

3. Nelineární prvky

Vlastnosti nelineárního prvku elektrického obvodu se projevují na jeho voltampérové charakteristice.

Charakteristiku je možno dělit na několik základních typů:

a) inerciální a bezinerciální

Příkladem těchto prvků mohou být termistory, jejichž odpor je závislý na teplotě a v důsledku tepelné setrvačnosti musíme potom rozlišovat statickou a dynamickou charakteristiku nelineárního obvodu. U bezinerciálních jsou statické a dynamické charakteristiky shodné. Jejich rozlišení závisí na rychlosti změny proudu resp. kmitočtu k tepelným časovým konstantám. Pokud tyto změny budou pomalé, není třeba uvažovat časové konstanty tepelných dějů, lze daný prvek považovat za bezinerciální.

b) souměrné a nesouměrné

U obvodů se souměrnou VA charakteristikou nezávisí jeho impedance na směru průchodu proudu. To platí pro některé polovodičové součástky (diody, triaky), podobné vlastnosti třeba elektrický oblouk. Nesouměrné VA charakteristiky mají prvky, které vykazují nelineární závislost odporu na polaritě napětí. V současné době mají největší význam součástky vyrobené na bázi polovodičových materiálů. Nejjednodušší součástkou je dioda.

c) jednoznačné a nejednoznačné

Vyznačují se tím, že pro jednu hodnotu nezávisle proměnné existuje více než jedna hodnota závisle proměnné. Tento jev je dán buď výskytem oblastí, kde dochází k poklesu napětí při zvyšování proudu, anebo výskytem hystereze u cívky se železným jádrem.

Elektrické obvody, které obsahují prvky s výše uvedenými vlastnostmi se nazývají nelineární. Matematicky lze popsat nelineární obvod nelineárními rovnicemi, které obsahují mocniny a součiny proměnných i jejich derivací, vzájemné součiny proměnných a proměnné v argumentu transcendentních funkcí. Pro tyto obvody nelze použít princip superpozice.

Program ATP umožňuje modelovat dané prvky také ze znalosti jejich voltampérových charakteristik, které se nadefinují daným počtem bodů této charakteristiky. S výhodou toho lze použít při modelování nelineární zátěže, modelu spínacího oblouku apod.

3.1 Nastavení parametrů modelů (Branch Nonlinear)



3.1.1 Nelineární rezistor (R(i) Type 99)

Nelineární proudově závislý rezistor definovaný VA charakteristikou.

Po otevření dialogového okna se objeví nabídka obsahující dvě složky.

Ve složce **Attributes** se postupně zadají jednotlivé parametry, kde **Vflash** (V) je přeskokové napětí sériového jiskřiště, **Tdelay** určuje minimální čas v sekundách, po kterém nastane sepnutí jiskřiště. Jestliže procházející proud větvi je po odeznění času **Tdelay** nulový, bude jiskřiště opět otevřeno. **Jump** označuje číslo segmentu, na kterém začne výpočet. Jestliže dojde ve větvi k poklesu napětí pod hodnotu uvedenou v položce **VSEAL** (>0), dojde opět k otevření jiskřiště. Ve složce **Characteristic** se nadefinuje VA charakteristika daného prvku. Je vhodné zadat alespoň 16 prvků dané charakteristiky, kdy počátek os $[0,0]$ je vynechán.

3.1.2 Nelineární induktor (L(i) Type 98)



Nelineární proudově závislý induktor definovaný závislostí magnetického toku a protékajícího proudu viz. Obr. 3.1a.

Ve složce **Attributes** označuje položka **CURR** (A) velikost proudu a **FLUX** (Wb) velikost magnetického toku. Obě hodnoty jsou určeny pro ustálený stav. Složka **Characteristic** definuje danou závislost magnetického toku a protékajícího proudu. Je vhodné zadat alespoň 17 prvků charakteristiky. Pokud je vynechán bod $[0,0]$ nebo pokud jsou zadány pouze kladné hodnoty charakteristiky, je předpokládán symetrický průběh křivky saturace (nasyčení).

3.1.3 Reálný nelineární induktor (L(i) Type 93)



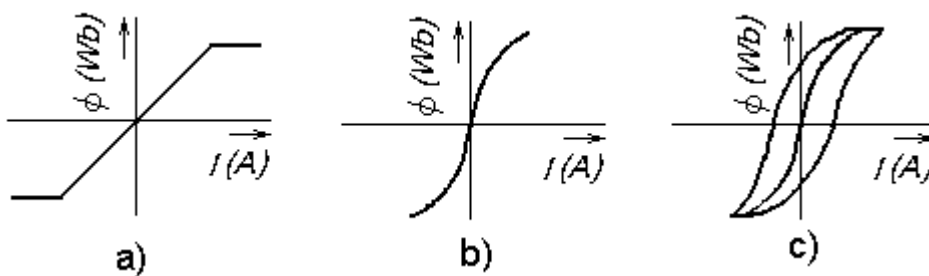
Oproti předchozímu typu je odlišný svou křivkou magnetizace viz. Obr. 3.1b. Je-li její začátek určen bodem $[0,0]$ a jsou-li vynechány záporné hodnoty, je křivka symetrická podle počátku.

3.1.4 Fiktivní pseudonelineární induktor s hysterezí (L(i) Type 96)



Oproti předchozím dvěma typům je nyní uvažován zbytkový tok. Ten je zadán v **Attributes** položkou **RESID** (Wb). Nelineární induktor je nyní definován hysterezní křivkou.

Předpokládá se symetrický průběh hysterezní křivky kromě případu, kdy spodní levá část smyčky vymezející křivku hystereze začíná ve třetím kvadrantu. Posledním bodem křivky hystereze by měl být místem styku obou křivek v prvním kvadrantu. Viz. Obr. 3.1c.



Obr. 3.1 Průběh závislostí magnetického toku Φ na protékajícím proudu I

3.1.5 Nelineární časově závislý rezistor (R(t) Type 97)



Zadáva se velikost přeskokového napětí sériového jiskřiště **Vflash** (V). Hodnota **Tdelay** určuje minimální čas v sekundách, po kterém nastane sepnutí jiskřiště, současně musí platit, že přiložené napětí je větší než přeskokové. Pro **Tdelay** = -1 je rezistor připojen bez jiskřiště. Závislost odporu na čase je určena zadanými body křivky.

3.1.6 ZnO omezovač - odpor s exponenciální závislostí proudu (Type 92)



Proud je dán závislostí $i = p \cdot (u/V_{ref})^q$. Konstanty p a q se vypočítají ze zadané VA charakteristiky automaticky po uzavření dialogového okna. **Vflash** má stejný význam jako výše. Může se zadat **Vzero** jako počáteční napětí v čase nula. **COL** udává počet paralelních a **SER** sériových omezovačů ve větvi. **ErrLim** je povolená tolerance v poměrných jednotkách.

3.2 Model spínacího oblouku

Vypínací schopnost současných vypínačů je závislá na parametrech oblouku, který vzniká v průběhu vypínání proudu mezi kontakty, tzv. spínací oblouk. Elektrický oblouk může být chápán jako odpor, jehož hodnota je proměnná a je funkcí proudu. Jedná se o činný nelineární prvek. Obecné obloukové parametry jsou vyjádřeny diferenciálními rovnicemi. Při analýze obvodů pomocí EMTP je možno diferenciální rovnice snadno zahrnout. Proto v případě, kdy se jedná o systém převážně závislý na parametrech oblouku, lze provést jeho analýzu bez obtíží. Modelů elektrického oblouku jsou stovky. K nejznámějším patří Cassieho a Mayrův model.

Cassieho model

Je nejlépe využitelný pro vysoké proudy oblouku, v rozmezí 100 A až 100 kA v SF₆ nebo tlakovzdušných vypínačích. Tímto modelem může být analyzováno tlumení proudu v přechodném ději při vypínání oblouku. Cassieho teorie platí pro oblouk, který hoří v rychle proudícím prostředí, jehož směr proudění je souhlasný s osou obloukového sloupce. Proudící prostředí obklopuje celý povrch oblouku. Cassieho model předpokládá, že veškerý ztrátový výkon odebírá oblouku toto proudící médium. Jedná se o objemové nikoliv o povrchové chlazení. Elektrická vodivost plazmatu je pak úměrná teplu akumulovanému v plazmatu. Pro elektrickou vodivost tedy platí:

$$\gamma = \text{konst.} \cdot Q \quad (3.1)$$

Bilanční rovnice podle Cassieho teorie má tvar:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{Q_0} (P_p - \Phi) = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{P_p}{\Phi} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$\Phi = \gamma \cdot E_0^2 \dots \text{tepelný výkon odebraný plazmatu ve stacionárním stavu} \quad (3.3)$$

$$P_p = \gamma \cdot E^2 \dots \text{elektrický příkon} \quad (3.4)$$

E_0 je intenzita proudového plazmatu v dynamickém stavu, E je intenzita proudového plazmatu v dynamickém stavu

Tepelnou setrvačnost oblouku určuje tzv. časová konstanta, která podle Cassieho teorie má tvar:

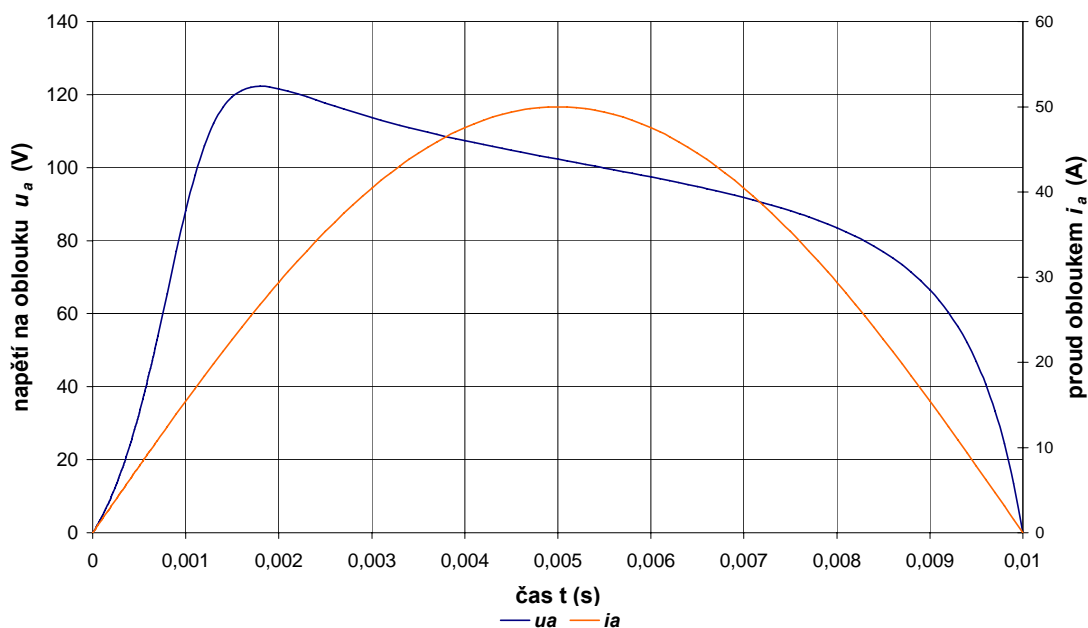
$$\vartheta_C = \frac{Q}{\Phi} \quad (3.5)$$

Výsledný Cassieho vztah pro obloukové napětí má tvar:

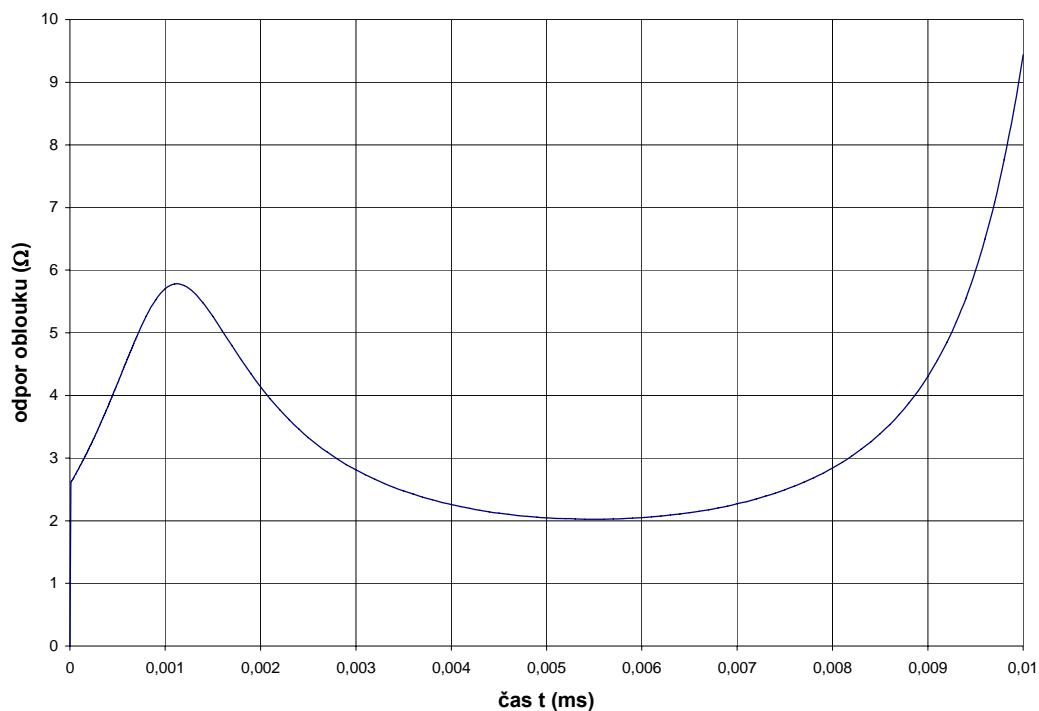
$$u_a = \frac{E_a \sqrt{2} \sin \omega t}{\sqrt{1 - \frac{1}{1 - \omega^2 \vartheta_C^2} \cdot (\cos 2\omega t + \omega \vartheta_C \sin 2\omega t) + \left[\left(\frac{R_q}{R_{01}} \right)^2 - 1 + \frac{1}{1 - \omega^2 \vartheta_C^2} \right] \cdot e^{-\frac{2}{\vartheta_C} t}}} \quad (3.6)$$

Člen E_a představuje intenzitu proudového pole plazmatu, poměr R_q/R_{01} je poměr odporů oblouku, může nabývat hodnot (0,1; 1; 10).

Cassieho teorie dobře respektuje zapalovací špičky a průběh napětí na oblouku v oblasti průchodu proudu maximem. Nedostatkem je, že nerespektuje zhášecí špičku (viz. Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Průběh napětí a proudu oblouku podle Cassieho teorie



Obr. 3.3 Průběh odporu oblouku podle Cassieho teorie

Mayrův model

Je vhodný pro malé hodnoty proudů, řádově do desítek ampérů v SF₆ nebo tlakovzdušných vypínačích. Je také použitelný v případě analýzy zbytkového proudu, vzniklého po přerušení proudu (přechod nulou), po dobu několika μs ve stavu, který je nazýván „teplotní režim“. Vypínací schopnost může být nejlépe analyzována s použitím tohoto modelu, protože jevy se převážně vztahují k určitému časovému intervalu. Mayrův model uvažuje, že ztráty nejsou odváděny do okolního prostředí axiálně, ale jen radiálně vedením do okolního relativně studeného prostředí. Ztráty prouděním se zanedbávají z důvodu malého průřezu oblouku. Přitom se předpokládá, že poloměr obloukového sloupce je konstantní, a že je konstantní i celková velikost ztrát radiálním chlazením. Jinými slovy uvažuje statickou charakteristiku oblouku ve tvaru rovnoosé hyperboly. Mayr předpokládá, že vodivost vzrůstá exponenciálně s teplem akumulovaným v plazmatu.

$$\gamma = \text{konst} \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad (3.7)$$

Q_0 je definováno jako teplo, které musí být přivedeno do plazmatu jednotkové délky, aby se jeho vodivost zvětšila poměru 1/e, kde e je Eulerovo číslo.

Podobně jako u Cassieho modelu je možné odvodit bilanční rovnici oblouku podle Mayrovy teorie:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{g_M} \left(\frac{P_p}{\Phi} - 1 \right) \quad (3.8)$$

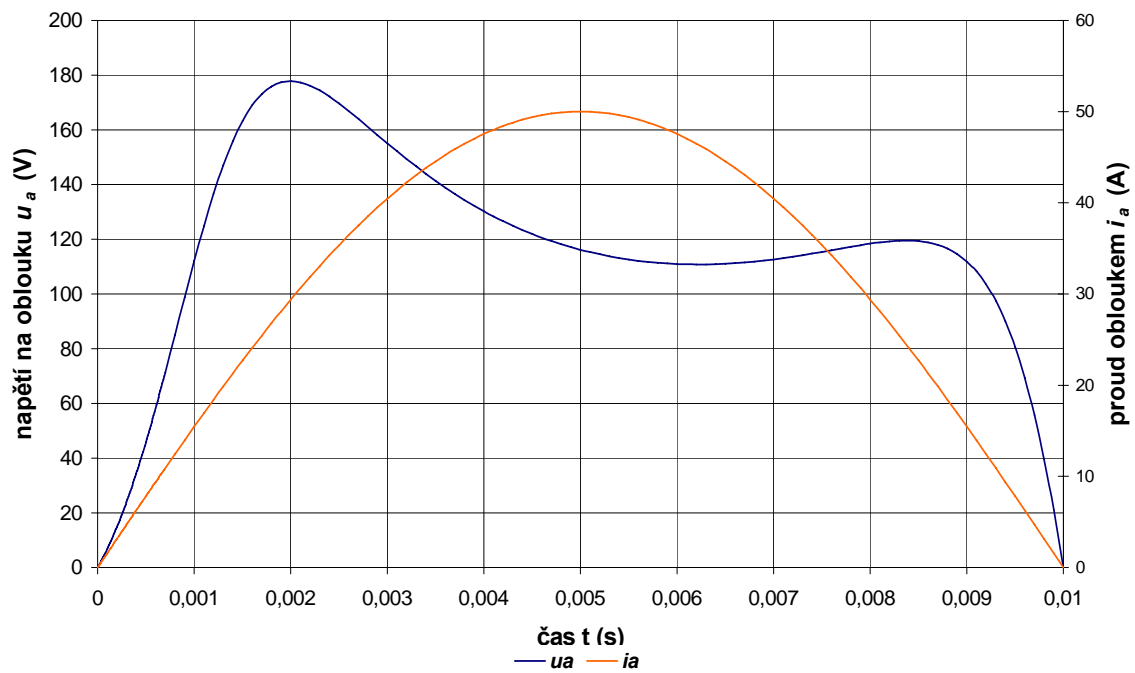
Pro Mayrovu časovou konstantu platí:

$$g_C = \frac{Q_0}{\Phi} \quad (3.9)$$

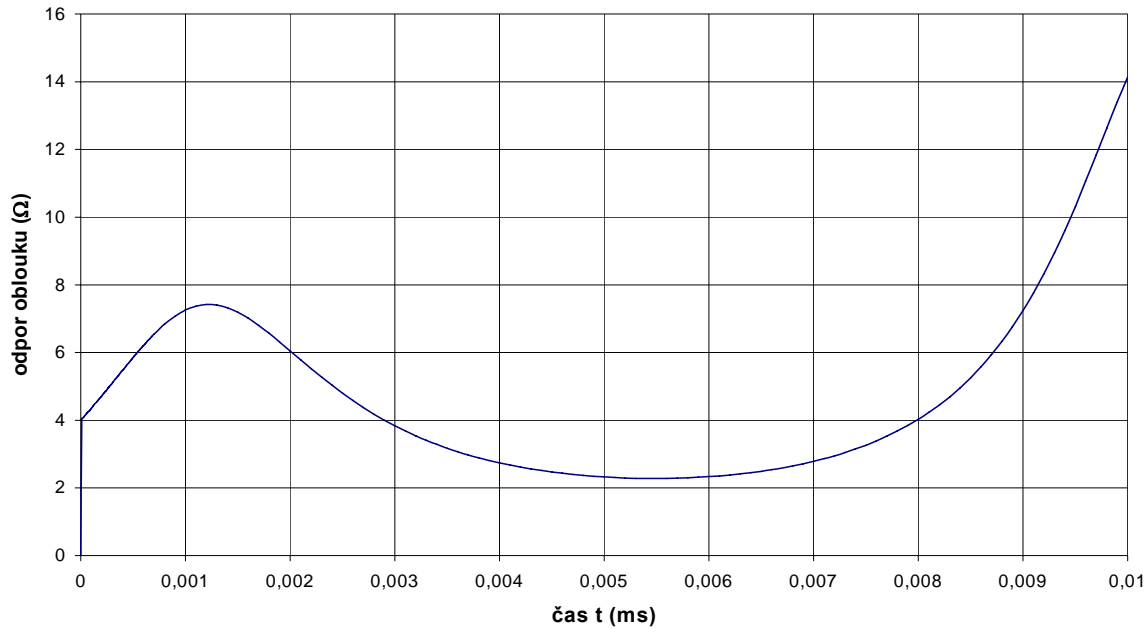
Výsledný vztah pro obloukové napětí podle Mayrovy teorie:

$$u_a = \frac{P_p \cdot 2 \sin(\omega t)}{I_m \left(1 - \frac{1}{1 + 4\omega^2 g_M^2} \right) (\cos 2\omega t + 2\omega g_M \sin 2\omega t) + \left[\left(\frac{Rq}{R_{01}} - 1 + \frac{1}{1 + 4\omega^2 g_M^2} \right) e^{-\frac{t}{g_M}} \right]} \quad (3.10)$$

Mayrův model lépe charakterizuje průběh napětí v oblasti zapalovacích a zhášecích špiček. Mayrův model není vhodný pro oblast průchodu proudu nulou (viz. Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Průběh napětí a proudu oblouku podle Mayrovy teorie



Obr. 3.5 Průběh odporu oblouku podle Mayrovy teorie

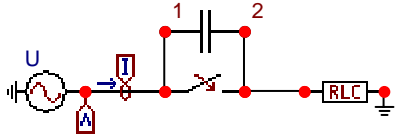
Řešení programem ATP

Je zde analyzován problém vypínání indukčních proudů před průchodem proudu přirozenou nulou. V důsledku toho může vzniknout velké přepětí ohrožující izolační systém. Tento problém je charakteristický pro vakuové vypínače. Nejprve je průběh přepětí sledován v obvodu s ideálním vypínačem viz. Obr. 3.6, poté je vytvořen pomocí ATPDraw model oblouku a sestaveno schéma obvodu, kde je uvažován vliv oblouku viz. Obr. 3.7.

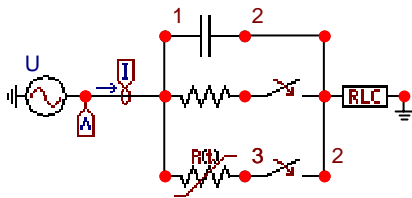
Model oblouku je vytvořen v ATPDraw pomocí časově závislého nelineárního rezistoru (odstavec 3.1.5). Charakteristika oblouku je vypočtena na základě Cassieho rovnice (3.6) pro časovou konstantu $\mathcal{G}_C = 1$ ms. Poměr odporů oblouku R_q/R_{01} je roven jedné. Výpočet odporu oblouku je proveden v časovém rozmezí 20 až 30 ms. Vypočtenou charakteristiku oblouku $R = f(t)$ je možno zadat v ATPDraw ve složce **Characteristic** dvěma způsoby. Prvním způsobem je zadávání maximálně 17 hodnot z této závislosti pomocí **Add** a vepsáním těchto hodnot do datových polí pro čas a odpor oblouku. Ověření průběhu charakteristiky je možné pomocí **View**. Druhá možnost spočívá v použití vnější charakteristiky označením **Include characteristic**. Pomocí **Browse** se zadá cesta k souboru obsahující hodnoty charakteristiky oblouku. Datový soubor obsahuje dva sloupce hodnot, první je vyhrazen pro hodnoty časů a druhý pro výslednou velikost odporu oblouku. Jednotlivé sloupce jsou od sebe odděleny mezerou. Soubor je uložen s příponou **.lib**.

Obvod je napájen jednofázovým generátorem s amplitudou $U_m = 8485$ V a frekvencí $f = 50$ Hz. Paralelně k vypínači 6 kV je připojena kapacita $C_p = 1,2$ μ F, která představuje kapacitu vedení. Indukčnost vedení je $L = 20$ mH a odpor vedení $R = 5$ Ω . Vedení je realizováno sériovým prvkem *RLC*. Na Obr. 3.6 je schéma obvodu s ideálním vypínačem a na Obr. 3.7 s popsáním modelem oblouku. (Odpor 0,01 Ω připojený do série s vypínačem zajišťuje správnou funkci nelineárního odporu, bez něj bere ATP jen jeho první hodnotu.)

K vypnutí dojde v čase 20 ms tedy v okamžiku, kdy proud obvodem dosáhne svého maxima. Jedná se o nejnepříznivější případ z hlediska napěťového namáhání izolace. Oblouk uhasíná v okamžiku průchodu proudu nulou, model oblouku je tedy odpojen v čase 30 ms.

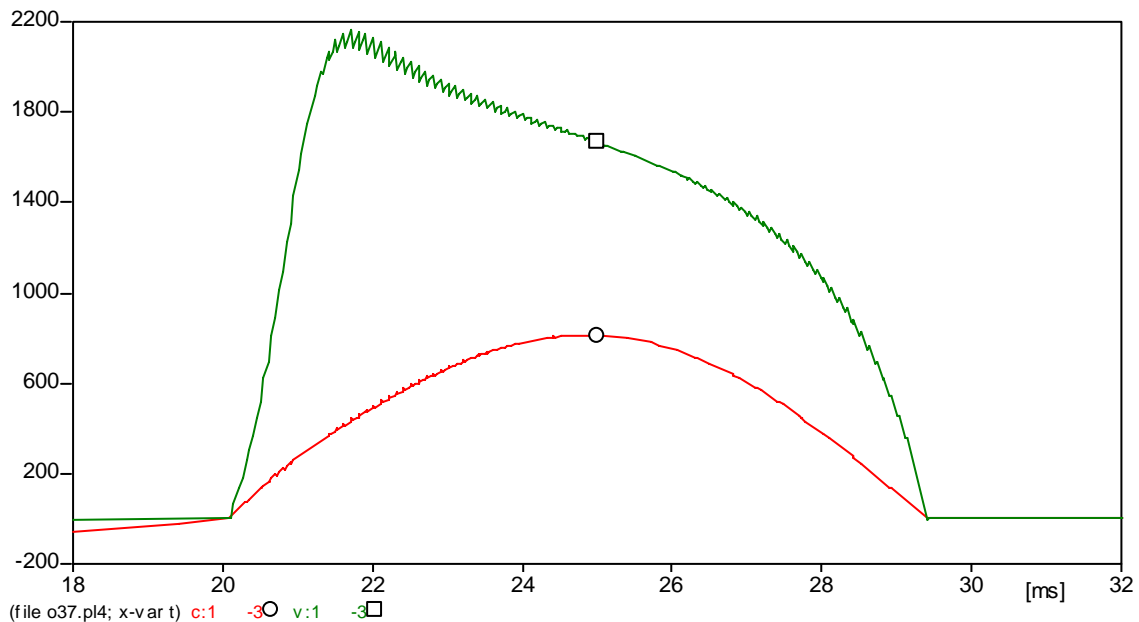


Obr. 3.6 Vypínání indukčních proudů ideálním vypínačem



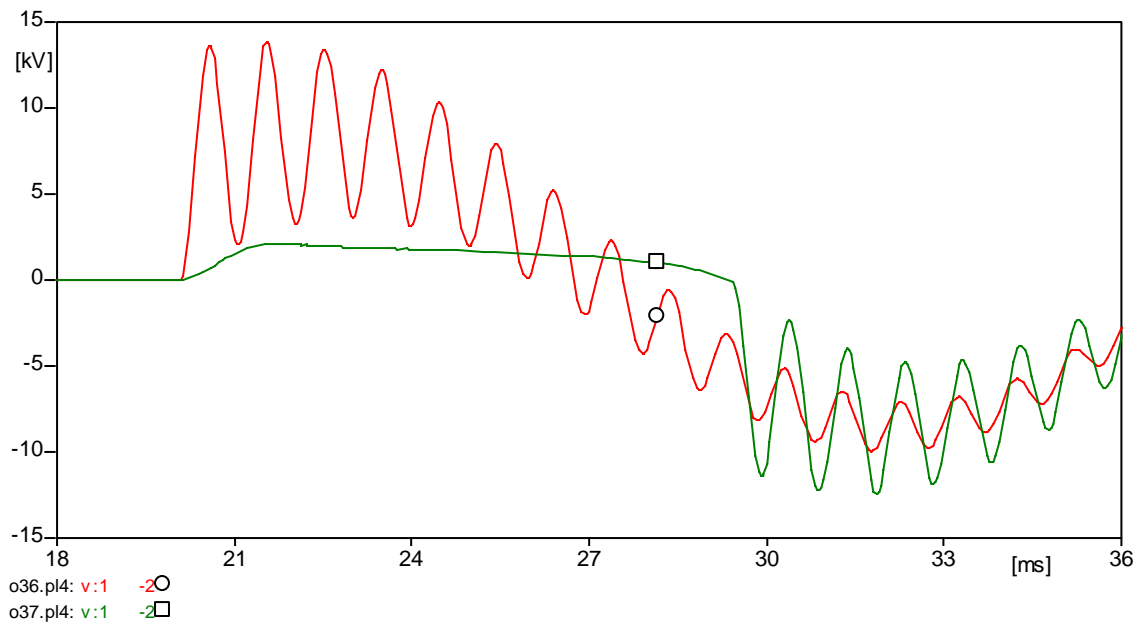
Obr. 3.7 Vypínání indukčních proudů vypínačem s uvažováním vlivu oblouku

Na Obr. 3.8 je uveden průběh napětí a proudu na oblouku, tak jak byl zadán podle Obr. 3.2 pro Cassieho model

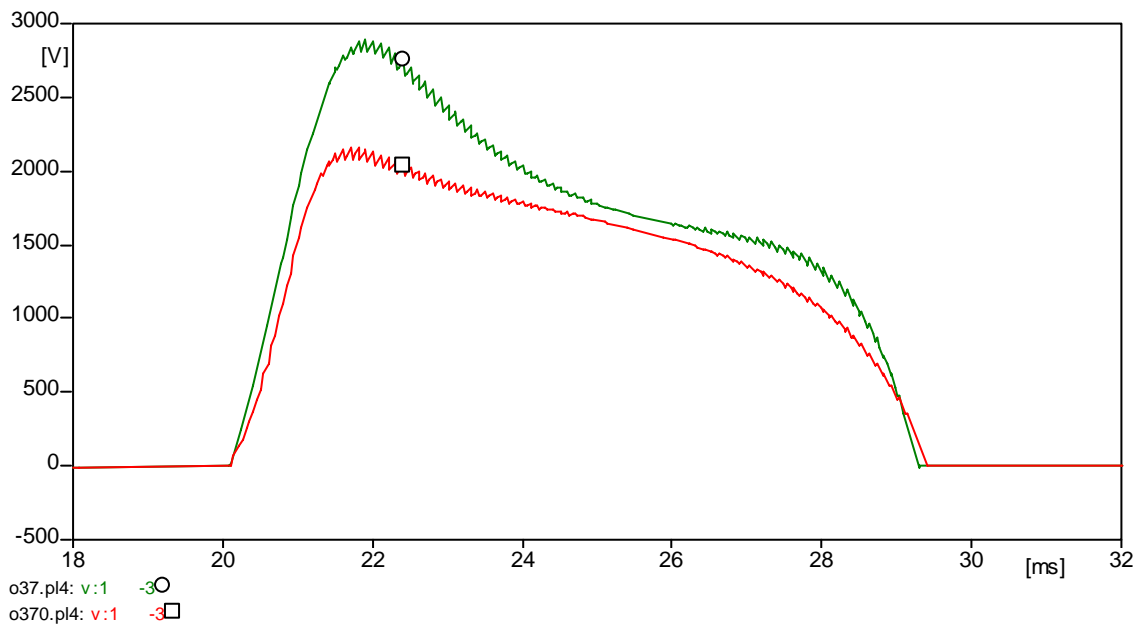


Obr. 3.8 Průběh napětí a proudu na oblouku pro schéma na Obr. 3.7

Na Obr. 3.9 je uvedeno srovnání průběhů přepětí při vypínání ideálním vypínačem podle Obr. 3.6 a vypínačem s uvažováním oblouku podle Obr. 3.7.



Obr. 3.9 Srovnání průběhů přepětí při vypínání ideálním vypínačem a vypínačem s uvažováním oblouku



Obr. 3.10 Srovnání napětí na oblouku pro model Cassie a Mayr

Na Obr. 3.10 je ukázáno porovnání průběhů napětí na oblouku pro model Cassie (o370.pl4) a Mayr (o37.pl4). Odchyly proti zadaným hodnotám, které znázorňují Obr. 3.2 a Obr. 3.4 jsou způsobeny průtokem nesinusového

proudu, neboť odpor oblouku ovlivní celkovou impedanci obvodu. Jak již bylo řečeno, Cassieho teorie velmi dobře respektuje zapalovací špičky a průběh napětí na oblouku v oblasti průchodu proudu maximem. Tato teorie se lépe hodí pro výpočet zhášedel s intenzivním chlazením oblouku, je tedy vhodnější pro výpočet odporu oblouku vakuového vypínače. Naproti tomu výpočet napětí pomocí Mayrovy teorie vykazuje napětí mezi zhášecí a zapalovací špičkou značně sedlovitý průběh. Tento tvar je typický u zhášedel s poměrně nízkou intenzitou chlazení oblouku. Mayrova teorie je vhodnější pro výpočet odporu oblouku máloolejového vypínače. Velikost odporu oblouku je u máloolejového vypínače větší. Vlivem nižšího odporu oblouku vakuového vypínače se tolik nezkrátí půlvlna proudu a k vypnutí dochází později.