sin \omega_{v3} t) + u_{3C\infty}(t) \quad (4.67)$$

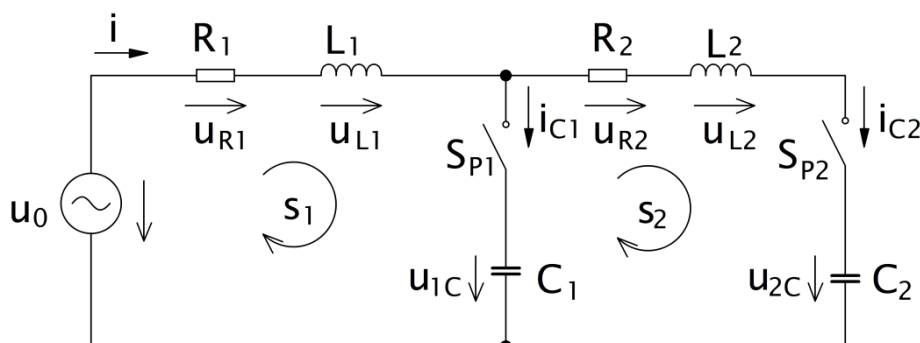
Při výpočtu partikulárního řešení počítám s impedancí vyjádřenou vztahem:

$$\bar{Z}_3 = R + j \left( \omega(L + L_H) - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (4.68)$$

Integrační konstanty dostanu dosazením počátečních podmínek pro proud a napětí na kondenzátoru do rovnic (4.66) a (4.67) a vyřešením soustavy viz kapitola 4.1.

## 4.2 Připínání dalších stupňů

Vzhledem k náročnosti výpočtu přechodových dějů vyšších řádů je zde provedena pouze úvaha o dějích, které nastanou připnutím dalších kompenzačních stupňů. Vychází z náhradního schématu uvedeného na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Náhradní schéma – připínání druhého kompenzačního stupně

Zaměřím se na část obvodu označenou smyčkou  $s_2$ . V porovnání s obvodem pro první kompenzační stupeň (smyčka  $s_1$ ) se výrazně změní hodnota činného odporu a indukčnosti. Konkrétně se hodnoty výrazně zmenší. V případě prosté kompenzace lze říci podle vztahu (4.5) pro frekvenci vlastních kmitů  $\omega_v$ , že frekvence přechodového děje zmenšením indukčnosti výrazně vzroste. Amplituda proudového rázu se vlivem snížení impedance obvodu výrazně zvýší.

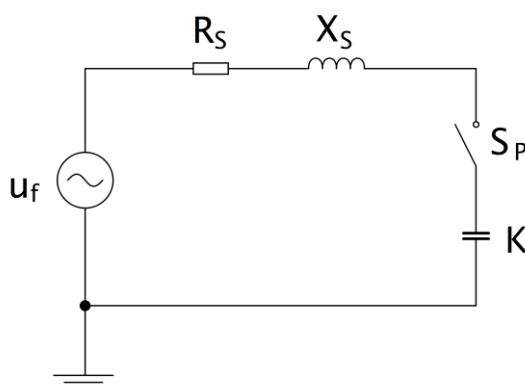
Úvahy v této kapitole jsou dokázány simulacemi provedenými v kapitole 5.2.



## 5 Modelování přechodových dějů při spínání kondenzátorů a kompenzačních stupňů

### 5.1 Připínání prvního kompenzačního stupně

V kapitole je provedeno namodelování spínacích dějů při připínání prvního stupně s konkrétními hodnotami parametrů sítě a kompenzačních prvků. Spínací děje jsou demonstrovány na jednoduchém jednofázovém modelu na *obr. 5.1*, kde  $R_S$  a  $X_S$  představují činnou a jalovou složku impedance sítě,  $S_P$  spínací prvek (stykač) a  $K$  kompenzační zařízení (kompenzační kondenzátor či chráněnou kompenzační sekci).



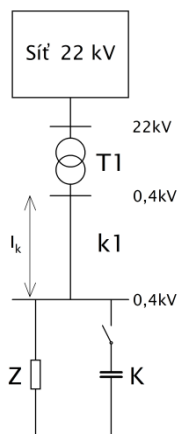
*Obr. 5.1: Náhradní schéma jednostupňové kompenzace*

K modelování spínacích dějů při připnutí prvního stupně využívám obecné matematické vztahy pro proud a napětí na kondenzátoru odvozené v kapitole 4. S využitím těchto vztahů a konkrétních katalogových hodnot kompenzačních prvků zkoumám vliv připínání kondenzátorů na síť při různých podmínkách při sepnutí. Mezi tyto podmínky lze zařadit různý okamžik připnutí na síťové napětí (např. v nule nebo maximu) a různé počáteční nabití kondenzátoru.

K modelování průběhů sledovaných veličin je zvolen program GeoGebra. Jedná se o dynamický matematický software, který umožňuje sledovat změny průběhů způsobené plynulou změnou jednotlivých parametrů. Podstatou je zadání obecných matematických vztahů a následné vykreslení funkce proudu a napětí na kondenzátoru. K ověření správnosti mého výpočtu jsem využil modelační program LTspice.

#### 5.1.1 Výpočet impedancí

Konkrétní případ sítě je možno zobrazit jednoduchým schématem (*obr. 5.2*). Toto zjednodušené schéma představuje připojení průmyslového podniku k distribuční síti.



Obr. 5.2: Konfigurace sítě

Je-li uvažován zkratový výkon sítě 22 kV o velikosti  $S_k'' = 200$  MVA, činná a induktivní složka impedance vztažená na hladinu 0,4 kV se vypočte:

$$X_Q = Z_Q = c \frac{U_n^2}{S_k''} = 1,1 \cdot \frac{0,4^2}{200} = 0,88 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,88 = 0,088 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

Z parametrů distribučních transformátorů 22/0,4 kV se určí činná a induktivní impedance transformátoru. Výpočet je proveden pro transformátor o jmenovitém výkonu  $S_{nT} = 250$  kVA, napětím nakrátko  $u_k = 4\%$  a ztrátami nakrátko  $P_{kn} = 3,25$  kW následujícím způsobem:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,25} = 25,6 \text{ m}\Omega \quad (5.3)$$

$$R_T = P_{knT} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = 3250 \cdot \frac{0,4^2}{250^2} = 8,32 \text{ m}\Omega \quad (5.4)$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} = \sqrt{(25,6^2 - 8,32^2)} = 24,21 \text{ m}\Omega \quad (5.5)$$

Činná a induktivní impedance kabelu 120AYKY s parametry  $R = 258$  m $\Omega$ /km,  $X = 74,3$  m $\Omega$ /km a uvažovanou délkou kabelu  $l_k = 0,1$  km je:

$$R_K = R \cdot l_k = 258 \cdot 0,1 = 25,8 \text{ m}\Omega \quad (5.6)$$

$$X_K = X \cdot l_k = 74,3 \cdot 0,1 = 7,43 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

Parametry použitého transformátoru a kabelu jsou brány z tabulek uvedené v příloze 1. V tabulkách jsou dopočteny hodnoty i pro ostatní typy používaných transformátorů a kabelů uvedených v [12]. Celková impedance sítě je dána součtem impedance nadřazené sítě, transformátorů a vedení:

$$R_S = R_Q + R_T + R_K = 0,088 + 8,32 + 25,8 = 32,208 \text{ m}\Omega \quad (5.8)$$

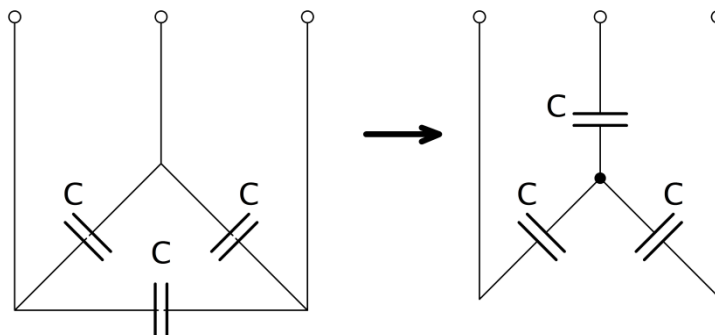
$$X_S = X_Q + X_T + X_K = 0,88 + 24,21 + 7,43 = 32,52 \text{ m}\Omega \quad (5.9)$$

Indukčnost vedení (sítě) stanovím z hodnoty celkové reaktance sítě:

$$L_S = \frac{X_S}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{32,52}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,104 \text{ mH} \quad (5.12)$$

### 5.1.2 Model prosté kompenzace

K sestavení modelu prosté kompenzace jsou použity parametry sítě vypočtené v kapitole 5.1.1 a katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů NN od firmy ZES SILKO. V katalogu [4] jsou uvedeny jmenovité hodnoty kompenzačního výkonu pro trojfázové kondenzátory zapojené do trojúhelníka, proto je třeba tyto hodnoty přepočítat na hodnoty v zapojení do hvězdy (myšlenka naznačena na obr. 5.3).



Obr. 5.3: Převod kompenzační baterie

Jednofázová reaktance pro trojfázový kompenzační kondenzátor o jmenovitém kompenzačním výkonu  $Q_n = 25 \text{ kVAR}$  a jmenovitém napětí  $U_n = 400 \text{ V}$  je:

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_n} = \frac{400^2}{25 \cdot 10^3} = 6,4 \Omega \quad (5.10)$$

Z reaktance se vypočte jednofázová kapacita:

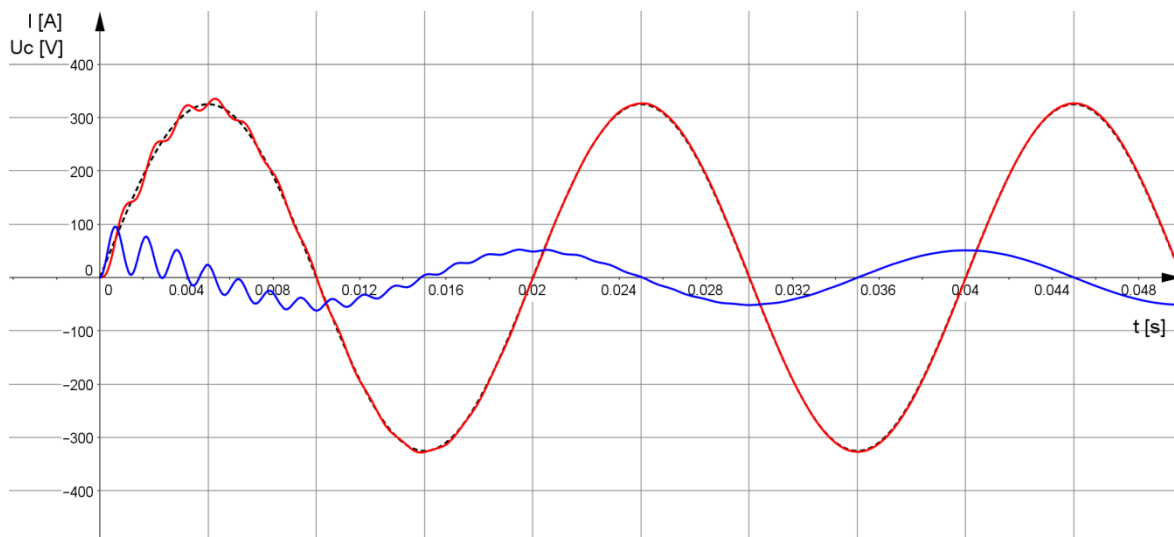
$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 6,4} = 497,359 \mu\text{F} \quad (5.11)$$

Dosazením vypočtených parametrů  $R_S$ ,  $L_S$ , a  $C$  do obecného výpočtu uvedeného v kapitole 4.1 získám předpis funkce pro proud a napětí na kondenzátoru. Pro případ připnutí nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí jsou výsledné předpisy funkcí ve tvaru:

$$i_1(t) = e^{-154,846t} (-51,083 \cos(4394,189t) - 1,819 \sin(4394,189t)) + 51,083 \sin(314,16t + 1,566) \quad (5.13)$$

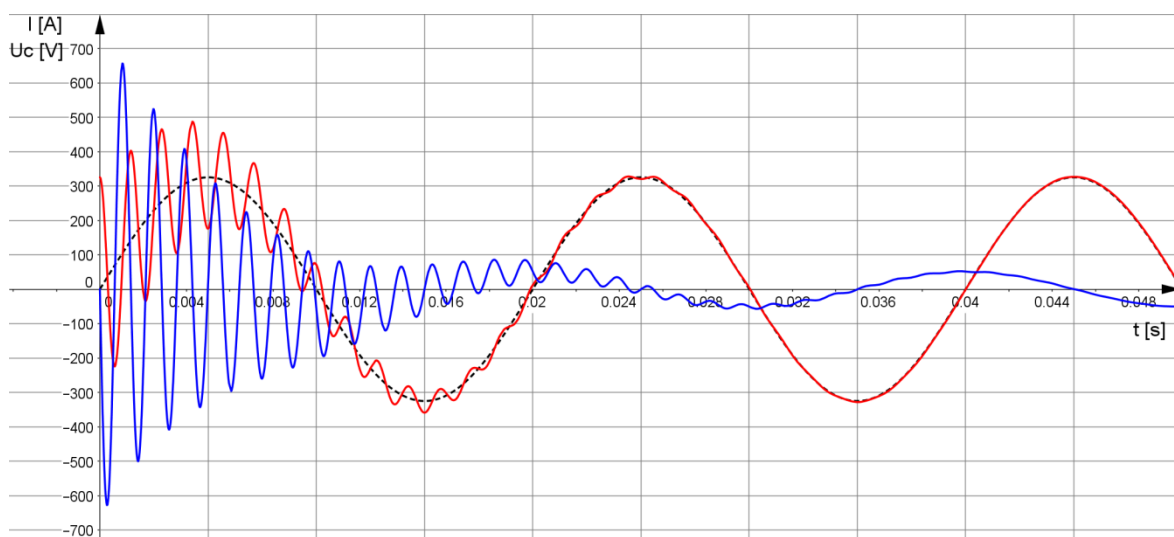
$$u_{1C}(t) = e^{-154,846t}(1,654 \cos(4394,189t) - 23,315 \sin(4394,189t)) + 326,934 \sin(314,16t - 0,005) \quad (5.14)$$

Průběhy odpovídající rovnicím (5.13) a (5.14) vygenerovány pomocí programu Geogebra jsou zobrazeny na *obr. 24*. Modrý průběh představuje proud a červený průběh napětí na kondenzátoru.

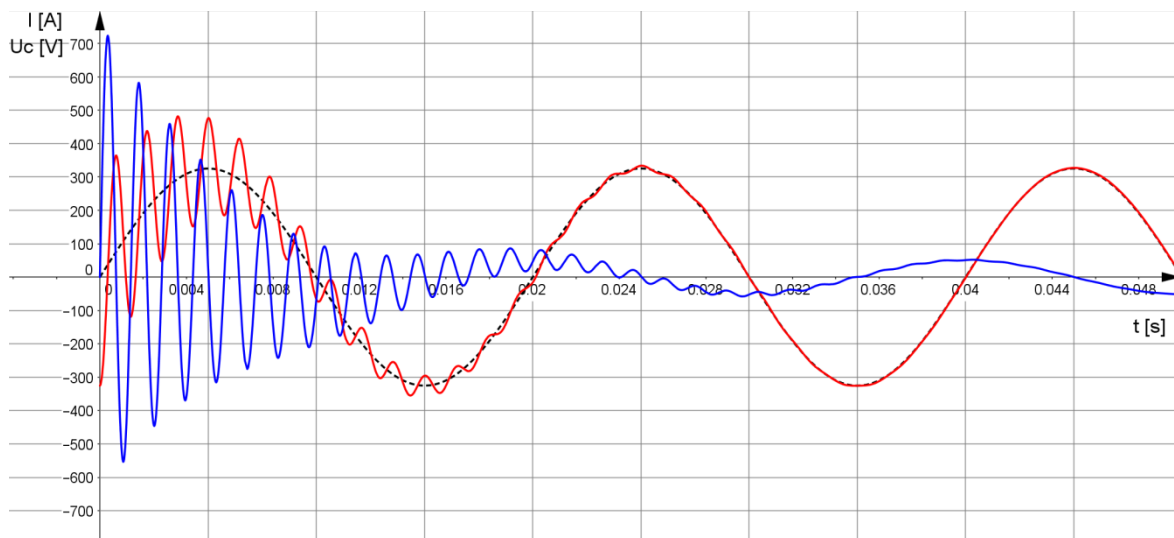


*Obr. 5.4: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou*

Z průběhu je patrné, že nastane poměrně příznivý přechodový děj. Amplituda proudového rázu se rovná dvojnásobku ustáleného proudu. Na *obr. 5.5* a *5.6* jsou zobrazeny případy méně příznivé. Jedná se o případy připojení nabitého kondenzátoru na maximální kladné nebo záporné napětí, které se rovná přibližně maximální hodnotě napětí zdroje při průchodu napětí nulou.

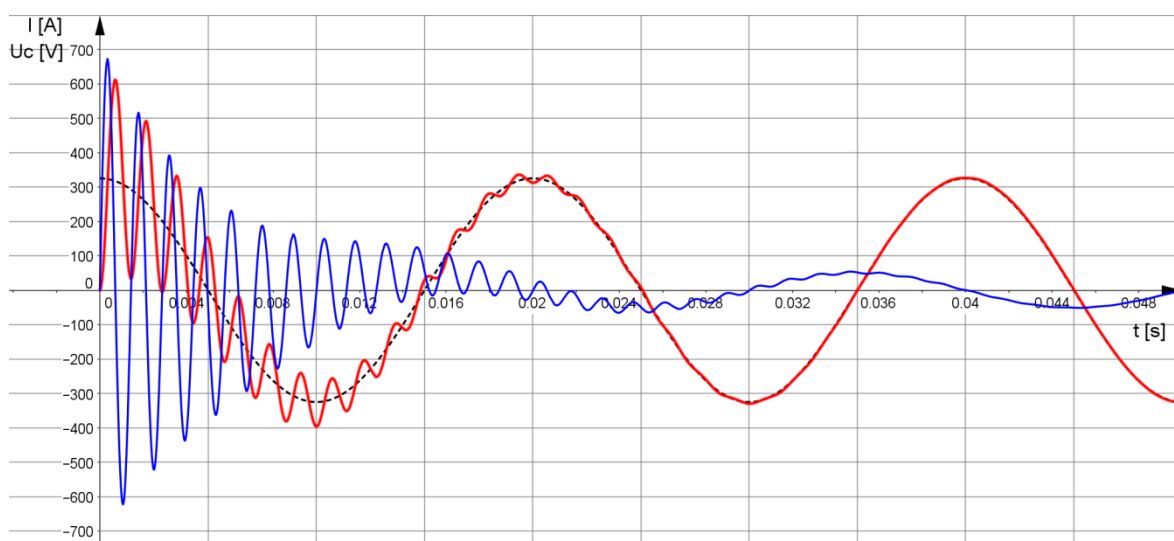


*Obr. 5.5: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou*

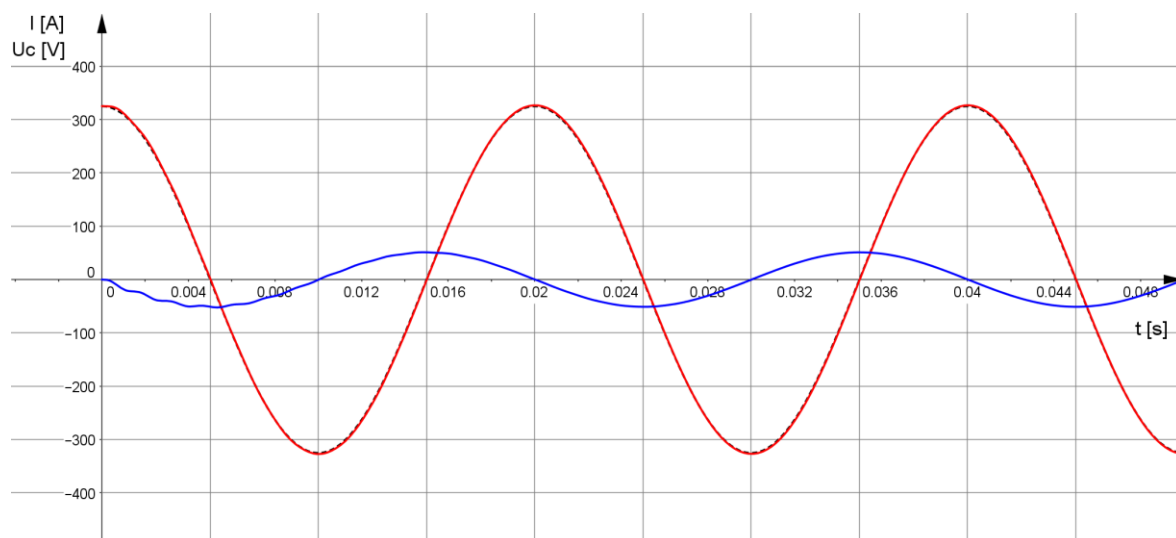


Obr. 5.6: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou

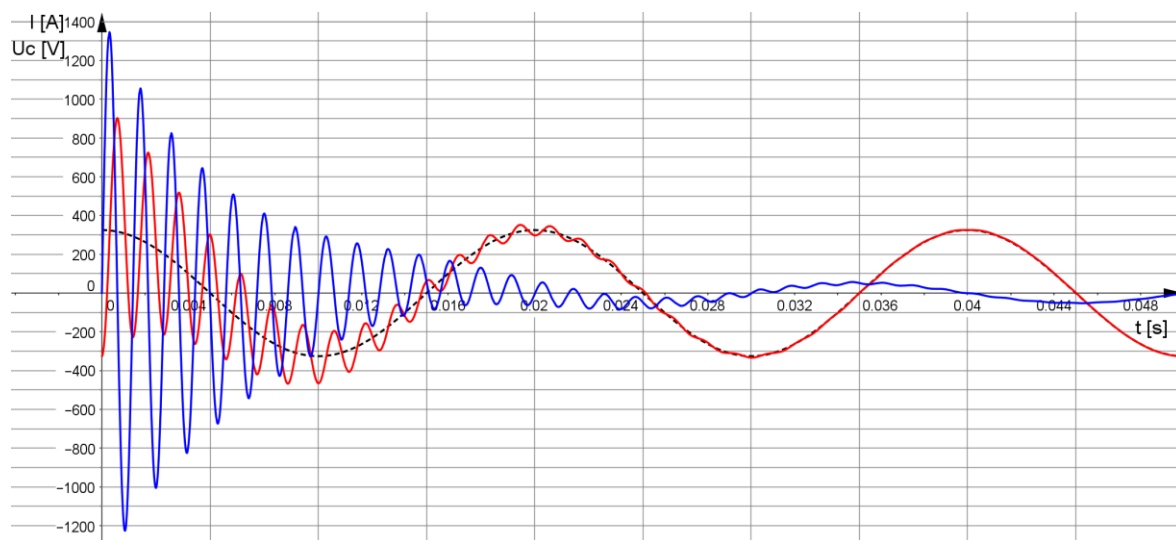
Následující tři obrázky naznačují případy různě nabitých kondenzátorů připojených v maximu síťového napětí. Nejpriznivější děj nastane při připojení kondenzátoru nabitého na kladné maximální napětí v maximu síťového napětí (obr. 5.8). Naopak nejvýraznější přechodový děj nastane připojením záporně nabitého kondenzátoru v maximu síťového napětí (obr. 5.9). Amplituda proudového rázu přesahuje hodnotu 1300 A, což odpovídá zhruba 26násobku ustáleného proudu.



Obr. 5.7: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

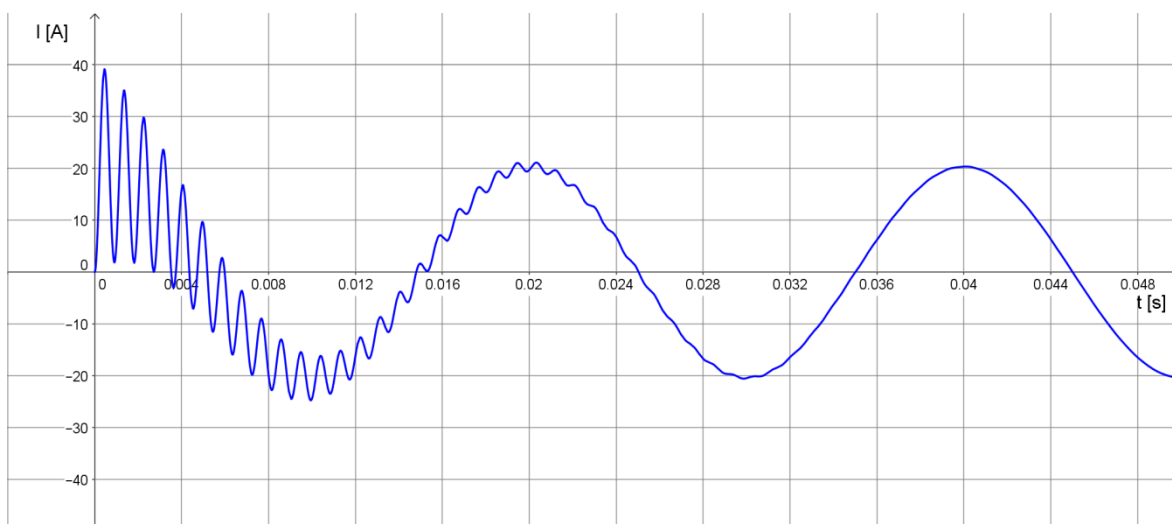


Obr. 5.8: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



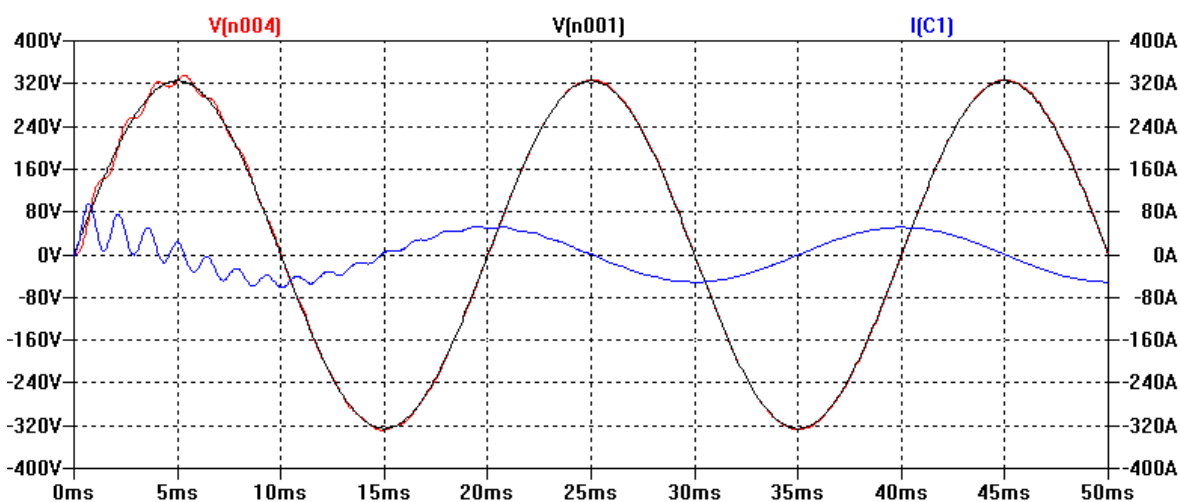
Obr. 5.9: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

Z hlediska doby trvání jsou přechodové děje při připínání kompenzačních kondenzátorů velmi rychlé. Z průběhů je patrný výskyt vysokých frekvencí, což má za následek zavádění impulzního rušení do sítě a navíc jsou negativně ovlivněny i samotné komponenty kompenzačního zařízení. Z obecných vztahů pro činitel zatlumení přechodového děje  $\beta_1$  a frekvenci vlastních kmitů  $\omega_{v1}$  vyplývá, že tyto vlastnosti přechodového děje jsou určeny parametry sítě a kondenzátoru. Na obr. 5.10 je ukázána změna velikosti kompenzačního kondenzátoru z původních 25 kVAr na 10 kVAr při stejných parametrech sítě. V porovnání s obr. 5.4 je viditelné zvýšení frekvence vlastních kmitů. Konkrétně frekvence vlastních kmitů vzrostla z původních  $4394,189 \text{ s}^{-1}$  (cca 700 Hz) na  $6950,411 \text{ s}^{-1}$  (cca 1100 Hz).



Obr. 5.10: Změna průběhu proudu vlivem snížení kapacity

Jako důkaz správnosti nasimulovaných průběhů v programu Geogebra dané výpočtem je provedena simulace přechodových dějů se stejnými parametry v programu LTspice. Na následujícím obrázku je zobrazen případ připojení nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí. Zbylé průběhy včetně schéma zapojení v prostředí LTspice jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 5.11: LTspice - Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou

### 5.1.3 Model prosté kompenzace s odporovým spínáním

K namodelování prosté kompenzace s odporovým spínáním využijí matematických výpočtů z kapitoly 4.2. Parametry sítě a kompenzační baterie uvažují stejné jako v předchozí kapitole. Pro sestavení a zobrazení dějů bylo nutné znát parametry spínacího prvku, tedy hodnotu předstihového odporu a časové zpoždění, kdy dojde k překlenutí předstihových kontaktů hlavními. V katalogu firmy Lovato [10] je udáno časové zpoždění v rozmezí 2 až 3 ms. V simulacích je uvažováno zpoždění 3 ms. Hodnota předstihového odporu byla naměřena na konkrétní kompenzačním rozvaděči využívající stykačů Lovato. Celkový předstihový odpor je složen ze dvou stejně velkých odporů. Naměřená hodnota odporu jedné odporové spirály u všech typů stykačů Lovato je  $2 \Omega$ , celkový odpor jedné fáze tedy  $4 \Omega$ .

Konkrétní předpisy funkcí pro proud a napětí na kondenzátoru s nulovými počátečními podmínkami jsou dány následujícími rovnicemi. Pro interval  $t < 0$ ;  $t_1 >$  platí:

$$i_2(t) = -37,142e^{-505,223t} + 0,680e^{-38266,008t} + 43,158 \sin(314,159t + 1,006) \quad (5.15)$$

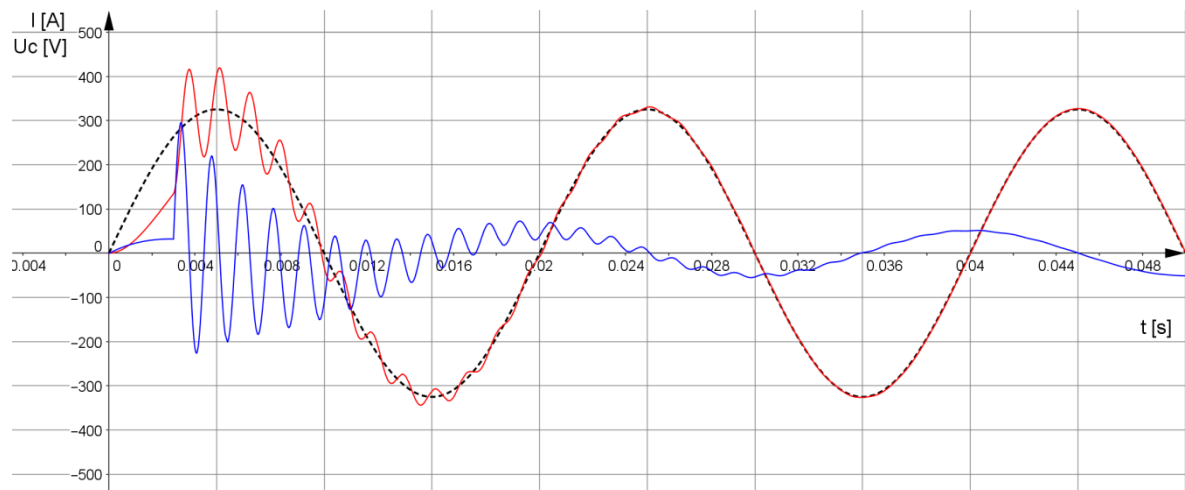
$$u_2(t) = 147,812e^{-505,223t} - 0,036e^{-38266,008t} + 276,212 \sin(314,159t - 0,565) \quad (5.16)$$

Po překlenutí předstihových kontaktů kontakty hlavními v čase  $t_1 = 3$  ms následuje kmitavý děj daný rovnicemi:

$$i_2(t) = e^{-154,846(t-0,003)}(1,719 \cos(4394,189(t - 0,003)) + 284,74 \sin(4394,189(t - 0,003)) + 51,083 \sin(314,16t + 1,566)) \quad (5.17)$$

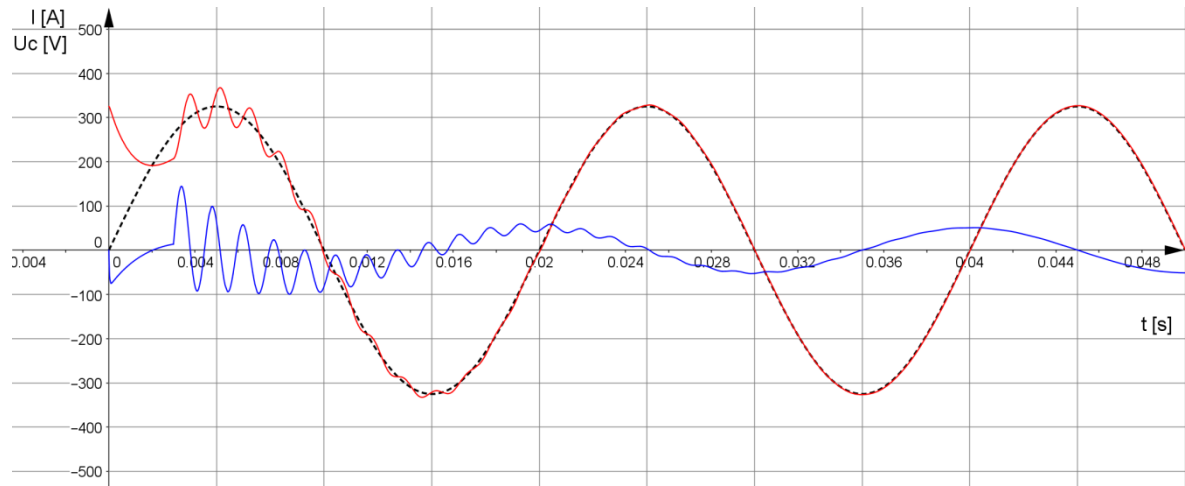
$$u_{2C}(t) = e^{-154,846(t-0,003)}(-129,12 \cos(4394,189(t - 0,003)) - 3,764 \sin(4394,189(t - 0,003)) + 326,934 \sin(314,16t - 0,005)) \quad (5.18)$$

Číselně vyjádřené funkce popisují průběh zobrazený na *obr. 5.12*. Děje v této kapitole byly nasimulovány se shodnými počátečními podmínkami jako pro případ prosté kompenzace, aby byly možné vyhodnotit vlivy odporového spínání.

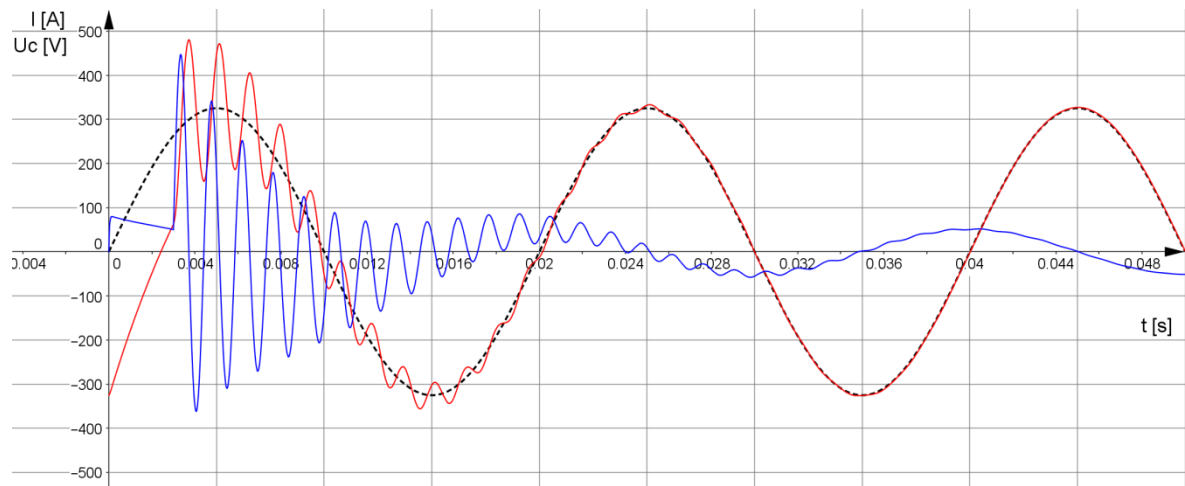


*Obr. 5.12: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou*

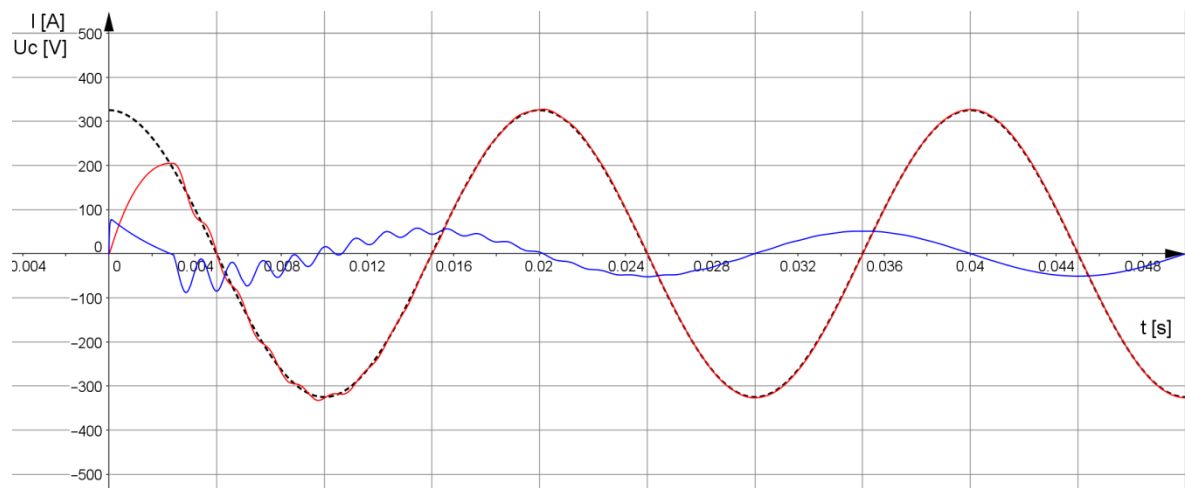




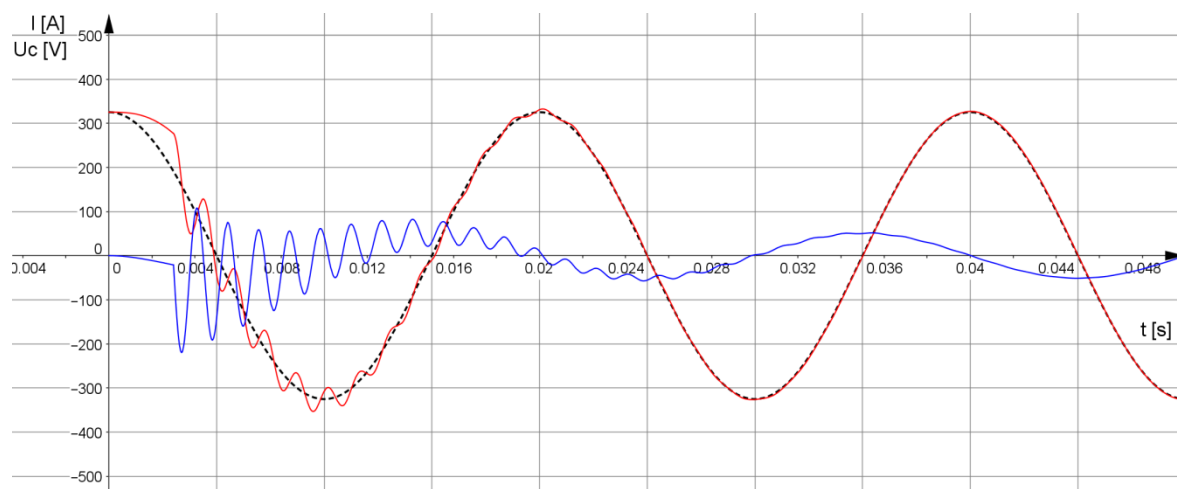
Obr. 5.13: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



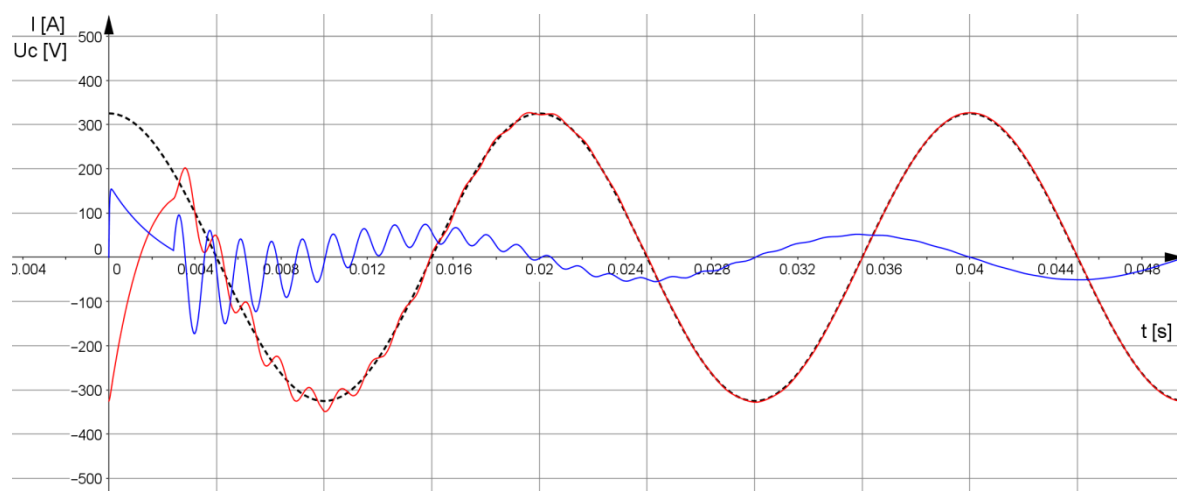
Obr. 5.14: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



Obr. 5.15: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

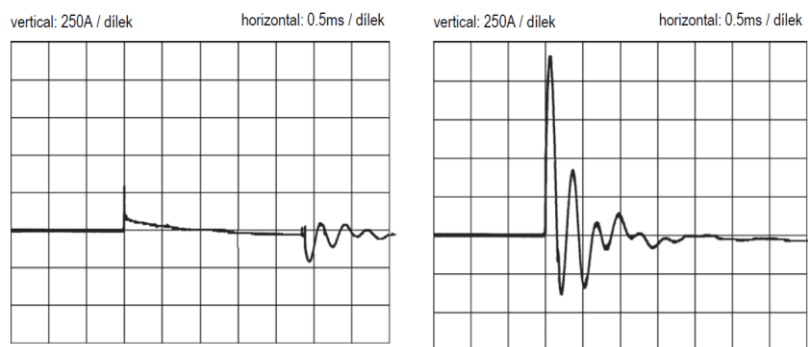


Obr. 5.16: Přípojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



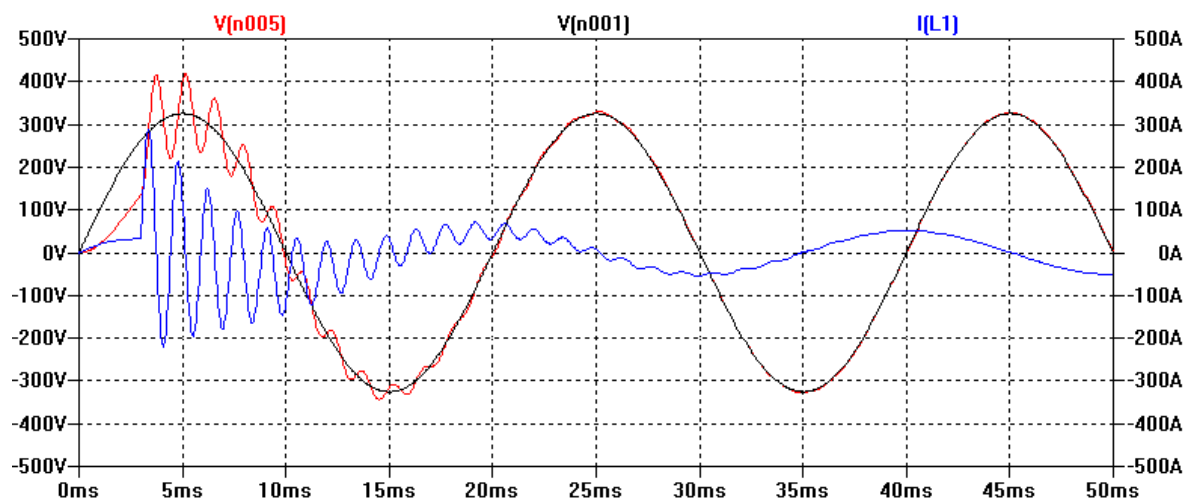
Obr. 5.17: Přípojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

Z obrázků je patrné, že ve většině případů je amplituda vlivem odporového spínání snížena oproti prosté kompenzaci. V některých případech mohou naopak být přechodové děje do obvodu zavedeny viz obr. 5.16. oproti obr. 5.8. Lze tedy říci, že snížení amplitudy proudového rázu je závislé na správném nastavení časového zpoždění a na okamžiku připnutí kondenzátoru na síťové napětí. Pro porovnání je uveden průběh proudu zveřejněný v katalogu firmy Benedict (obr. 5.18), kde levý graf zachycuje průběh proudu při sepnutí stykače s předřadnými kontakty a pravý graf průběh proudu při sepnutí stykače bez předřadných kontaktů.



Obr. 5.18: Odporové spínání (převzato z [9])

Pro kontrolu jsem provedl simulaci v programu Dynast a LTspise. Vybraný průběh je zobrazen na obr. 5.19. Zbylé průběhy včetně zapojení jsou dostupné v příloze 3.



Obr. 5.19: LTspice - Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou

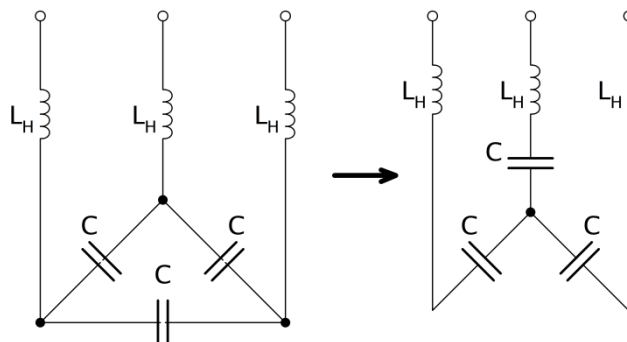
#### 5.1.4 Model chráněné kompenzace

Vycházím opět z jednoduchého jednofázového modelu na obr. 5.1. Jako spínací prvek je uvažován klasický stykač bez předstihových kontaktů a kompenzační zařízení značené na obr. 5.1 symbolem K představuje chráněnou kompenzační sekci složenou z kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky. Výrobci dodávají ochranné tlumivky již v kombinaci s kompenzačními kondenzátory obvykle nastavené na rezonanční kmitočet 189 Hz. Z katalogu od firmy ZEZ SILKO [4] jsou vybrány konkrétní hodnoty kompenzačního stupně tak, aby bylo možné porovnat průběhy proudu a napětí na kondenzátoru s případy kompenzace řešené v předchozích kapitolách.

Technical data		Technical data					
Type	Power of capacitor-reactor	Power of capacitor at 440 V	Capacitance of capacitor	Inductance of reactor	Rated current	Linearity current	Losses
Typ	Výkon bloku kondenzátor - tlumivka	Výkon kondenzátoru při 440 V	Kapacita kondenzátoru do trojúhelníku	Indukčnost tlumivky	Jmenovitý kapacitní proud	Proud linearity	Ztráty efektivní
	$Q_{komp}$ [kvar]	$Q_{kond}$ [kvar]	$C_{kond}$ [ $\mu$ F]	$L_t$ [mH]	$I_N = I_{IN}$ [A]	$I_{Lin}$ [A]	$P_{v-Therm}$ [W]
TKC1-01-189/400/440	0,9	1	3 x 5,5	43,129	1,28	2,0	5
TKC1-02-189/400/440	1,8	2	3 x 11,0	21,565	2,57	4,1	14
TKC1-02,5-189/400/440	2,2	2,5	3 x 13,7	17,252	3,21	5,1	21
TKC1-03,15-189/400/440	2,8	3,15	3 x 17,3	13,694	4,04	6,5	34
TKC1-05-189/400/440	4,4	5	3 x 27,4	8,627	6,41	10,3	37
TKC1-06,25-189/400/440	5,6	6,25	3 x 34,3	6,902	8,02	12,8	56
TKC1-07,5-189/400/440	6,7	7,5	3 x 41,1	5,751	9,62	15,4	22
TKC1-10-189/400/440	8,9	10	3 x 54,8	4,319	12,8	20,5	36
TKC1-12,5-189/400/440	11,1	12,5	3 x 68,5	3,455	16,0	25,6	50
TKC1-15-189/400/440	13,3	15	3 x 82,2	2,875	19,2	30,7	50
TKC1-20-189/400/440	17,8	20	3 x 109,6	2,169	25,6	41,0	82
TKA1-25-189/400/440	22,2	25	3 x 137,0	1,727	32,1	51,4	114
<b>TKA1-28,1-189/400/440</b>	<b>25,0</b>	<b>28,1</b>	<b>3 x 154,0</b>	<b>1,535</b>	<b>36,0</b>	<b>57,6</b>	<b>144</b>
TKA1-2x28,1-189/400/440	2x25	2 x 28,1	2 x 3 x 154	2 x 1,535	2 x 36	2 x 57,6	2 x 130
TKA1-30-189/400/440	26,7	30	3 x 164,4	1,438	38,5	61,6	144
TKA1-40-189/400/440	35,6	40	3 x 219,2	1,080	51,3	82,1	144
TKA1-50-189/400/440	44,4	50	3 x 274,0	0,864	64,1	102,6	145
TKA1-56,2-189/400/440	50,0	56,2	3 x 308,0	0,768	72,1	115,4	175
TKA1-75-189/400/440	66,6	75	3 x 411,0	0,576	96,2	153,9	186
TKA1-100-189/400/440	88,8	100	3 x 548,0	0,432	128,2	205,2	235

Obr. 5.20: Katalogové hodnoty vybrané chráněné kompenzační sekce[4]

Jak již bylo uvedeno, zapojení kondenzátorů do trojúhelníku je nutné převést na zapojení do hvězdy. Zapojení chráněné kompenzační sekce a její převod je naznačen obr. 5.21.



Obr. 5.21: Převod chráněné kompenzační sekce

Jednofázová reaktance se vypočte z katalogových hodnot vyznačených na obr. 5.20:

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_n} = \frac{440^2}{28,1 \cdot 10^3} = 6,89 \, \Omega \quad (5.19)$$

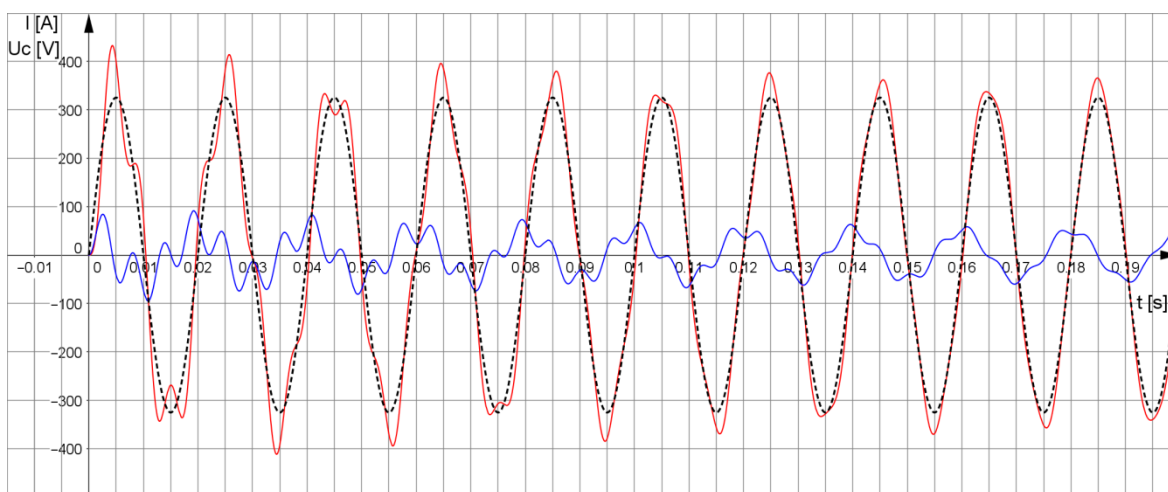
Jednofázová kapacita odpovídající reaktanci:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6,89} = 462 \, \mu F \quad (5.20)$$

Dosažením této kapacity, indukčnosti vedení  $L_S$  a odporu vedení  $R_S$  z kapitoly 5.1 do obecných vztahů vyjádřených v kap. 4.3 získáme z programu GeoGebra průběhy proudu a napětí na kondenzátoru. Obr. 5.22 ukazuje průběhy s nulovými počátečními podmínkami dané funkcemi:

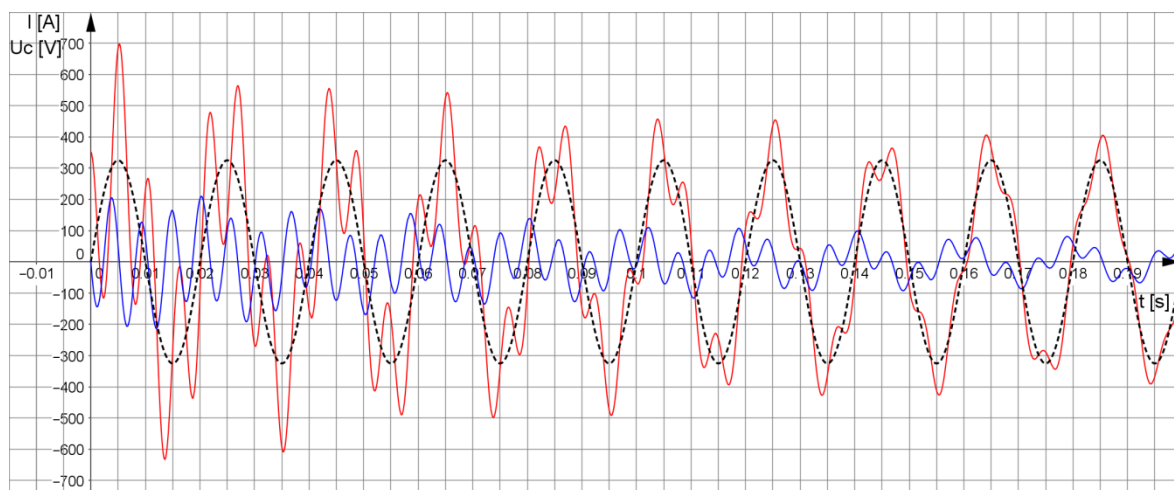
$$i_3(t) = e^{-9,826t}(-51,023 \cos(1149,130t) - 0,507 \sin(1149,130t)) + 51,024 \sin(314,159t + 1,566) \quad (5.21)$$

$$u_{3C}(t) = e^{-9,826t}(1,776 \cos(1149,130t) - 96,090 \sin(1149,130t)) + 351,538 \sin(314,16t - 0,005) \quad (5.22)$$

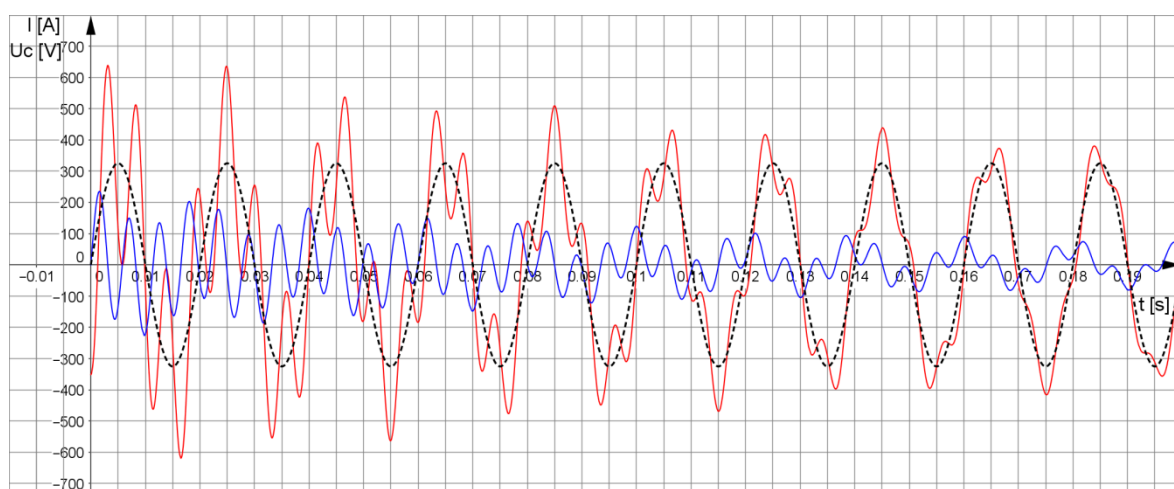


Obr. 5.22: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou

Kondenzátor se vlivem připojení ochranné tlumivky nabije na napětí vyšší než maximální hodnota síťového napětí. V simulacích uvažují, že kondenzátor se může nabít přibližně na maximální hodnotu ustáleného napětí. Připojení chráněné kompenzační sekce s kladně a záporně nabitým kondenzátorem při průchodu napětí nulou jsou vykresleny na *obr. 5.23* a *5.24*. V těchto případech je zřejmý vliv tlumivky na amplitudu proudového rázu v porovnání s připojením prostého kondenzátoru za stejných podmínek připnutí. Amplituda se sníží z původního 13násobku na hodnotu čtyř násobku ustáleného proudu.

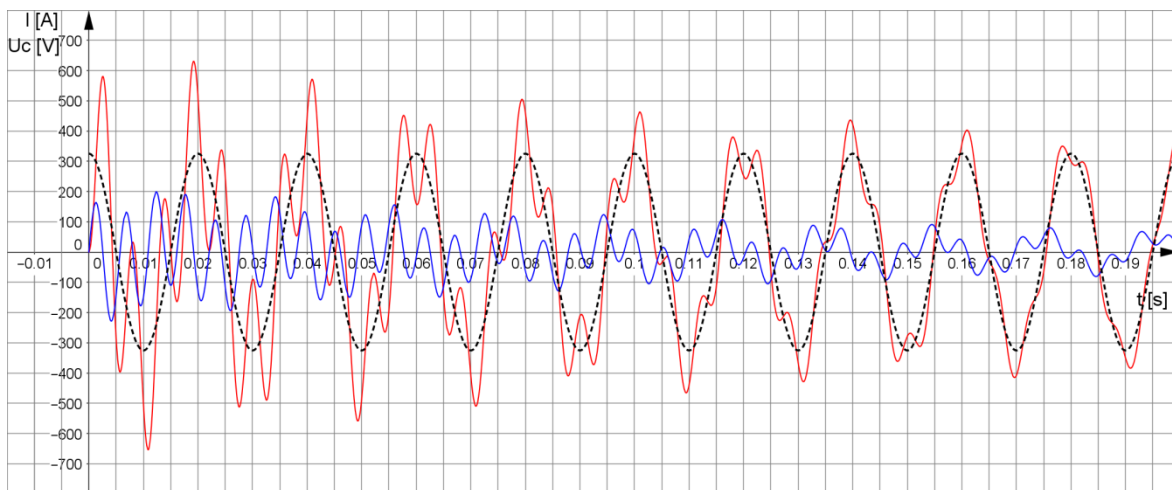


*Obr. 5.23: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou*

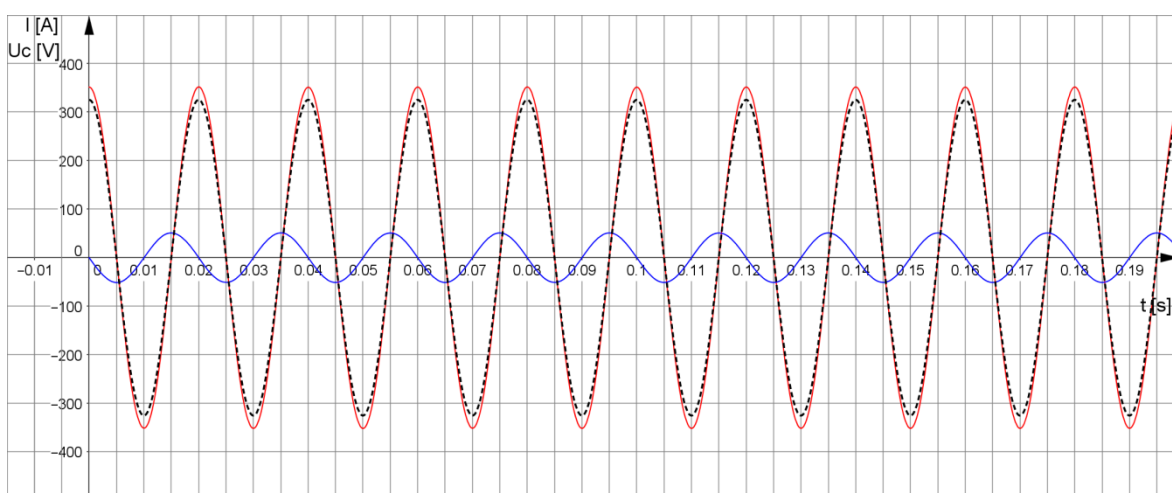


*Obr. 5.24: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou*

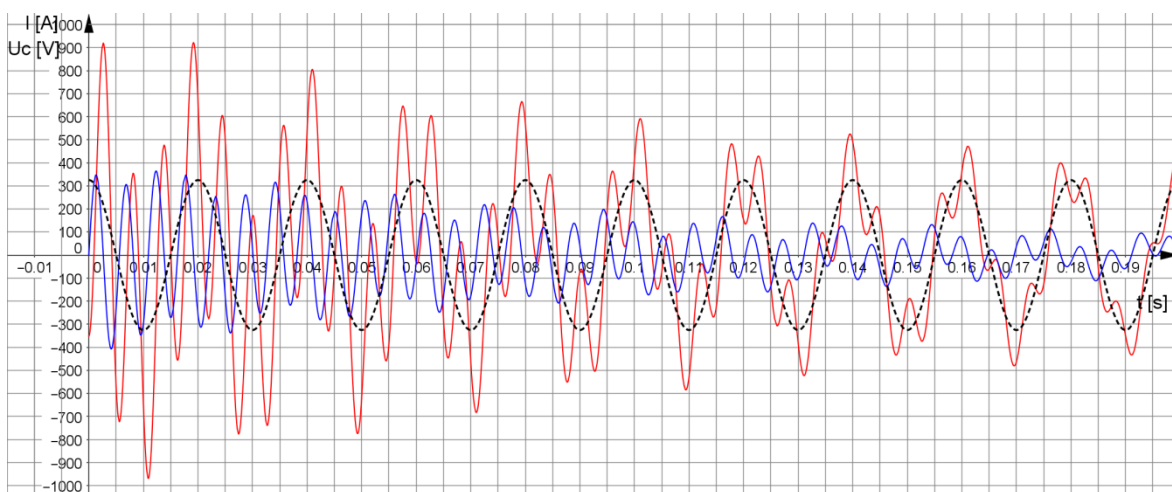
Následující grafy zobrazují připnutí chráněné kompenzační sekce v maximu síťového napětí. Pokles amplitudy je viditelný hlavně v nejhorsím případě na *obr. 5.27*, kdy amplituda je rovna zhruba 7násobku ustáleného proudu oproti 27násobku v případě prosté kompenzace. Nejideálnější případ připnutí, tedy připnutí nabitého kondenzátoru v maximu napětí zobrazuje *obr. 5.26*.



Obr. 5.25: Přípojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



Obr. 5.26: Přípojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



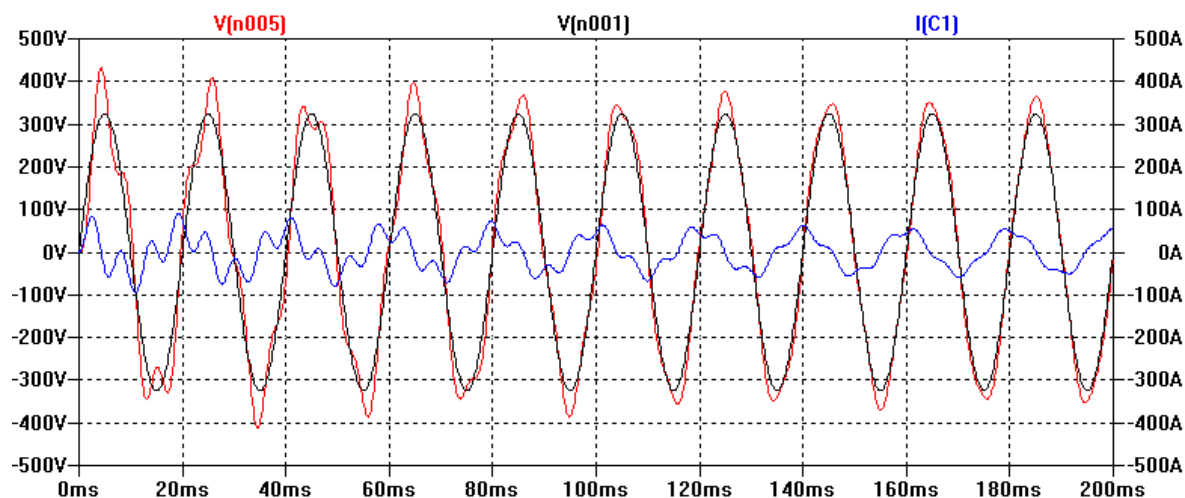
Obr. 5.27: Přípojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napětí maximem

Simulacemi byly potvrzeny důvody zapojování tlumivek do série s kondenzátory. Vlivem navýšení indukčnosti obvodu dojde ke snížení proudových špiček a frekvence vlastních kmitů, která je dána nastavením kompenzačního stupně. Kompenzační stupeň v našem případě je nastaven na frekvenci 189 Hz. Skutečná frekvence se však nepatrně liší, neboť celková indukčnost obvodu je dána součtem indukčnosti sítě a tlumivky.

$$f = \frac{\omega_{v3}}{2 \cdot \pi} = \frac{1149,130}{2 \cdot \pi} \cong 183 \text{ Hz} \quad (5.23)$$

Jako negativum je možné považovat prodloužení doby trvání přechodového děje a navýšení napětí na kondenzátoru. Při nejhorším přechodovém ději vzrůstá napětí téměř až na hodnotu tří násobku jmenovitého napětí kondenzátory, což je hodnota, která je považována za hodnotu maximálního povoleného špičkového přepětí na kondenzátoru.

Na *obr. 5.28* je pro kontrolu zobrazen případ připojení nenabitého kondenzátoru připnutého v nule síťového napětí nasimulovaný v programu LTspice. Ostatní případy nasimulované v programu LTspice včetně zapojení jsou zobrazeny v příloze 4.

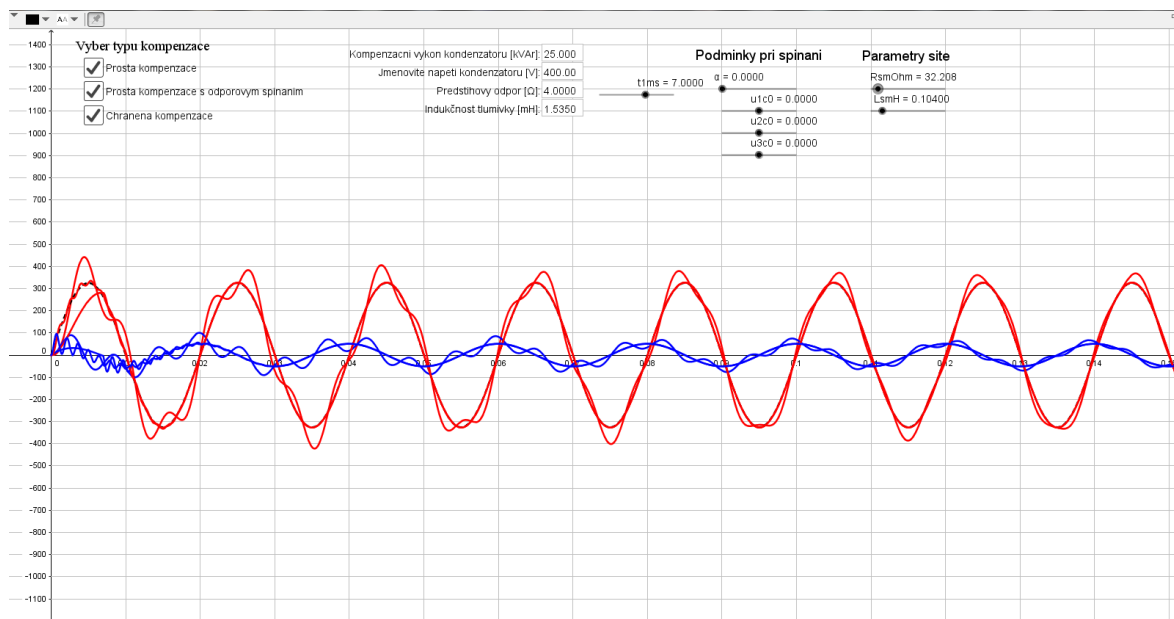


Obr. 5.28: LTspice - Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou

### 5.1.5 Popis programu

S využitím programu GeoGebra a možností exportu dynamického pracovního listu jako webovou stránku (html) byl vytvořený dynamický pracovní list pro připínání prvního stupně za účelem možnosti sledovat vliv různých faktorů (velikosti kompenzačního stupně, podmínek při sepnutí, parametrů sítě) na průběh proudu a napětí na kondenzátoru. Uživatelské prostředí je ukázáno na *obr. 5.29*.

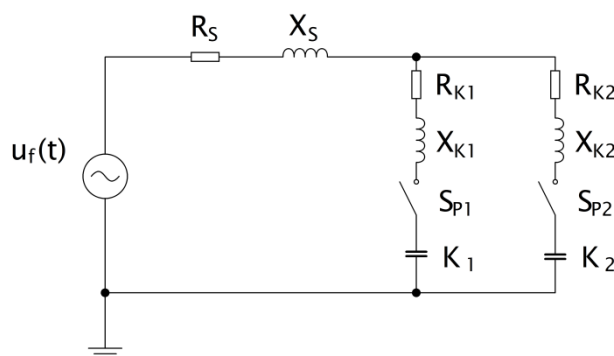
V levém horním rohu je možné zvolit typ kompenzace. Výběrem typu kompenzace se na obrazovce objeví průběh proudu (modře) a napětí na kondenzátoru (červeně) a parametry, které je možné pro daný typ kompenzace zadat či měnit. Mezi podmínky při spínání patří, jak již bylo dříve zmíněno, okamžik připnutí na síťové napětí a počáteční nabití kondenzátoru. Tyto parametry je možné měnit pomocí posuvníků. Posuvník  $\alpha$  reprezentuje okamžik připnutí na síťové napětí a posuvníky u1c0 až u3c0 reprezentují počáteční napětí na kondenzátoru. Parametry sítě je možné měnit posuvníky RsmOhm a LsmH, kde krajní hodnoty jsou dopočteny dle postupu výpočtu v kapitole 5.1.1 pro minimální a maximální hodnoty prvků sítě uvedených v příloze 1. Pro případ prosté kompenzace s odporovým spínáním lze pomocí posuvníku t1ms měnit čas zpoždění hlavních kontaktů za předstihovými. Do textových polí se zadávají katalogové hodnoty kompenzačního výkonu kondenzátoru, jmenovitého napětí kondenzátoru, indukčnosti ochranné tlumivky a hodnota předstihového odporu stykače.



Obr. 5.29: Program - připínání prvního stupně

## 5.2 Připínání druhého kompenzačního stupně

V kapitole jsou pomocí programu LTspice nasimulované děje, které vznikají připínáním dalších kompenzačních stupňů. V simulacích je uvažován kompenzační rozvaděč se dvěma stejnými stupni. Simulace jsou provedeny, stejně jako v kapitole 5.1, pro případy prosté kompenzace, kompenzace s odporovým spínáním a chráněné kompenzace. Při simulacích vycházím z jednoduchého náhradního schéma zobrazeného na obr. 5.30, kde  $R_S$  a  $L_S$  představují parametry sítě,  $S_{P1-2}$  spínací prvky,  $K_{1-2}$  kompenzační zařízení (kompenzační kondenzátor či chráněnou kompenzační sekci) a  $R_{K1-2}$  a  $X_{K1-2}$  parametry přívodních kabelů k jednotlivým kondenzátorům.



Obr. 5.30: Náhradní schéma dvoustupňové kompenzace

### 5.2.1 Prostá kompenzace

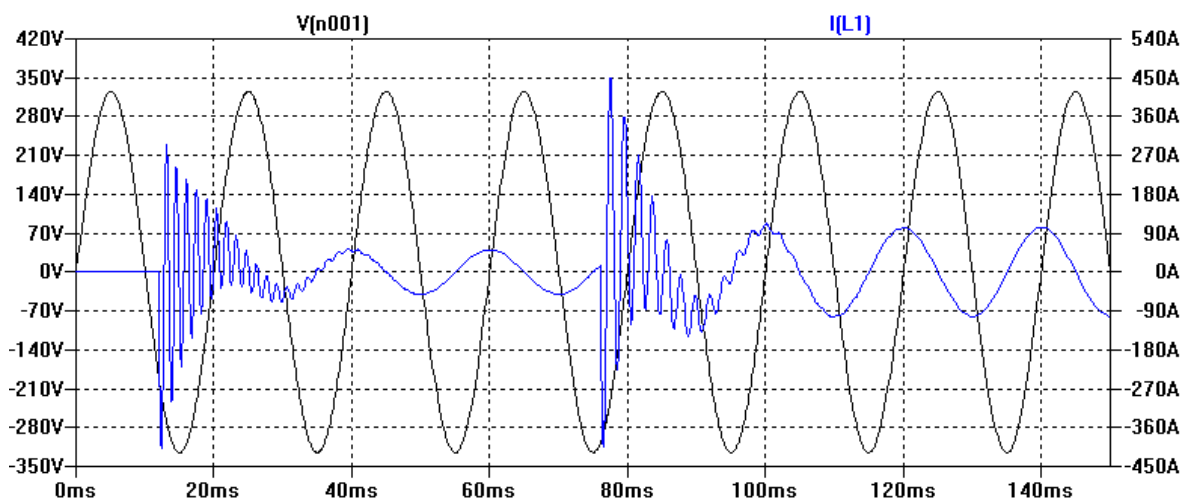
K sestavení modelu dvoustupňové prosté kompenzace uvažují již vypočtené parametry z kapitoly 5.1 a 5.2 ( $R_S$ ,  $L_S$  a  $C$ ). Přívodní vodiče k jednotlivým kondenzátorům uvažují vzhledem ke jmenovité hodnotě proudu kondenzátoru dané v katalogu výrobce ZEZ SILKO [4]. Doporučený průřez připojovacích slaněných měděných vodičů ke kondenzátoru 25 kVar je  $10 \text{ mm}^2$ . V katalogu výrobce kabelů [13] jsou uvedeny parametry kabelu  $R = 1,83 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $L = 0,28 \text{ mH}/\text{km}$ . Délku kabelu odhadují na 1,5 m.



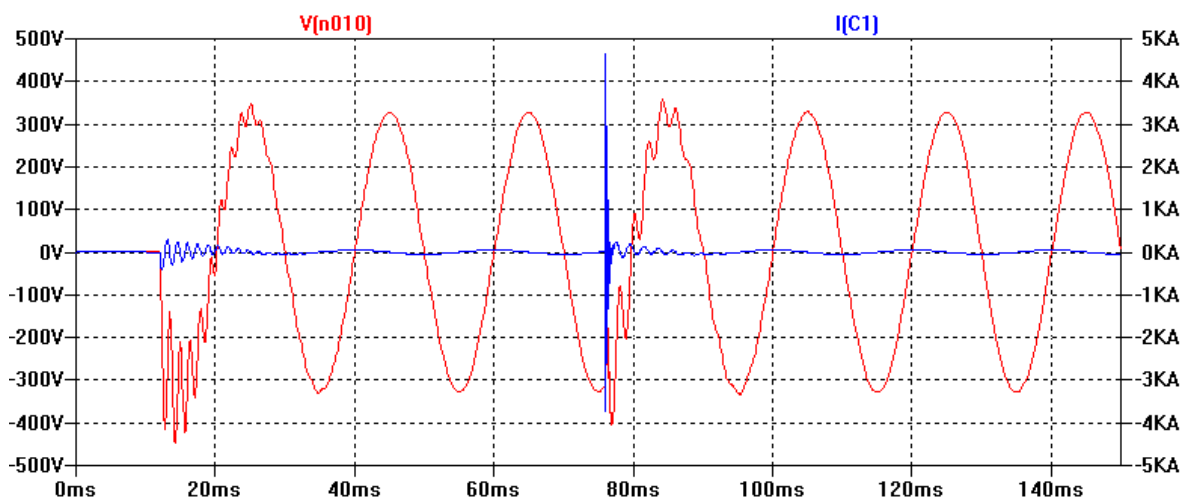
$$R_{K1} = R_{K2} = R \cdot l_k = 1,83 \cdot 0,0015 = 2,745 \text{ m}\Omega \quad (5.24)$$

$$L_{K1} = L_{K2} = L \cdot l_k = 0,28 \cdot 0,0015 = 0,42 \text{ }\mu\text{H} \quad (5.25)$$

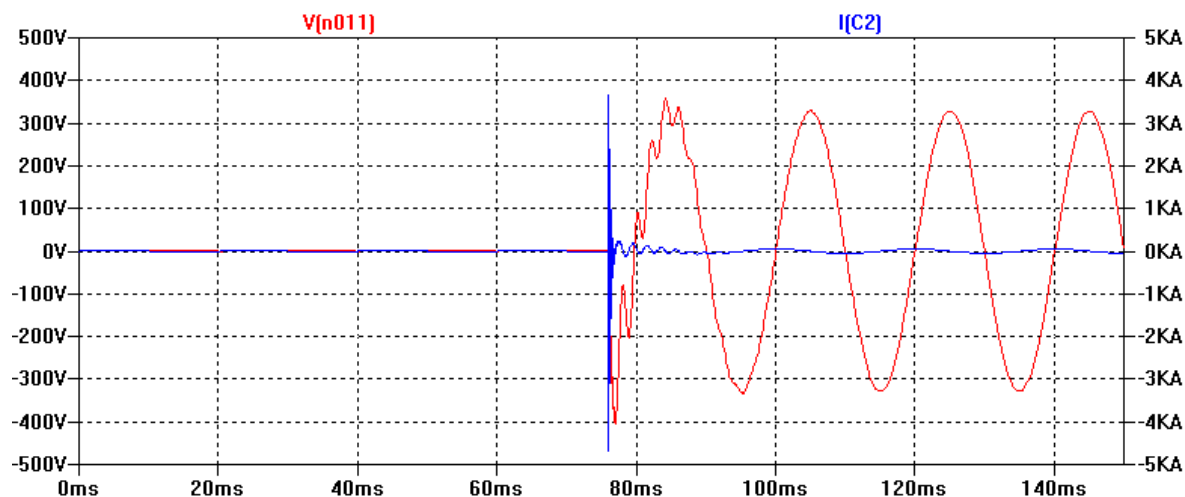
Model sestavený v prostředí LTspice je zobrazen v příloze 5. Zcela náhodný stav sepnutí je ukázán na obr. 5.31 až 5.33. Jedná se o stav dvoustupňového připnutí nenabitých kondenzátorů v časech 12 ms a 76 ms. Z průběhů je patrné, že připnutím druhého stupně se zcela změní proudové poměry především ve větvích tvořené kompenzačními stupni. Nastanou výrazné proudové rázy, v mém náhodném stavu více než 100násobek jmenovitého proudu kondenzátoru. Připnutím druhého stupně je ohrožen nejen spínaný kondenzátor  $C_2$ , ale i kondenzátor  $C_1$  již připnutý.



Obr. 5.31: Náhodný stav – průběh síťového napětí a proudu

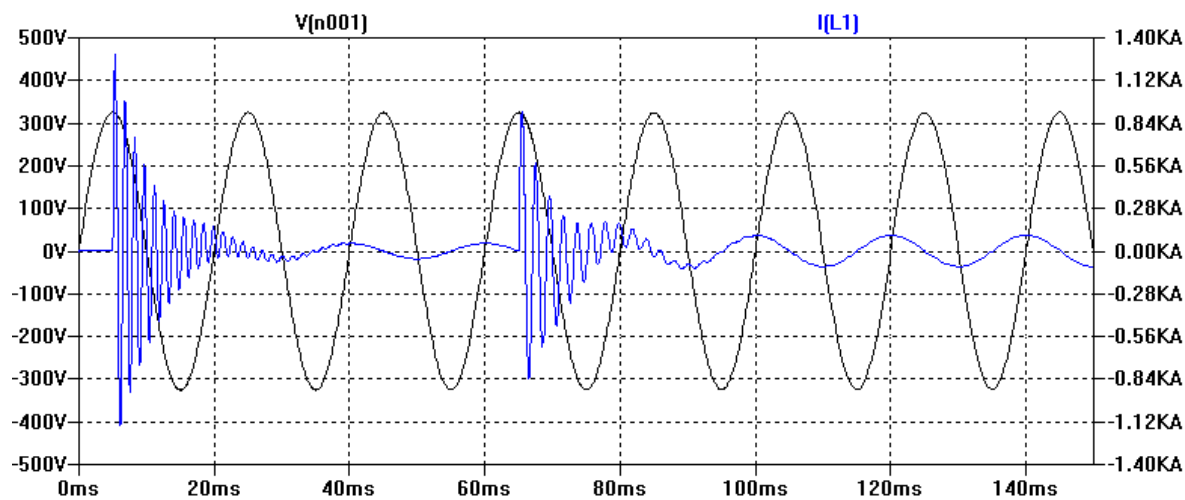


Obr. 5.32: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na prvním kondenzátoru

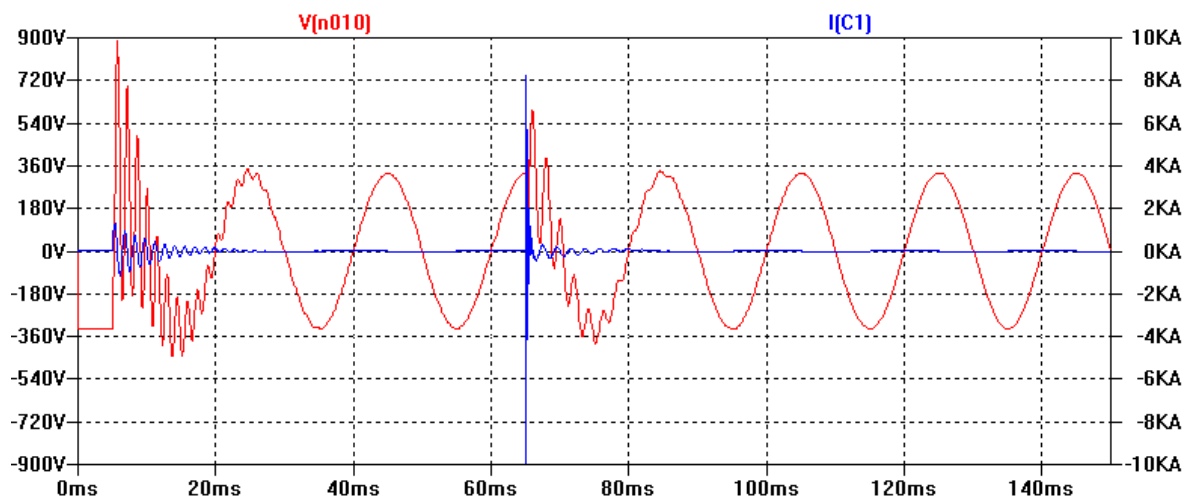


Obr. 5.33: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru

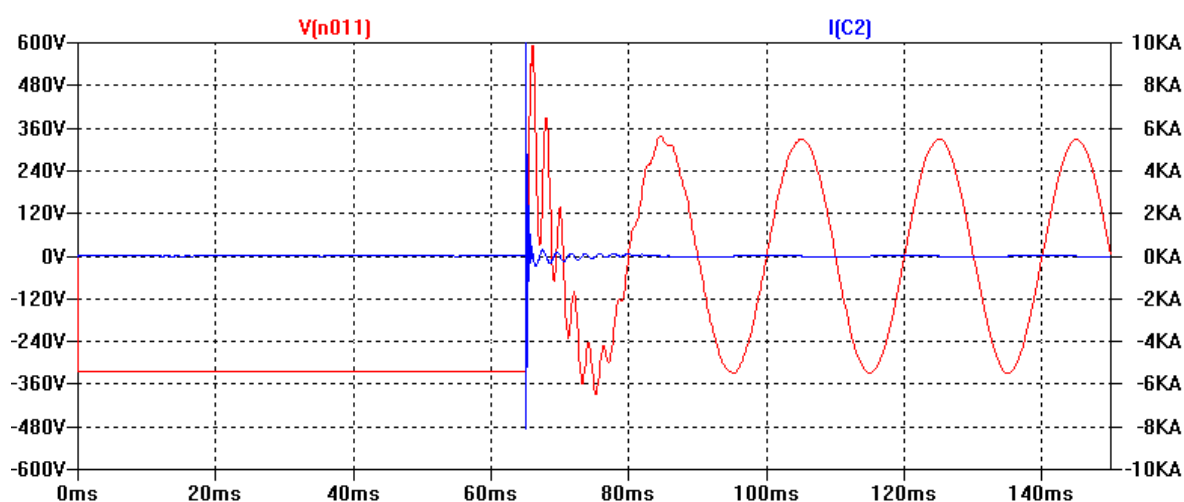
Nejhorší stavy, které mohou nastat, byly dokázány simulacemi v kapitole 5.2. Obecně jde o případy připnutí nabitých kondenzátorů v okamžiku opačné amplitudy síťového napětí oproti nabití kondenzátoru (zde připnutí záporně nabitých kondenzátorů v kladném maximu síťového napětí). Pro druhý kondenzátor představuje síťové napětí napětí na prvním kondenzátoru. V simulacích je bráno, že v ustáleném stavu je průběh napětí na prvním kondenzátoru totožný s průběhem síťového napětí.



Obr. 5.34: Nejhorší stav – průběh síťového napětí a proudu



Obr. 5.35: Nejhorší stav – průběh napětí a proudu na prvním kondenzátoru



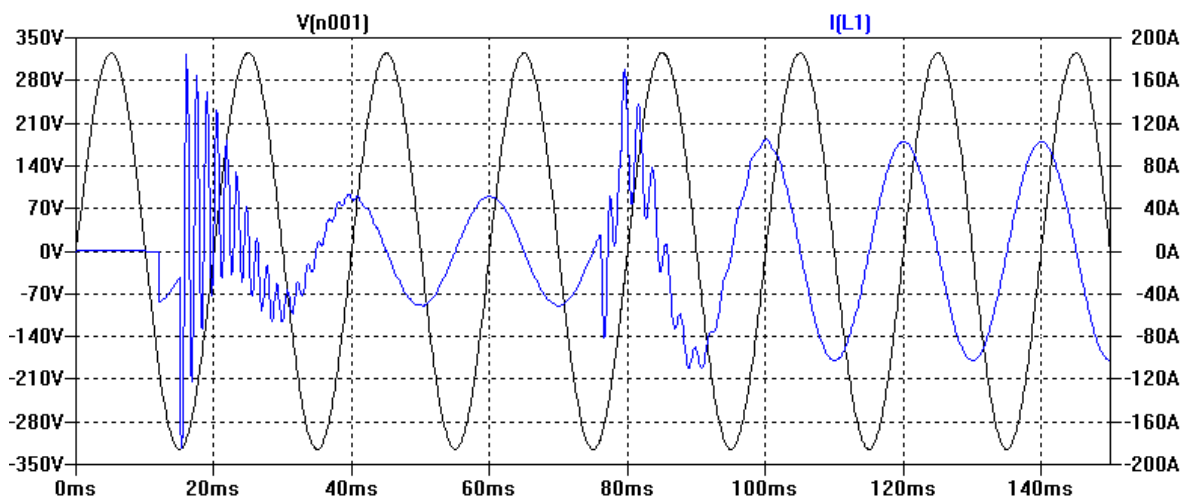
Obr. 5.36: Nejhorší stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru

Z průběhů proudu a napětí při nejhorším stavu je patrný proudový ráz ve větvích s kompenzačními kondenzátory s amplitudou až 10 kA, což odpovídá téměř 280násobku jmenovité proudu. Síťový proud nabývá řádově 10krát nižších hodnot amplitudy proudového rázu, přičemž proudový ráz v síti vzniklý připnutím prvního stupně je o něco větší než proudový ráz způsobený připnutím dalšího stupně.

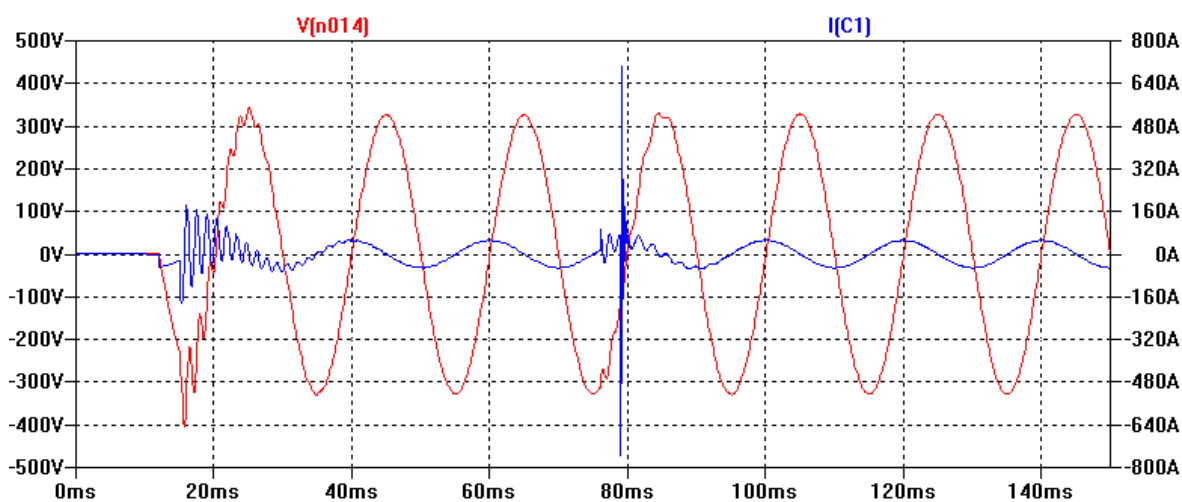
Další kombinace počátečních podmínek při připnutí druhého stupně jsou uvedeny v příloze 5. Průběhy v příloze jsou zaměřeny především na druhý kompenzační stupeň. Zvoleny jsou případy připnutí nenabitého kondenzátoru v nule napájecího napětí a nejideálnější případ nabitého kondenzátoru připojeného v maximu napájecího napětí.

## 5.2.2 Prostá kompenzace s odporovým spínáním

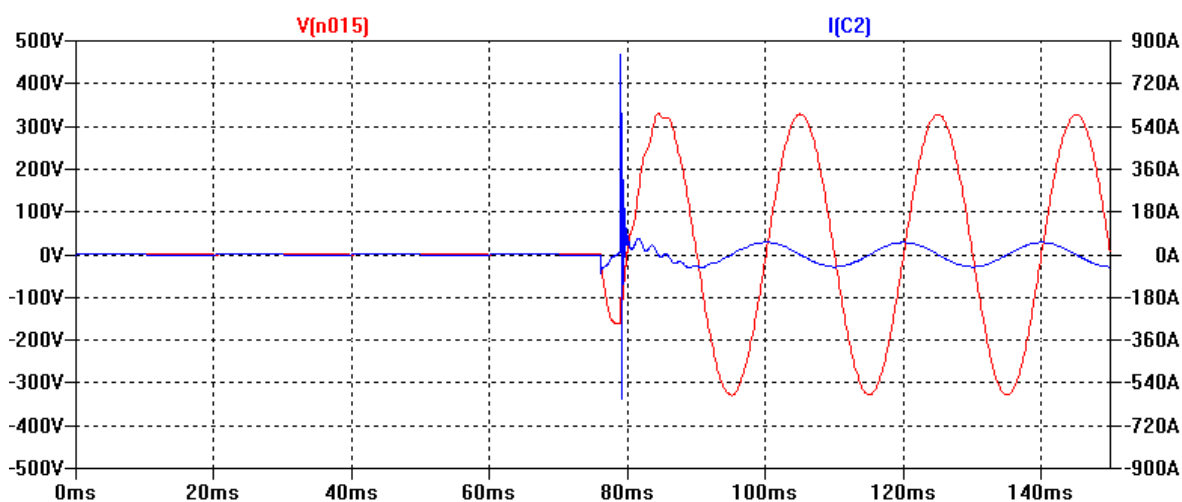
Nasimulované děje ukazují jednu z možností jak omezovat proudové rázy. Jedná se o použití speciálních stykačů s odporovým spínáním. Pro porovnání byly voleny stejné časy sepnutí kompenzačních stupňů. Hlavní kontakty stykačů spínají se zpožděním 3 ms za předstihovými.



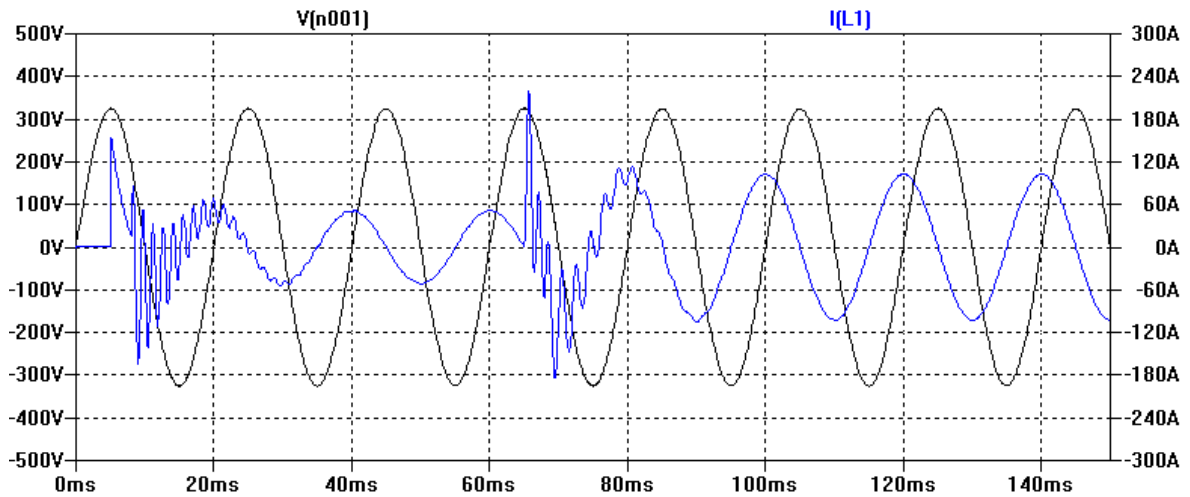
Obr. 5.37: Náhodný stav – průběh síťového napětí a proudu



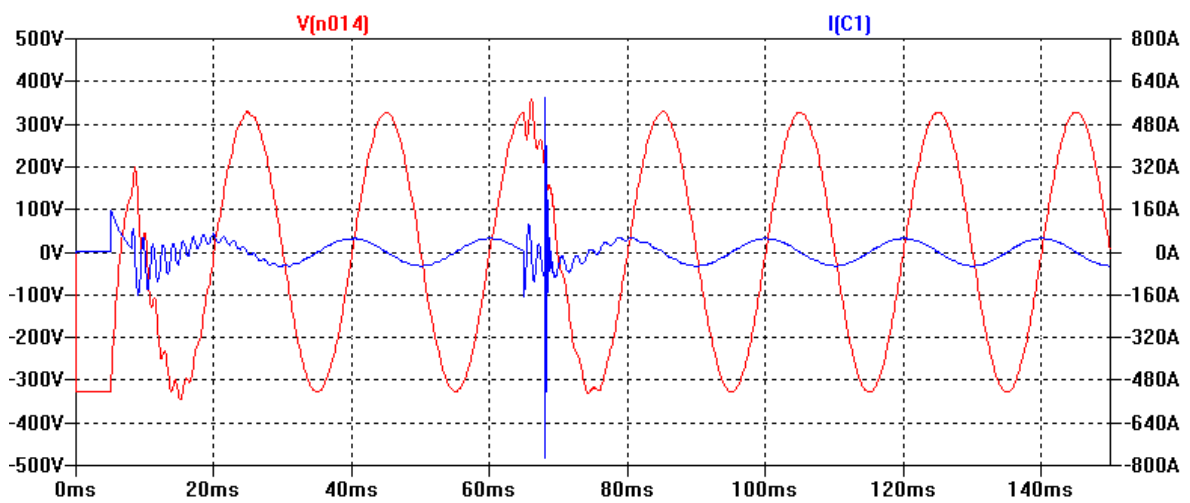
Obr. 5.38: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na prvním kondenzátoru



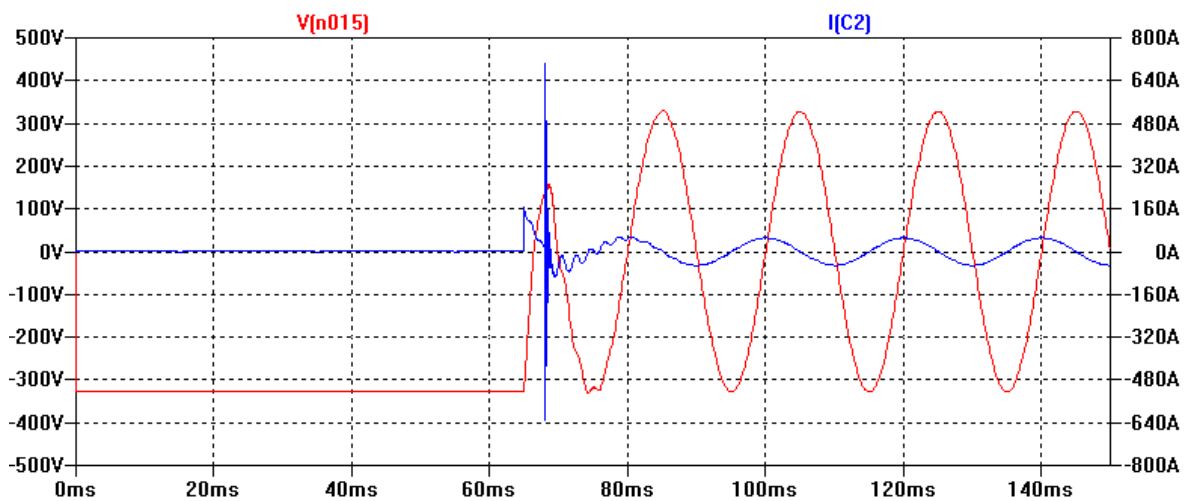
Obr. 5.39: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru



Obr. 5.40: Nejhorší stav – průběh síťového napětí a proudu



Obr. 5.41: Nejhorší stav – průběh napětí a proudu na prvním kondenzátoru

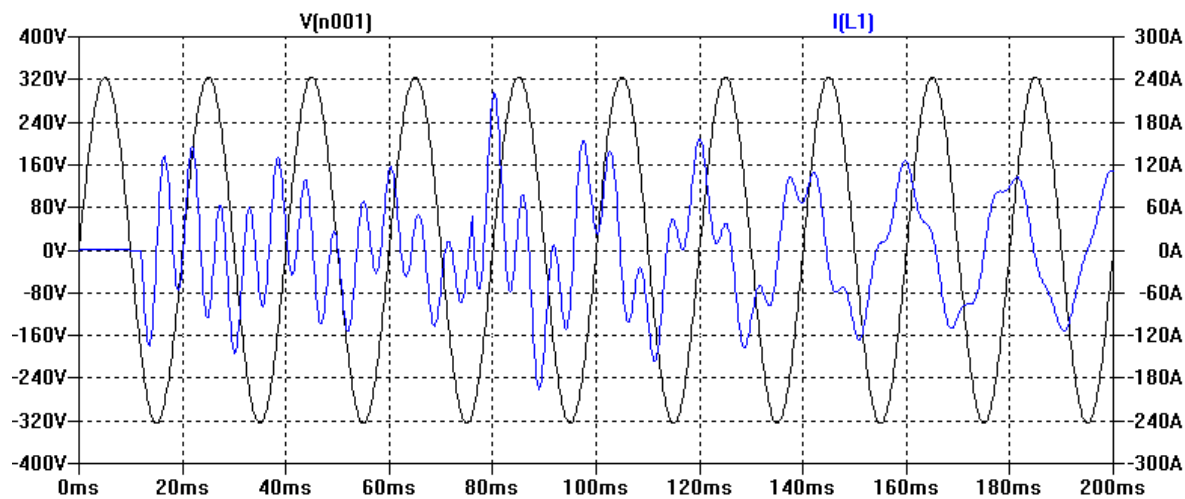


Obr. 5.42: Nejhorší stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru

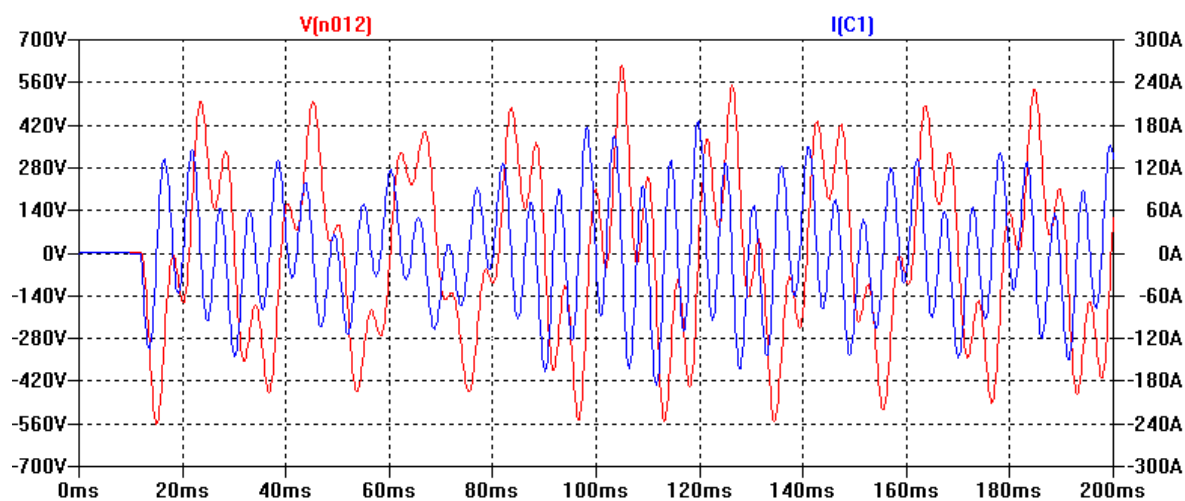
V porovnání s průběhy v kapitole 5.2.2 je patrné celkem výrazné snížení proudových rázů. V příloze 6 uvedeny další vybrané okamžiky připojení druhého stupně.

### 5.2.3 Chráněná kompenzace

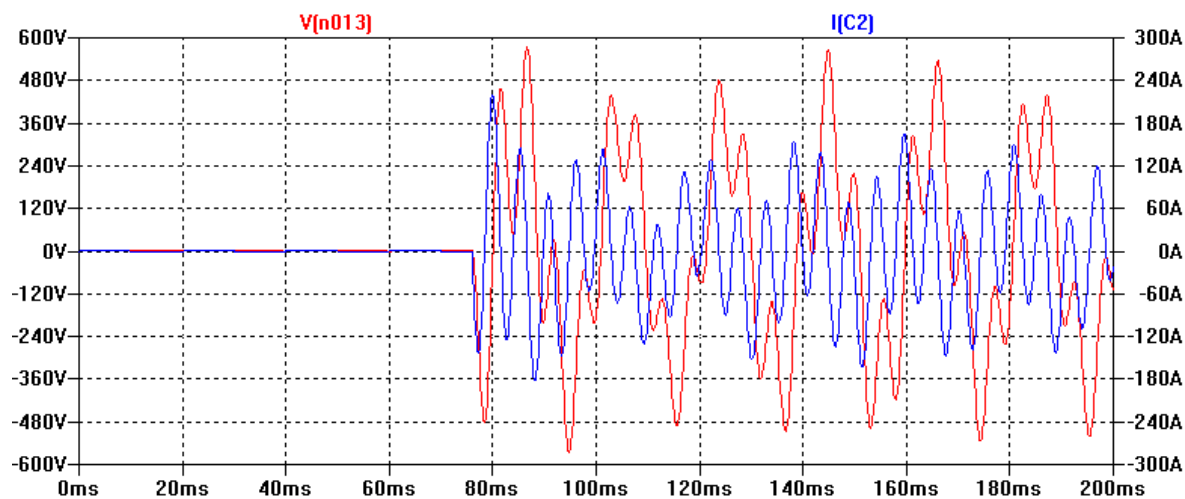
Náhodný stav sepnutí je zobrazen na obr. 5.43 až 5.45. Časy spínání stupňů jsou voleny stejně jako v případě prosté kompenzace. V porovnání náhodného stavu prosté kompenzace je patrné, že nenastanou výrazné přechodové děje s velkými proudovými rázy.



Obr. 5.43: Náhodný stav – průběh síťového napětí a proudu

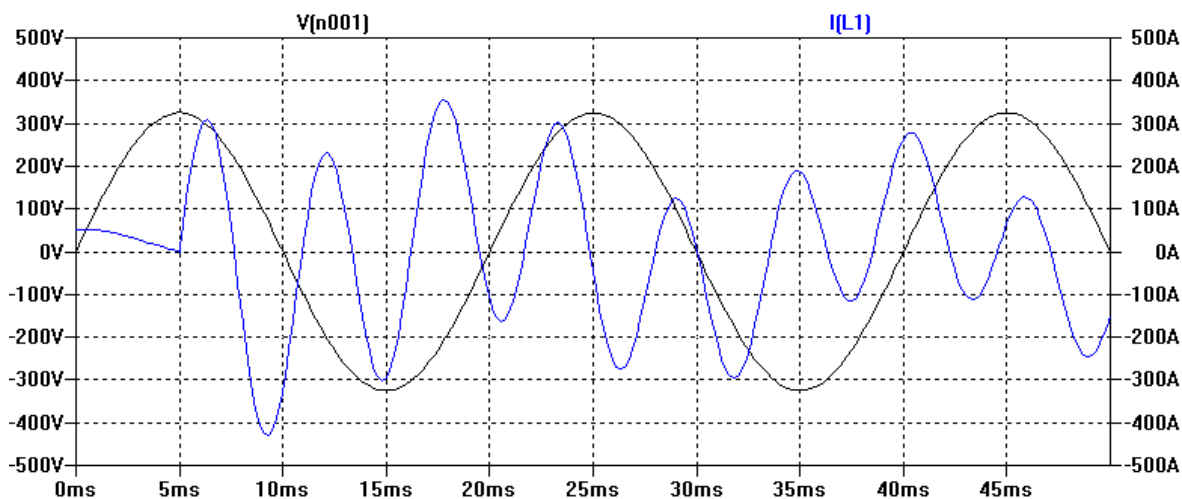


Obr. 5.44: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na prvním kondenzátoru

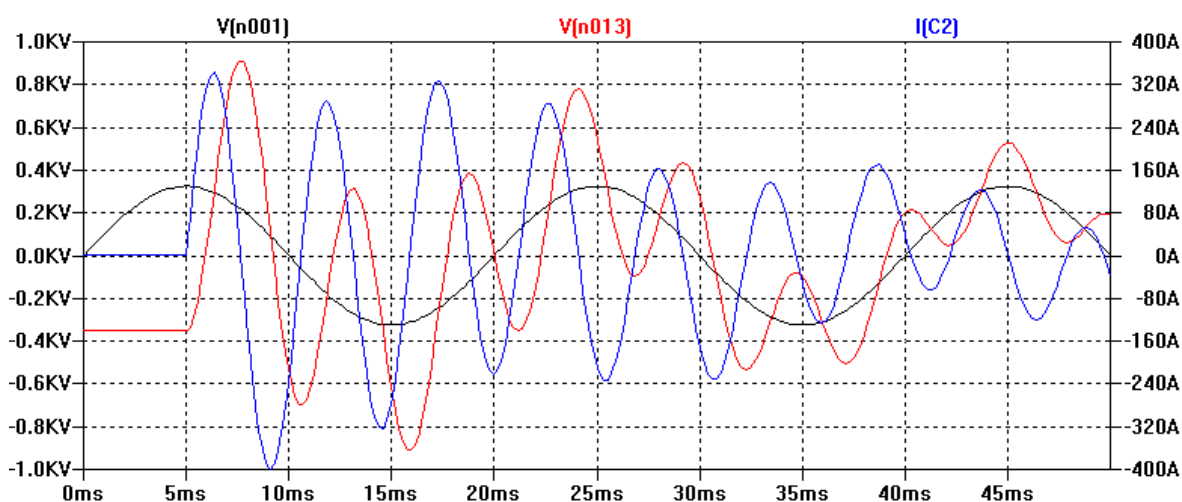


Obr. 5.45: Náhodný stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru

Obr. 5.46 a 5.47 zobrazují případ připnutí záporně nabitého kondenzátoru v maximu síťového napětí, teoreticky nejhorší případ. Vzhledem k delší době ustálení přechodového děje bylo zvoleno vyšší zpoždění připnutí druhého stupně, aby bylo možné vystihnout přesně definovaný okamžik a bylo tak možné porovnat stavy s předchozími typy kompenzace.



Obr. 5.46: Nejhorší stav – průběh síťového napětí a proudu



Obr. 5.47: Nejhorší stav – průběh napětí a proudu na druhém kondenzátoru

Zavedením ochranné tlumivky dojde téměř ke srovnatelnému snížení proudových rázu jako pomocí stykačů s odporovým spínáním. Výhodou je nižší frekvence přechodového děje, nevýhodou může být delší doba trvání přechodových dějů.

## 6 Závěr

Cílem práce bylo poukázat na skutečnost, že zavedení kompenzace jalového výkonu přináší nejen zlepšení poměrů v distribuční síti, ale i negativní vlivy způsobené provozem kompenzačních zařízení. Zkoumány jsou přechodové děje vznikající při připínáním kompenzačních stupňů k síti a opatření, která vedou k jejich zmírnění.

Způsob připínání a typ kompenzačního stupně má hlavní vliv na děje způsobené připínáním kompenzačních stupňů. V kapitole 5 byly nasimulované tři základní případy kompenzace tak, aby bylo možné jednotlivé případy vzájemně porovnat a vyhodnotit jejich klady a zápory.

Prvním z případů byla prostá kompenzace. Jak je možno vidět z výsledků simulací v kapitole 5.1.2 a 5.2.1, je důležité za jakých počátečních podmínek jsou kondenzátory k síti připojeny. Počáteční podmínky byly voleny tak, aby byly ukázány mezní stavy, extrémy, které mohou nastat. Ve většině případů zavádí prostá kompenzace do sítě děje s vysokými proudovými rázy a frekvencemi. Zvolením vhodného okamžiku připnutí a vhodného počátečního nabití kondenzátoru je možné se přechodových dějů úplně vyhnout (*obr. 5.8*) nebo je alespoň zmírnit (*obr. 5.4*).

První způsob omezení přechodových dějů je způsob použití speciálních stykačů s odporovým spínáním. Simulace jsou provedeny v kapitolách 5.1.3 a 5.2.2. Zavedením odporových stykačů vždy dosáhneme snížení počátečních proudových rázů, ale přechodový děj po překlenutí předstihových kontaktů kontakty hlavními nastane vždy s nižší amplitudou proudového rázu. Velikost amplitudy proudového rázu přechodového děje závisí na okamžiku překlenutí předstihových kontaktů, tedy na době zpoždění hlavních kontaktů. Tento poznatek je možné si ověřit v programu popsaného v kapitole 5.1.5. Snížení přechodových dějů je znatelné především při připínání dalších kompenzačních stupňů. Vysokofrekvenční rušení omezeno není.

Snížení amplitudy a zároveň i frekvence kmitání přechodového děje je docíleno zapojením ochranné tlumivky do série s kondenzátorem. Jedná se tedy o případ spínání chráněné kompenzační sekce nasimulovaný v kapitole 5.1.4 a 5.2.3. Přechodové děje jsou závislé, jako pro případ prosté kompenzace, na počátečních podmínkách v okamžiku připnutí.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. Knižnice Elektro. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [3] KHB. *Kompenzační kondenzátory FORTIS MKP G* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://kbh.cz/fortis/kompenzacni-kondenzatory-fortis>
- [4] ZEZ SILKO. *Kompenzace jalové energie* [online]. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/ke-stazeni>
- [5] ELECTRONICON. *Catalogue Brochure "Key Components for Power Factor Correction in 50Hz Mains"* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.electronicon.com/en/downloads/low-voltage-power-factor-correction>
- [6] BENEŠ, Václav. Výkonové kondenzátory nízkého napětí. *Elektro* [online]. 2001 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vykonove-kondenzatory-nizkeho-napeti--15078>
- [7] ABB. *Power capacitors and harmonic filters* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://new.abb.com/high-voltage/capacitors/hv>
- [8] HOLOUBEK, Jiří a Jaroslav PAWLAS. *Stupňovitě spínaná kompenzační zařízení vn* [online]. 2004 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/stupnovite-spinana-kompenzacni-zarizeni-vn--14090>
- [9] BENEDICT. *Stykače pro spínání kondenzátorů* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.benedikt.cz/produkty/17-stykace-pro-spinani-kondenzatoru>
- [10] LOVATO ELECTRIC. *Kompenzační stykače* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.lovatoelectric.cz/Stykače/110/pl>
- [11] HAVLÍČEK, Václav a Ivan ZEMÁNEK. *Elektrické obvody 2*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-03971-7.
- [12] ČSRES. *PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*. 5. vydání. 2015.
- [13] NKT CABLES. *Katalogový list: 1-CYKY* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.nktcables.com/cz/products/low-voltage-cables/power-cables-1kv/power-cables-pvc-pvc/>
- [14] *Geogebra* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.geogebra.org/>

## Přílohy

### Příloha 1: Dopočtené hodnoty činného odporu, reaktance a indukčnosti používaných transformátorů a kabelů

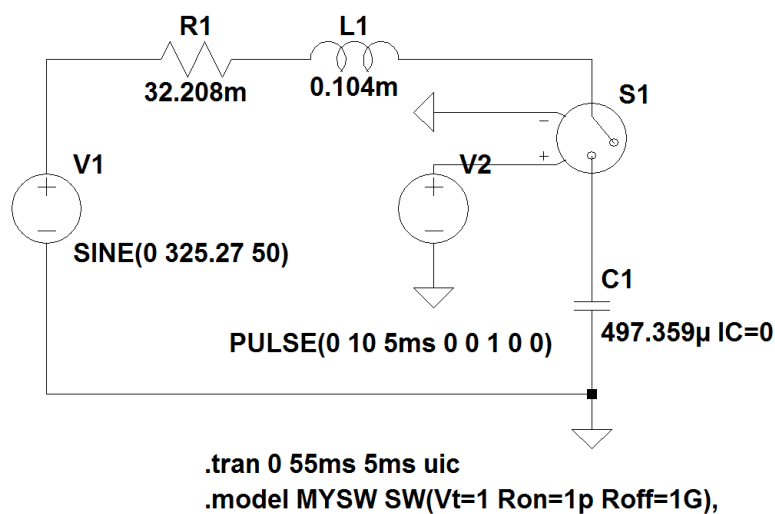
Tab. P1.1: Základní parametry transformátorů 22/0,4 kV

$S_{nT}$ [kVA]	$u_k$ [%]	$P_{knT}$ [kW]	$Z_T$ [mΩ]	$R_T$ [mΩ]	$X_T$ [mΩ]	$L_T$ [mH]
50	4	1,1	128,000	70,400	106,901	0,340
100	4	1,75	64,000	28,000	57,550	0,183
160	4	2,35	40,000	14,688	37,206	0,118
250	4	3,25	25,600	8,320	24,210	0,077
400	4	4,6	16,000	4,600	15,324	0,049
630	4	6,5	10,159	2,620	9,815	0,031
630	6	6,7	15,238	2,701	14,997	0,048
1000	6	10,5	9,600	1,680	9,452	0,030
1600	6	17	6,000	1,063	5,905	0,019
2500	6	26,5	3,840	0,678	3,780	0,012

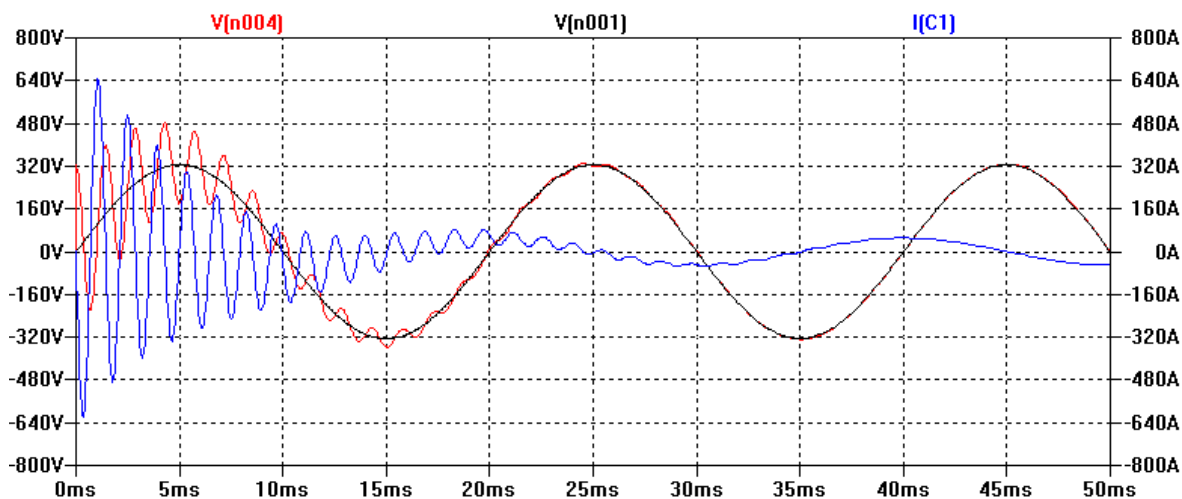
Tab. P1.2: Parametry kabelů NN

typ	$R$ [Ω/km]	$X$ [Ω/km]	$R_K$ [mΩ]	$X_K$ [mΩ]	$L_K$ [mH]
25AYKY	1,233	0,0811	123,3	8,110	0,026
35AYKY	0,879	0,0792	87,9	7,920	0,025
50AYKY	0,619	0,0773	61,9	7,730	0,025
70AYKY	0,442	0,0756	44,2	7,560	0,024
95AYKY	0,326	0,0744	32,6	7,440	0,024
120AYKY	0,258	0,0743	25,8	7,430	0,024
150AYKY	0,206	0,0736	20,6	7,360	0,023
185AYKY	0,167	0,0735	16,7	7,350	0,023
240AYKY	0,129	0,0727	12,9	7,270	0,023

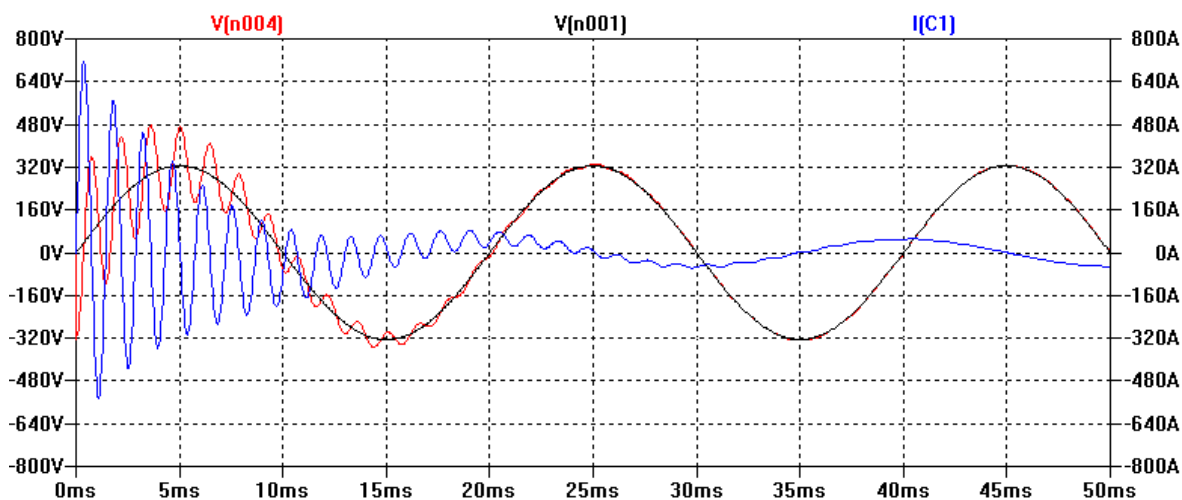
## Příloha 2: Simulace v programu LTspice – Prostá kompenzace



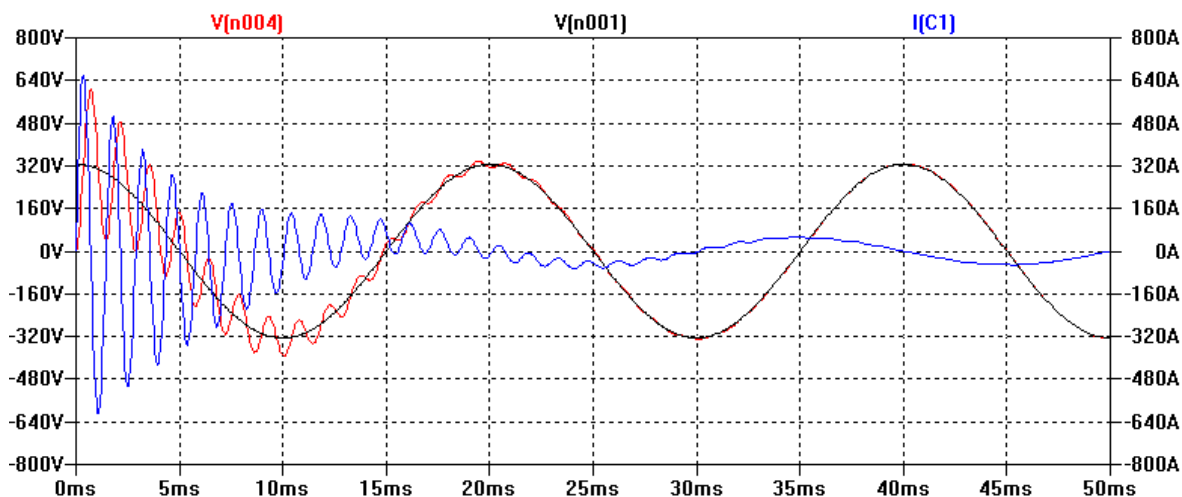
Obr. P2.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



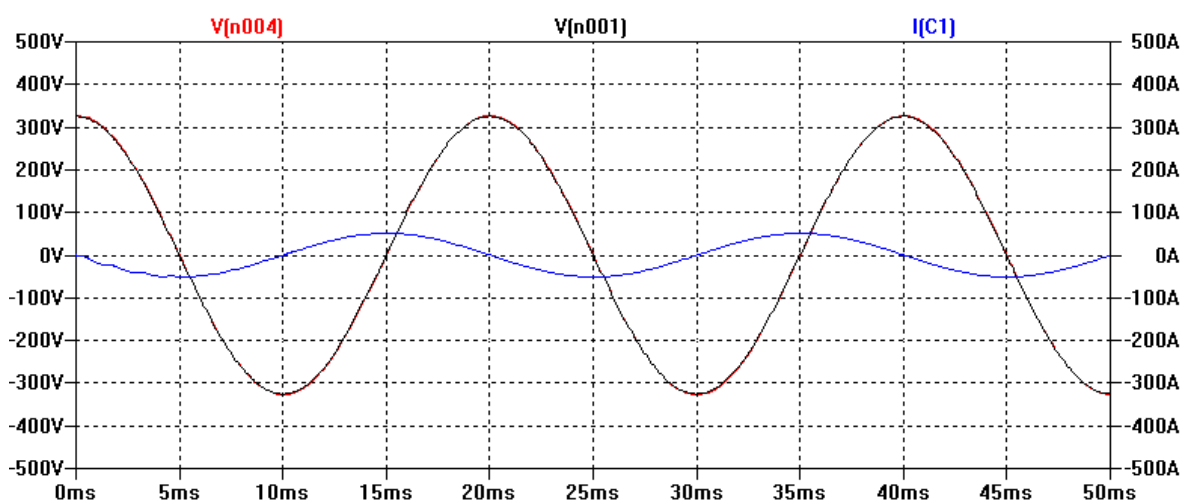
Obr. P2.2: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



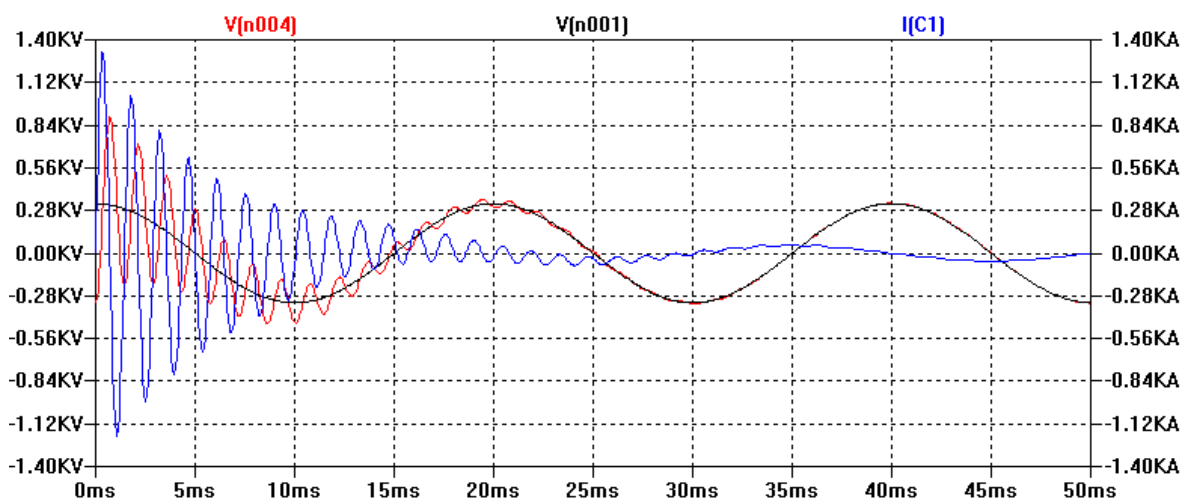
Obr. P2.3: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



Obr. P2.4: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

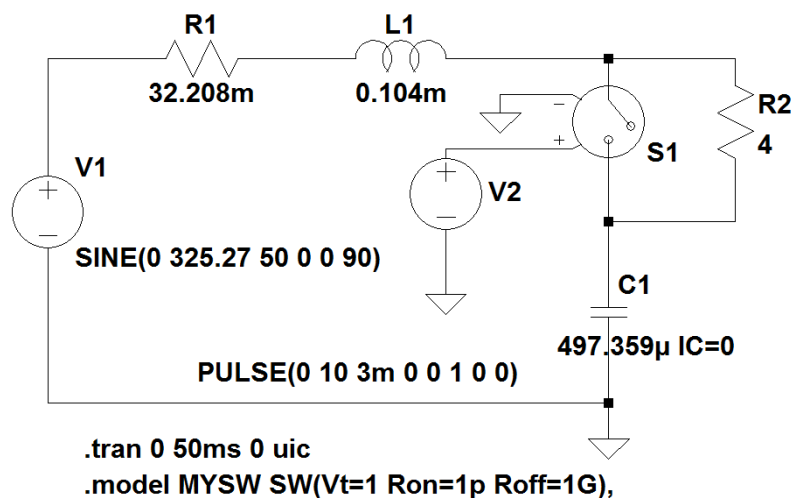


Obr. P2.5: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

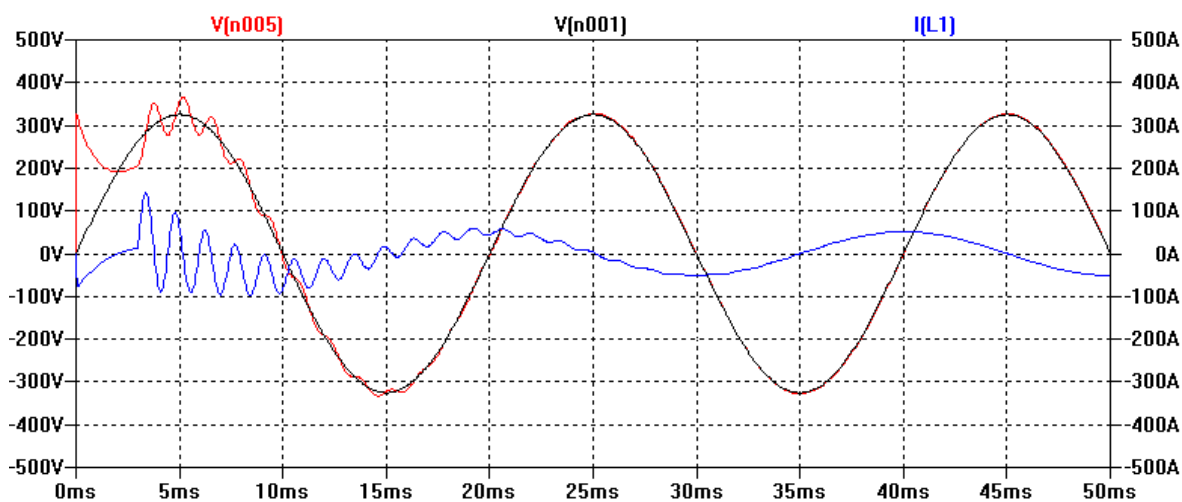


Obr. P2.6: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

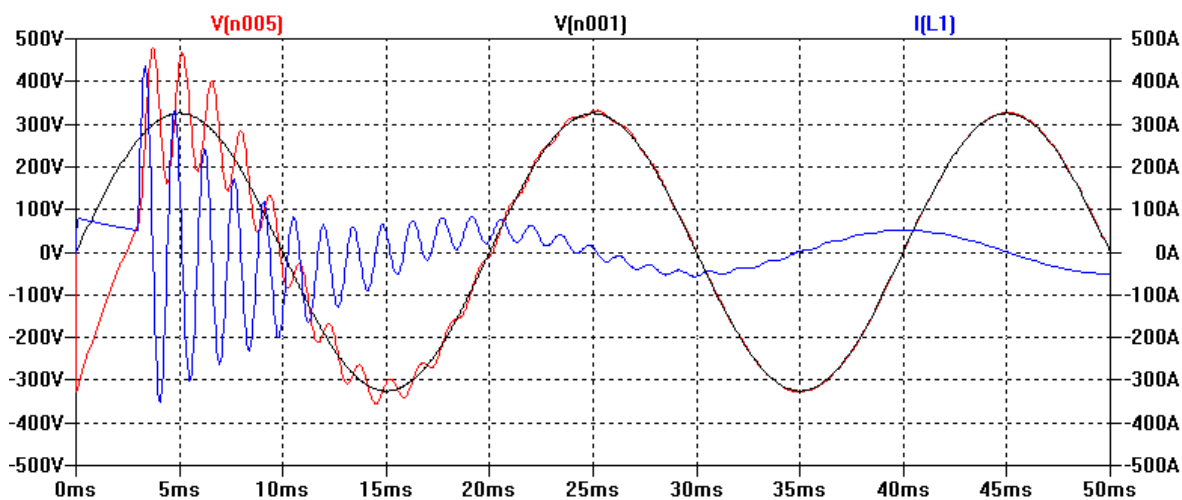
### Příloha 3: Simulace v programu LTspice – Prostá kompenzace s odporovým spínáním



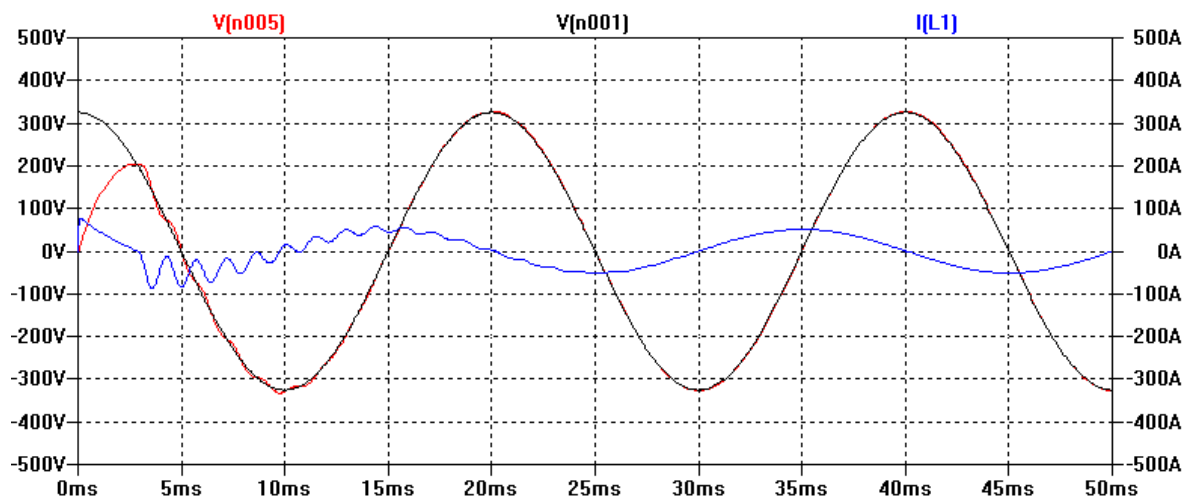
Obr. P3.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



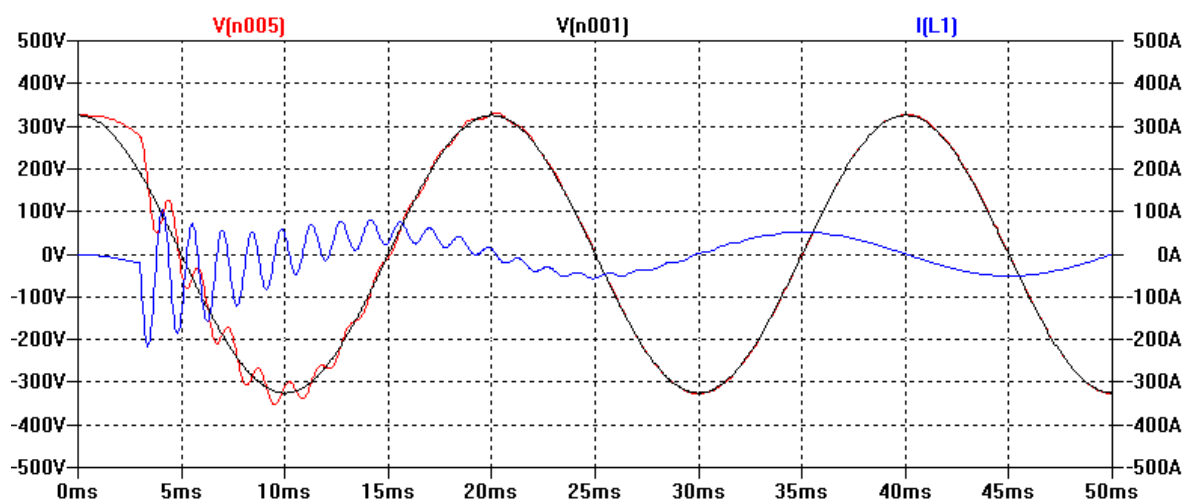
Obr. P3.2: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



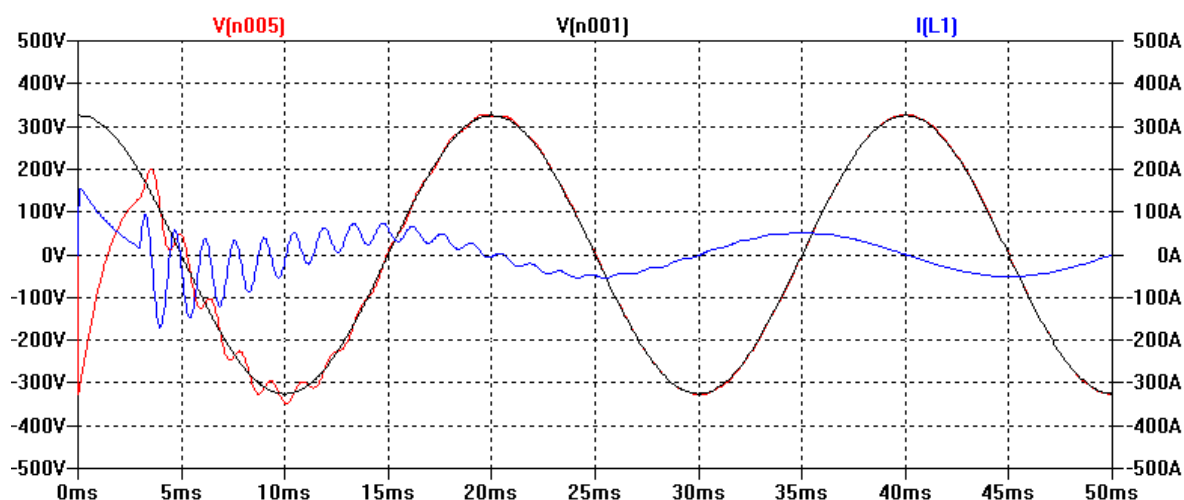
Obr. P3.3: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



Obr. P3.4: Připojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

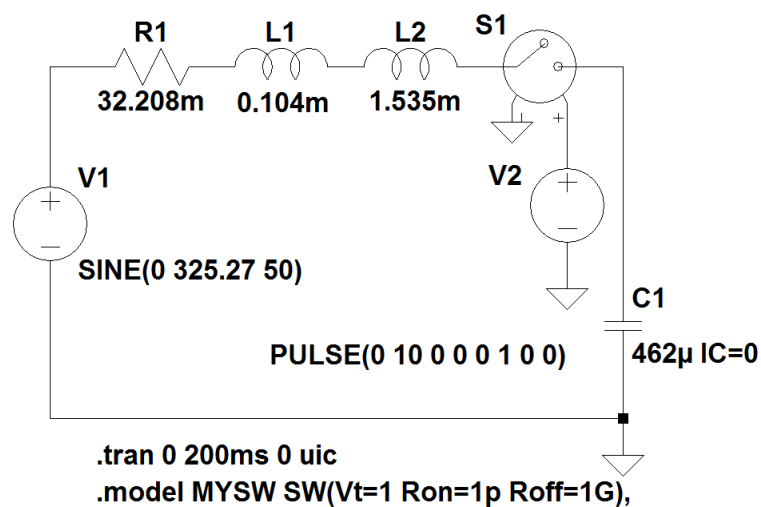


Obr. P3.5: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

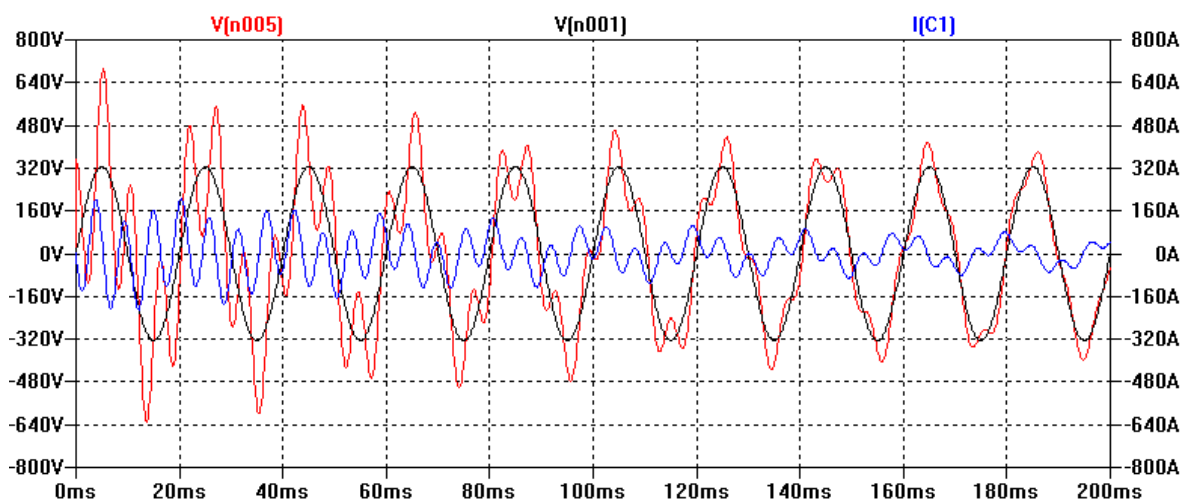


Obr. P3.6: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem

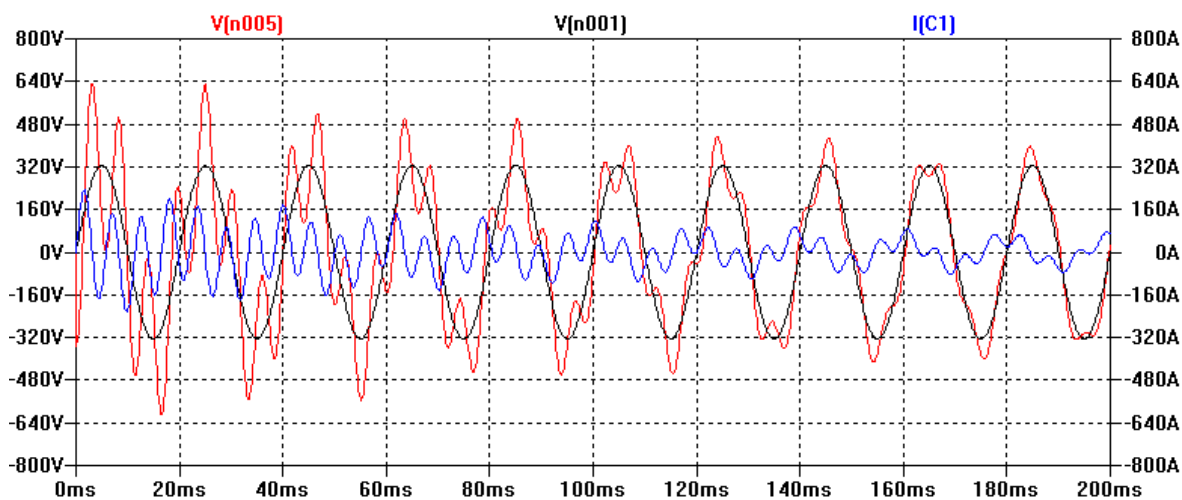
## Příloha 4: Simulace v programu LTspice – Chráněná kompenzace



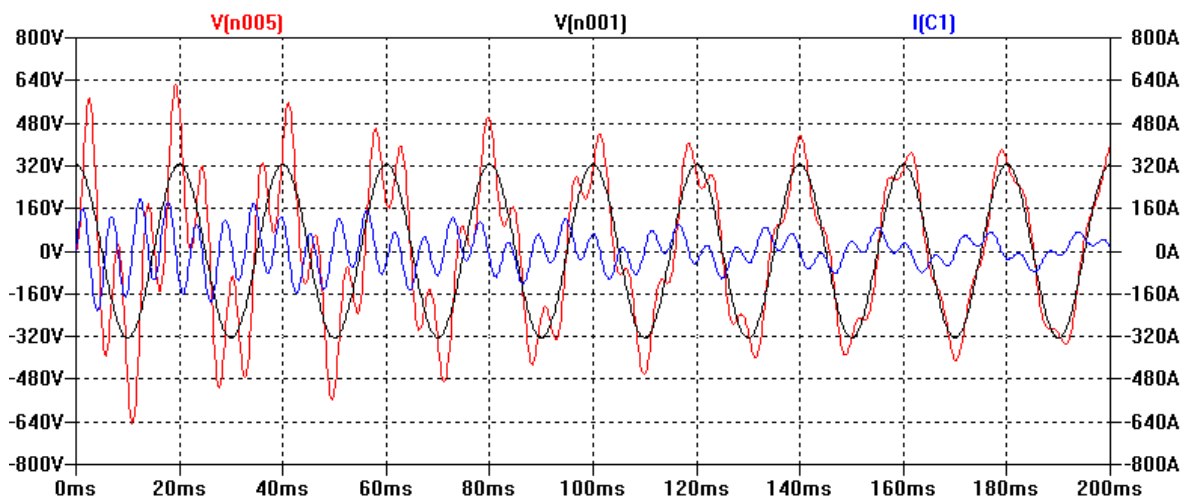
Obr. P4.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



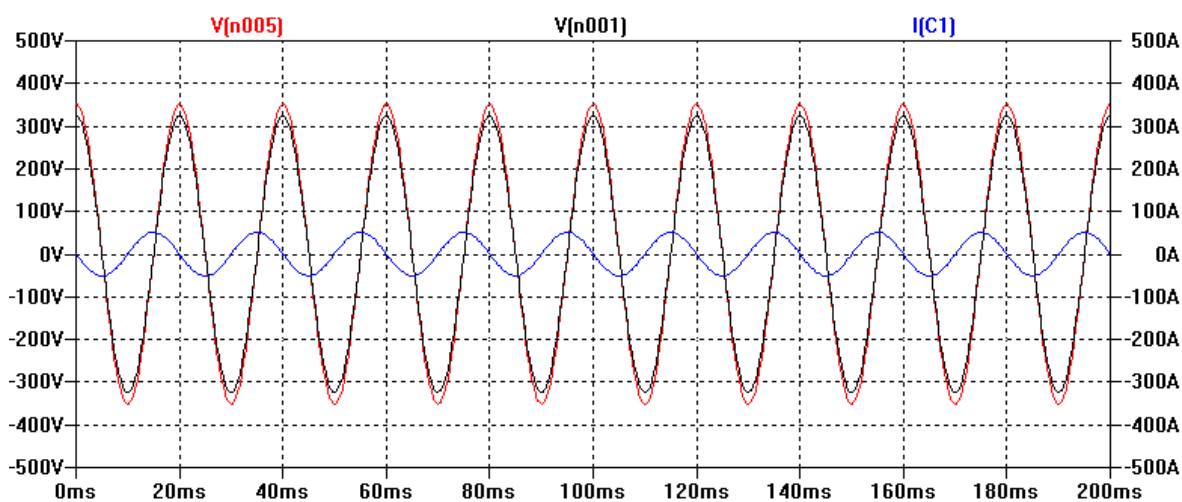
Obr. P4.2: Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



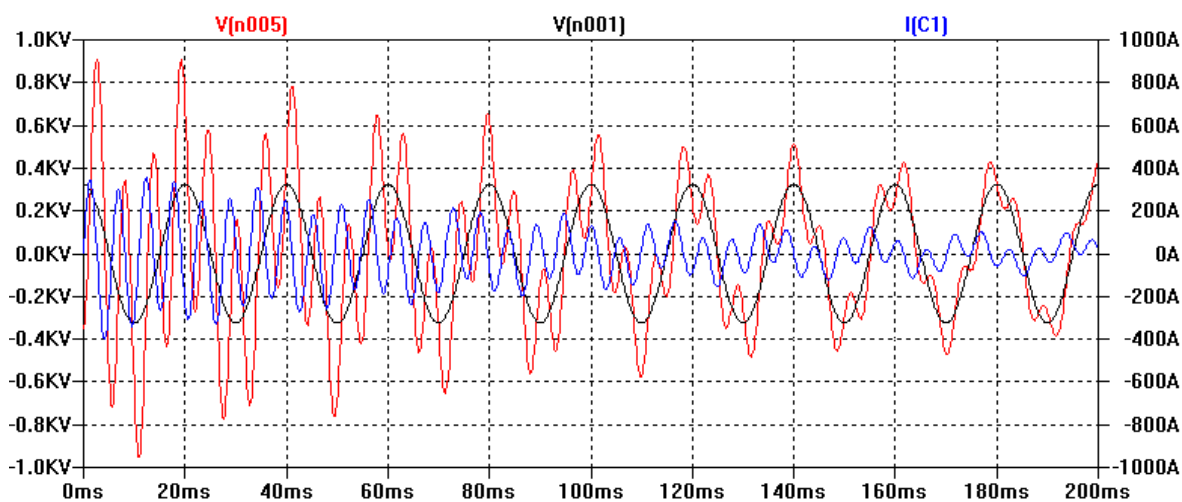
Obr. P4.3: Připojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí nulou



Obr. P4.4: Přípojení nenabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



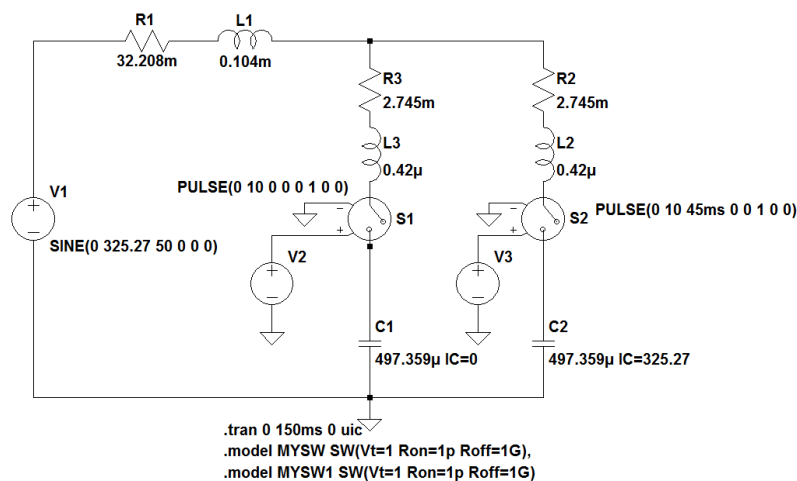
Obr. P4.5: Přípojení nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



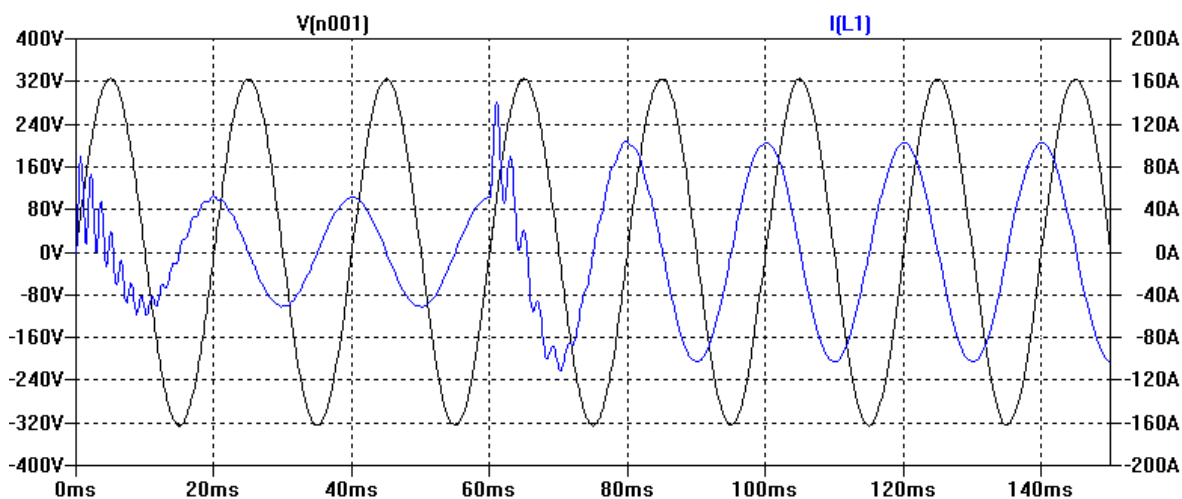
Obr. P4.6: Přípojení záporně nabitého kondenzátoru při průchodu napájecího napětí maximem



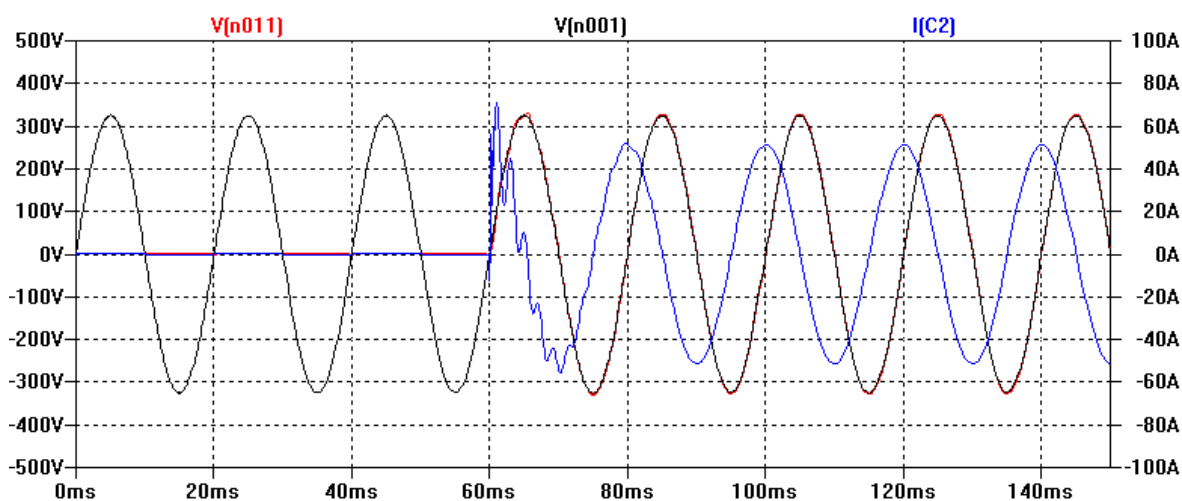
## Příloha 5: Simulace v programu LTspice – Dvoustupňová prostá kompenzace



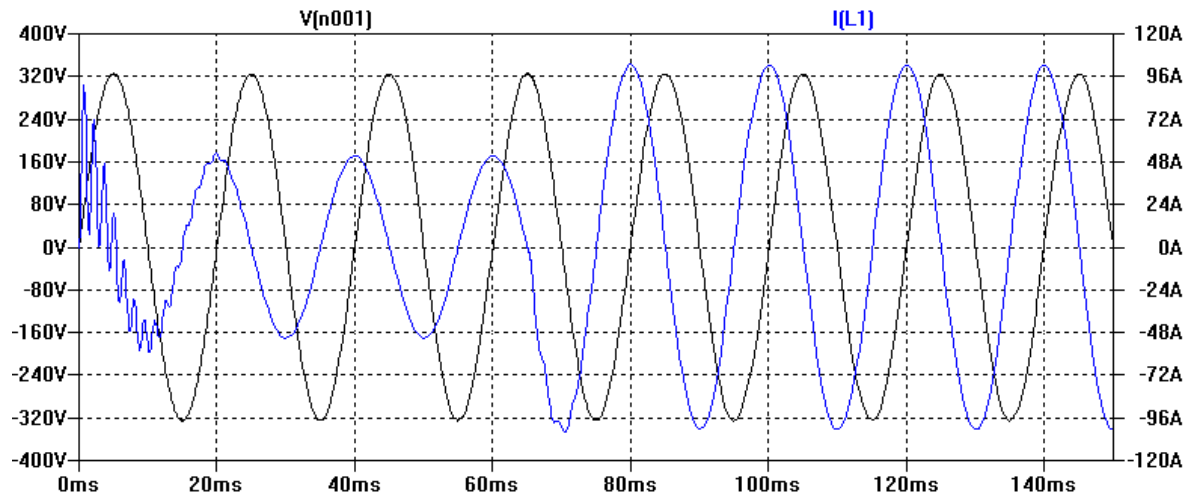
Obr. P5.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



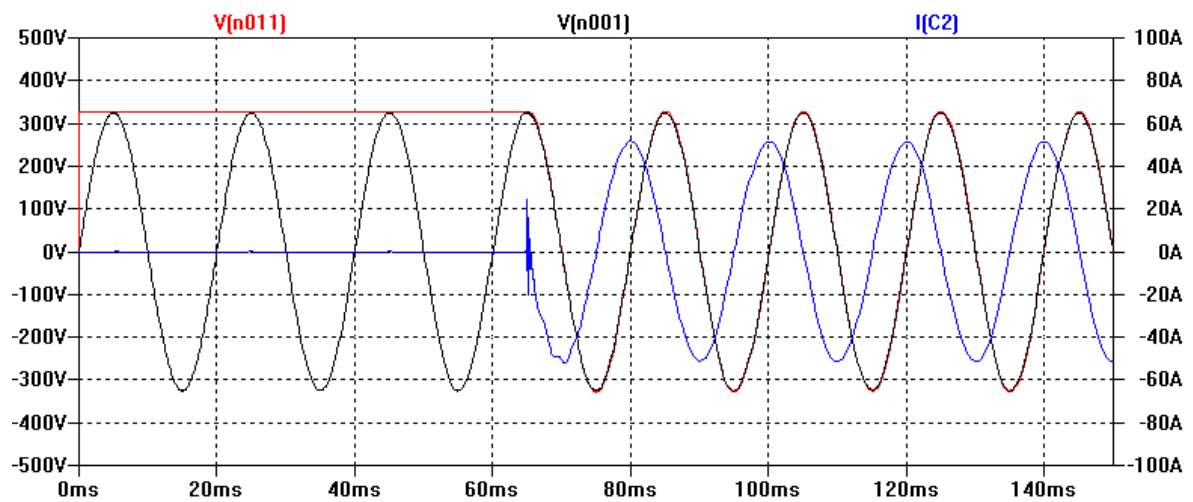
Obr. P5.2: Připnutí druhého nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí – síťový proud



Obr. P5.3: Připnutí druhého nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí – proud a napětí na druhém kondenzátoru

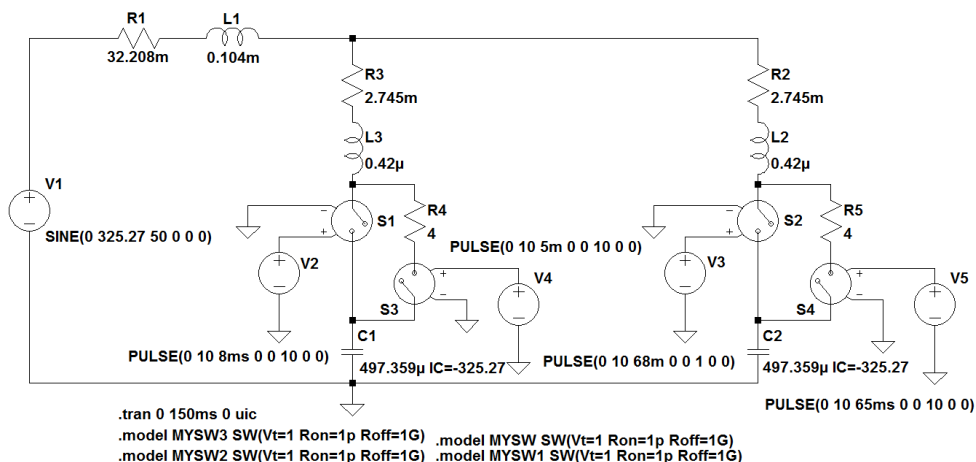


Obr. P5.4: Připnutí druhého nabitého kondenzátoru v maximu síťové napětí – síťový proud

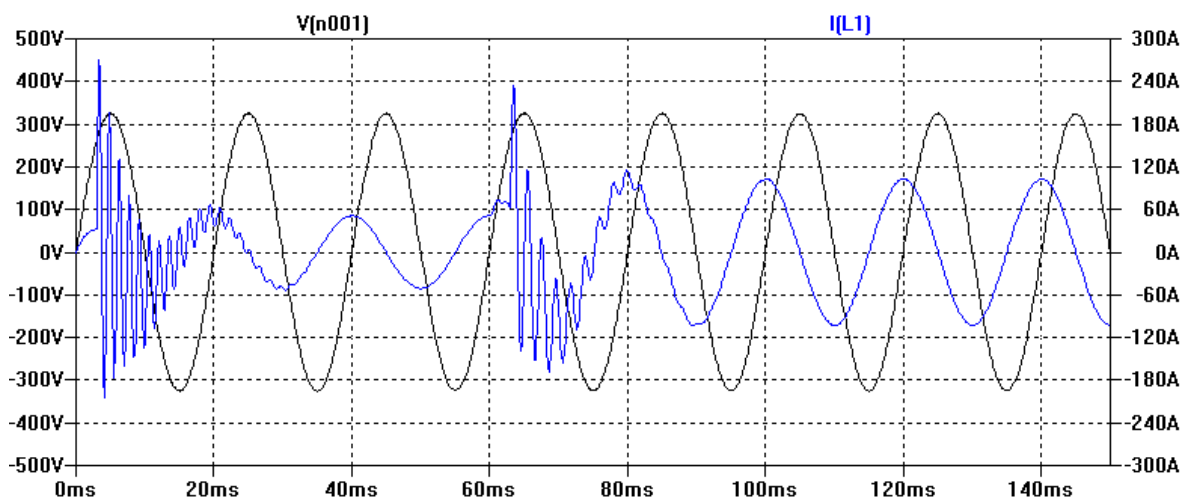


Obr. P5.5: Připnutí druhého nabitého kondenzátoru v maximu síťové napětí – proud a napětí na druhém kondenzátoru

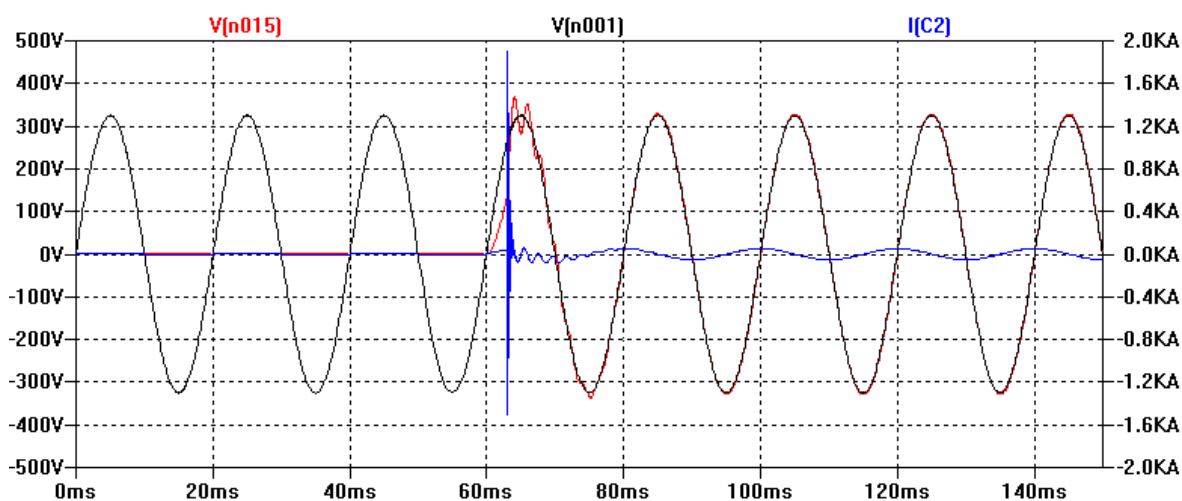
## Příloha 6: Simulace v programu LTspice – Dvoustupňová prostá kompenzace s odporovým spínáním



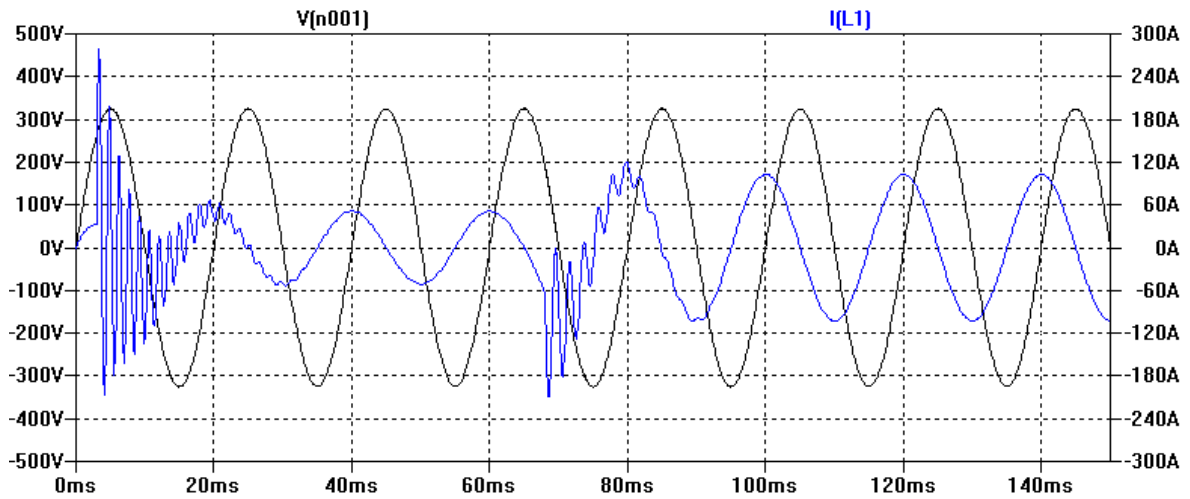
Obr. P7.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



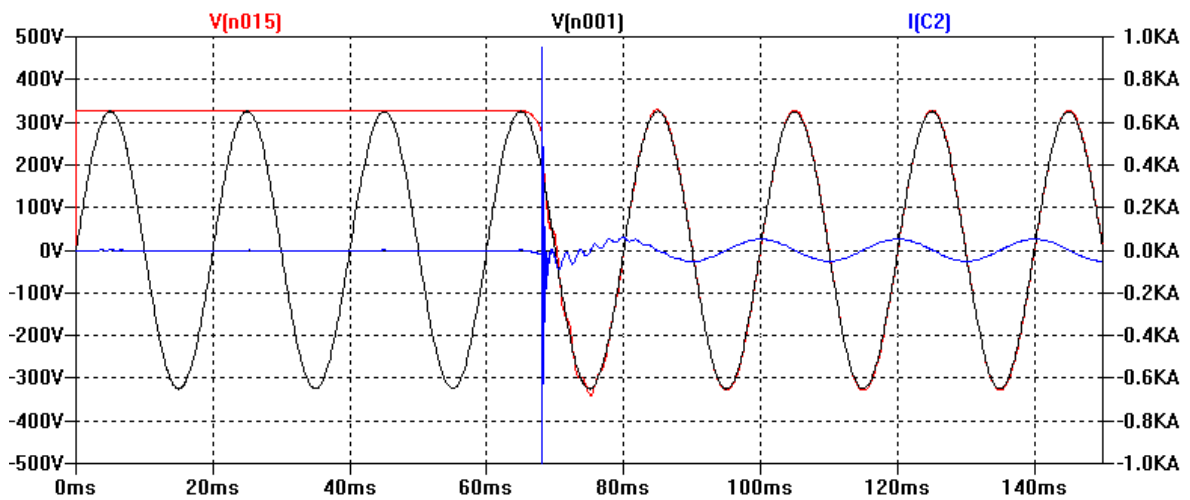
Obr. P5.2: Připnutí druhého nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí – síťový proud



Obr. P5.3: Připnutí druhého nenabitého kondenzátoru v nule síťového napětí – proud a napětí na druhém kondenzátoru

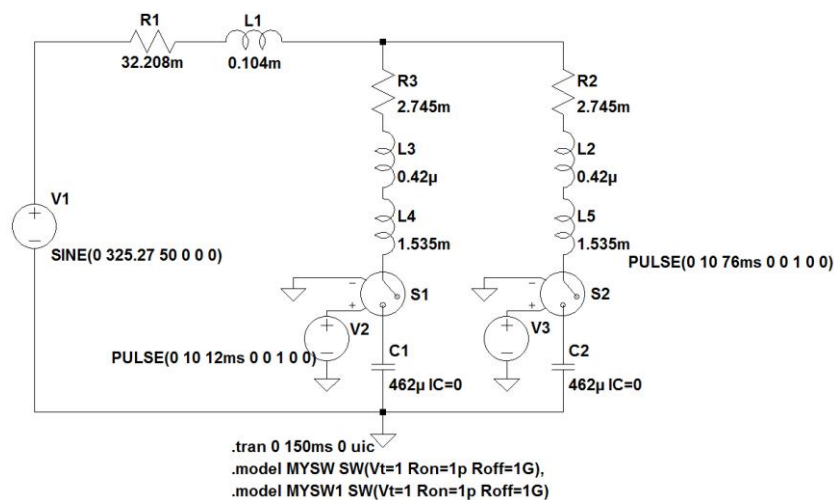


Obr. P5.4: Připnutí druhého nabitého kondenzátoru v maximu síťové napětí – síťový proud

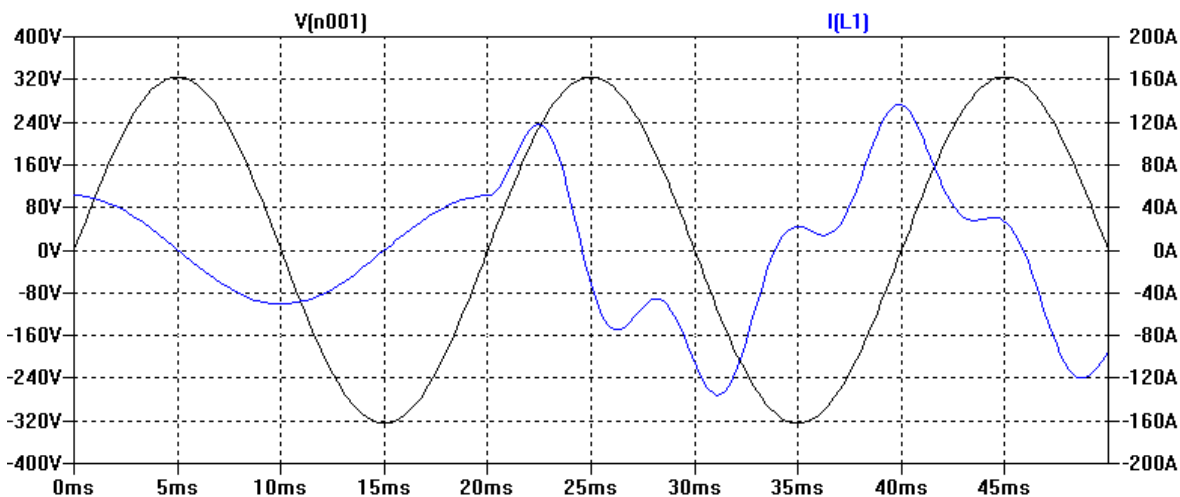


Obr. P5.5: Připnutí druhého nabitého kondenzátoru v maximu síťové napětí – proud a napětí na druhém kondenzátoru

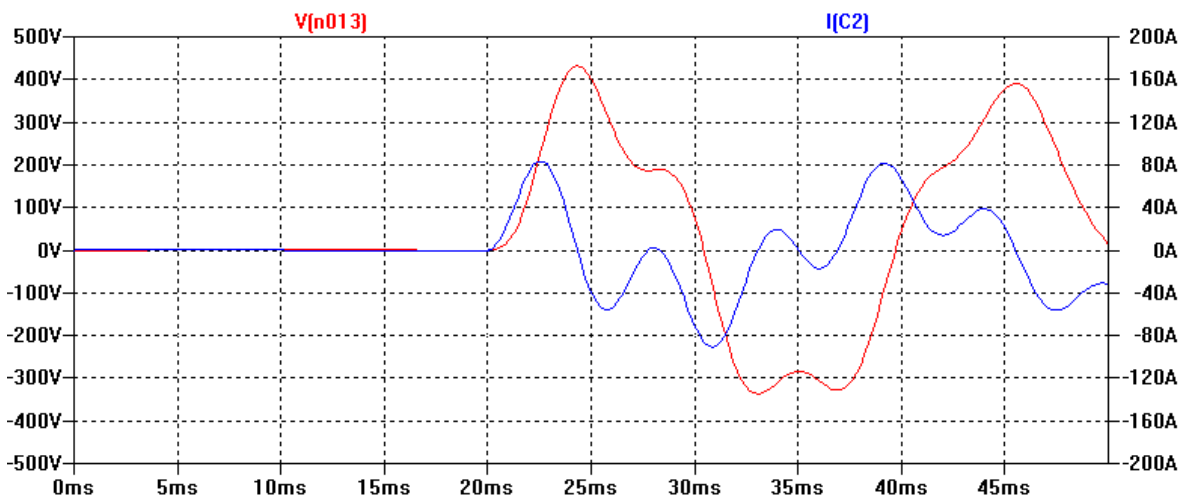
## Příloha 7: Simulace v programu LTspice – Dvoustupňová chráněná kompenzace



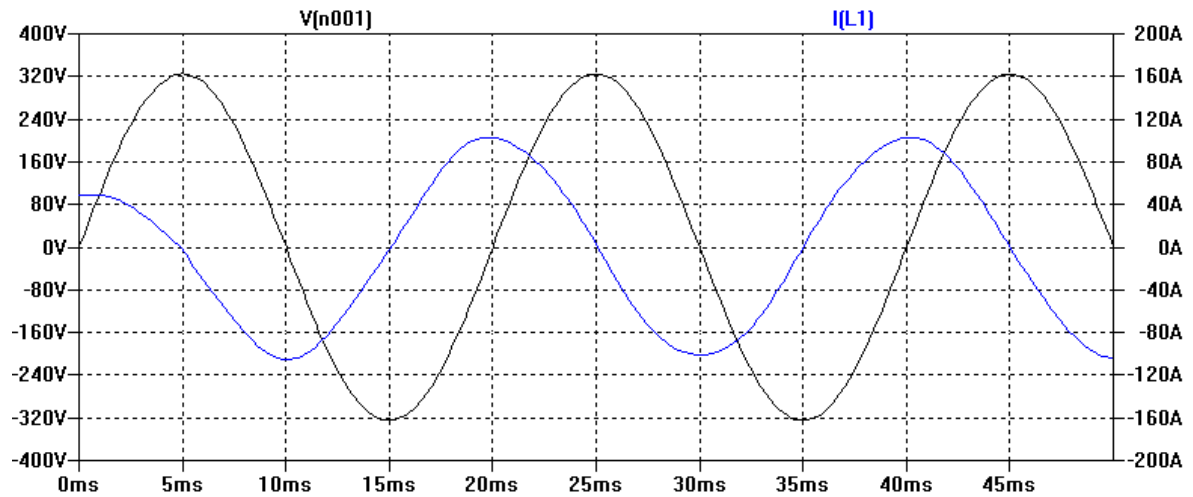
Obr. P7.1: Schéma zapojení v prostředí LTspice



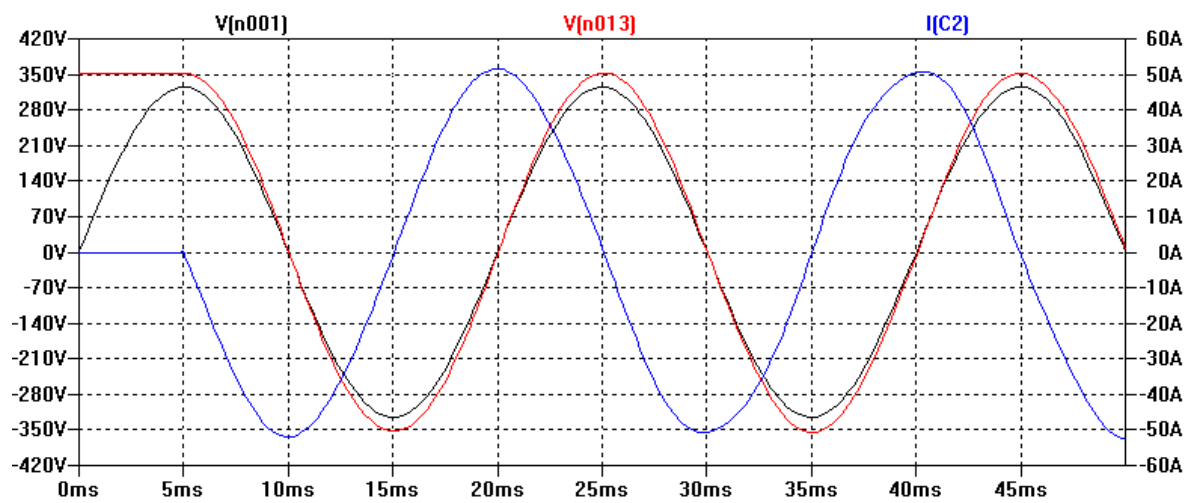
Obr. P7.2: Připnutí druhého kondenzátoru nenabitého v nule síťové napětí – síťový proud



Obr. P7.3: Připnutí druhého kondenzátoru nenabitého v nule síťové napětí – proud a napětí kondenzátoru



Obr. P7.4: Připnutí druhého kondenzátoru nabitého v maximu síťové napětí – síťový proud



Obr. P7.5: Připnutí druhého kondenzátoru nabitého v maximu síťové napětí – proud a napětí druhého kondenzátoru