

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Simulace vypínání indukční zátěže pomocí
vakuového vypínače**

**vedoucí práce: doc. Ing. Karel Noháč Ph.D.
autor: Jaromír Eybl**

2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaromír EYBL**
Osobní číslo: **E11N0113P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Simulace vypínání indukativní zátěže pomocí vakuového vypínače**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. S využitím schopností simulačního nástroje ATP-EMTP namodelujte vypínání indukativní zátěže vakuovým vypínačem.
2. Popište teorii popisující vypínání indukativních proudů vypínačem a principy vakuových vypínačů.
3. Vytvořte model vakuového vypínače v software ATP-EMTP.
4. Na základě získaných výsledků analyzujte možnosti vypínání indukativní zátěže vakuovými vypínači.
5. Sestavte omezující provozní omezení a pravidla vypínání indukativní zátěže vakuovými vypínači.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na rozbor vypínání indukční zátěže pomocí vakuového vypínače a dále na tvorbu modelu vakuového vypínače v prostředí programu ATP-EMTP. V úvodu je popsán princip funkce vakuového vypínače a jeho konstrukce. Dále jsou podrobně rozebrány jevy, které nastávají při vypínání indukční zátěže pomocí vakuového vypínače. Jádrem samotné práce je model vakuového vypínače, který na základě vstupních veličin a uživatelem zvolených parametrů simuluje chování skutečného vypínače. Tento model je poté testován na zkušebním obvodu, kde je ověřována jeho funkce pro různé časy rozpojení kontaktů a parametry vypínače. V poslední části jsou stanovena pravidla pro vypínání indukční zátěže pomocí vakuového vypínače a diskutovány metody pro omezení vzniklých přepětí.

Klíčová slova

Vakuový vypínač, vypínání indukční zátěže, ATP-EMTP, useknutí proudu, zotavné napětí, opětovné zapálení oblouku

Abstract

This thesis is focusing on the analysis of inductive load switching by vacuum circuit breaker and on the development of the vacuum circuit breaker model in ATP-EMTP program environment. At the beginning, principle of vacuum circuit breaker and its structure are described. Furthermore, the issue of inductive load switching by vacuum circuit breaker is presented. The most important output of this work is the development of the vacuum circuit breaker model, which simulates the behaviour of real circuit breaker on basis of input data. The function of the model is verified on the test circuit for different opening times and input data of circuit breaker. In the conclusion, the rules for switching inductive load by vacuum circuit breaker are set and methods of restricting surges are discussed.

Keywords

Vacuum circuit breaker, inductive load switching, ATP-EMTP, current chopping, recovery voltage, arc re-ignition

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Jaromír Eybl

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Noháčovi Ph.D. za odbornou pomoc, rady a připomínky při psaní diplomové práce. Rád bych poděkoval i mému konzultantovi Ing. Pavlu Novákovi Ph.D. za poskytnuté studijní materiály a odbornou pomoc.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů	8
Úvod	9
1. Vakuový vypínač	10
1.1 Princip vakuového vypínače	10
1.2 Vznik vakuového oblouku.....	11
1.2.1 Difúzní oblouk	11
1.2.2 Vysokotlaký oblouk.....	11
1.3 Vypínače využívající radiální magnetické pole	12
1.4 Vypínače využívající axiální magnetické pole	12
1.5 Konstrukce vakuového vypínače	13
1.5.1 Konstrukční uspořádání	13
1.5.2 Materiály kontaktů	14
2. Vypínání indukativních proudů	15
2.1 Useknutí proudu.....	15
2.2 Charakteristika výdržného napětí.....	19
2.3 Zhášení vysokofrekvenčních proudů.....	20
2.4 Opětovné zapálení oblouku.....	21
3. Tvorba modelu vakuového vypínače	23
4. Vypínání indukativní zátěže pomocí vakuového vypínače	25
5. Provozní pravidla pro vypínání indukativní zátěže	30
5.1 Omezovače přepětí.....	30
5.2 RC článek.....	33
5.3 Zhodnocení výsledků.....	34
Závěr	36
Použitá literatura	38

Seznam symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Jednotky</i>	<i>Veličina</i>
B_a	[T]	magnetická indukce v axiálním směru
u_{trv}	[V]	přechodné zotavné napětí
U_{max}	[V]	velikost amplitudy napětí zdroje
ω	[rad]	úhlová frekvence sítě
ω_0	[rad]	vlastní úhlová frekvence obvodu zátěže
f_0	[Hz]	vlastní frekvence obvodu zátěže
I_{ch}	[A]	proud utržení
L_L	[H]	indukčnost obvodu zátěže
L_N	[H]	indukčnost sítě
L_K	[H]	indukčnost kabelu
L_S	[H]	parazitní indukčnost vakuového vypínače
L_o	[H]	parazitní indukčnost omezovače přepětí
C_L	[F]	kapacita obvodu zátěže
C_N	[F]	kapacita sítě
C_S	[F]	parazitní kapacita vakuového vypínače
C_o	[F]	parazitní kapacita omezovače přepětí
R_L	[Ω]	odpor obvodu zátěže
R_N	[Ω]	odpor přívodního vedení sítě
R_A	[Ω]	odpor kontaktů vakuového vypínače
R_B	[Ω]	hlavní tlumící odpor
R_C	[Ω]	přídavný tlumící odpor
R_o	[Ω]	parazitní odpor kontaktů omezovače přepětí
BV	[kV]	výdržné napětí
A	[kV/ms]	strmost výdržného napětí
B	[kV]	počáteční velikost výdržného napětí
C	[A/ μ s ²]	kritické zakřivení proudu
D	[A/ μ s]	kritická strmost proudu
t_{open}	[s]	čas otevření
v_{open}	[m/s]	rychlost rozpojení kontaktů
U_C	[V]	trvalé provozní napětí omezovače
U_R	[V]	jmenovité napětí omezovače

Úvod

V posledních desetiletích dochází k prudkému rozvoji v oboru elektrických spínacích přístrojů. S tím rostou i nároky na jejich vypínací schopnosti, spolehlivost a životnost. Právě pro výborné parametry ve všech těchto oblastech jsou stále využívanější vakuové vypínače.

Proto je důležité pochopit procesy, které na nich při vypínacím ději probíhají. Mezi nejrizikovější patří vypínání indukativních proudů, protože snadno vzniká přepětí vlivem předčasného useknutí proudu či opětovného zapálení oblouku. Tato přepětí vysoce namáhají izolace jednotlivých zařízení sítě a v některých případech může dojít k jejímu průrazu, a tedy i zničení celého zařízení. Z těchto důvodů je při návrhu či rekonfiguraci sítě důležité zvážit veškeré možné dopady, aby se předešlo zbytečným škodám a byl zaručen dlouholetý spolehlivý provoz sítě a jednotlivých zařízení.

K dobrému návrhu je buď zapotřebí provést řadu měření, které jsou však velmi nákladná, nebo provoz sítě nasimulovat pomocí vhodného výpočetního programu. Světově nejrozšířenějším a nejpoužívanějším programem pro simulování přechodných dějů v elektrických obvodech je software ATP-EMTP. Aby výsledky získané simulací co nejvíce odpovídaly realitě, je zapotřebí vytvořit model vakuového vypínače, který by respektoval složité fyzikální procesy, které na vypínači ve skutečnosti probíhají. To je i hlavním cílem této práce.

S funkčním modelem je možné simulovat vypínací procesy při vypínání indukativních proudů, ty pak analyzovat a na jejich základě vytvořit pravidla pro vypínání indukativní zátěže pomocí vakuového vypínače. Této problematice se věnuje poslední část mojí diplomové práce, kdy byl model vakuového vypínače testován při vypínání indukčního motoru v průmyslovém rozvodu. V této části práce jsou i popsány metody ochrany ohrožených zařízení, neboť jejich správná funkce a spolehlivý provoz jsou zajištěny pouze v případě, že nejsou vystaveny nebezpečným přepětím.

1. Vakuový vypínač

Výkonový vypínač je spínací elektrický přístroj, jehož funkcí je zapínat a vypínat elektrický obvod. Dle normy Mezinárodní elektrotechnické komise (IEC) je definován jako: „Mechanické spínací zařízení, které je schopné zapínat, přenášet a vypínat elektrický proud za jmenovitých podmínek, a dále také zapínat, přenášet po určenou dobu a vypínat proud za určených speciálních podmínek, např. zkratech“.

Ideální vypínač by měl splňovat tyto dvě základní funkce:

- *v sepnutém stavu je dobrý vodič, který je z mechanického i teplotního hlediska schopen přenášet jmenovité i zkratové proudy*
- *v rozepnutém stavu je výborný izolátor, a to jak mezi kontakty, tak mezi napětím proti zemi či fázemi*

Vzhledem k náročným podmínkám, ve kterých výkonové vypínače pracují, však bývá splnění těchto funkcí ve skutečnosti velmi obtížné. Hlavním faktorem bývá typ použitého zhášecího média, ve kterém dochází k hoření oblouku. To totiž určuje spínací i vypínací schopnosti vypínače. U výkonových vypínačů se nejčastěji setkáme se zhášecími médii jako olej, stlačený vzduch, fluorid sírový (SF₆) nebo vakuum. A právě vakuum se pro své výborné izolační vlastnosti jeví pro spínací přístroje jako ideální zhášecí médium, avšak pro řadu konstrukčních problémů se začaly vakuové vypínače v praxi prosazovat až v několika posledních dekádách. Protože jsou vysoce spolehlivé, mají výborné vypínací schopnosti a vysokou životnost (přes pracovních 10 000 cyklů), vytlačují postupně z trhu své konkurenty.

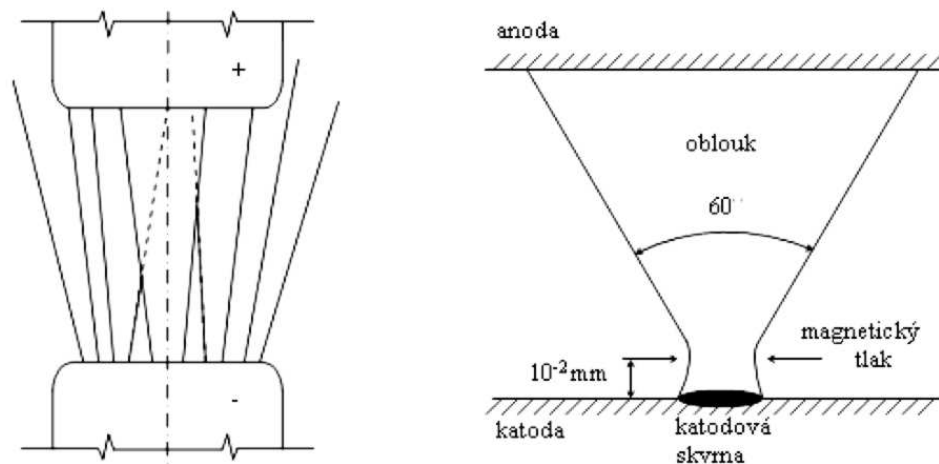
1.1 Princip vakuového vypínače

Pro pochopení funkce vakuového vypínače je nutno porozumět pochodům, které probíhají při hoření oblouku ve vakuu. Hoření oblouku není možná správný termín, protože se jedná spíše o doutnavý výboj, který při proudech nad 10 kA může přejít ve vysokotlaký oblouk [1]. Protože ve vakuu nejsou žádné volné nosiče náboje, musí je dodat kontaktní hlavice odpařením kovových par. Jejich ionizací se vytvoří vodivé médium, které přenáší mezi kontakty elektrický proud.

1.2 Vznik vakuového oblouku

1.2.1 Difúzní oblouk

Oblouk vzniká krátce po oddálení kontaktů, kdy jsou z tzv. katodové skvrny emitovány kovové páry s velmi vysokou teplotou. Ty difundují jednak k chladnější anodě, jednak k okolním chladným stěnám, na nichž kondenzují. Jedna katodová skvrna může přenášet proud kolem 100–200A [1]. Jak roste proud průchozí vypínačem, roste i počet katodových skvrn. Když proud vypínačem klesá, katodových skvrn ubývá. Tím klesá množství emitovaných par, snižuje se počet nosičů náboje a oblouk uhasíná. Při zániku oblouku dochází k snížení hustoty par a k rekombinaci částic, což v souhrnu vede k deionizaci mezikontaktního prostoru a tedy rychlému vypnutí. Tento oblouk má velmi nízké napětí a difúzní charakter.



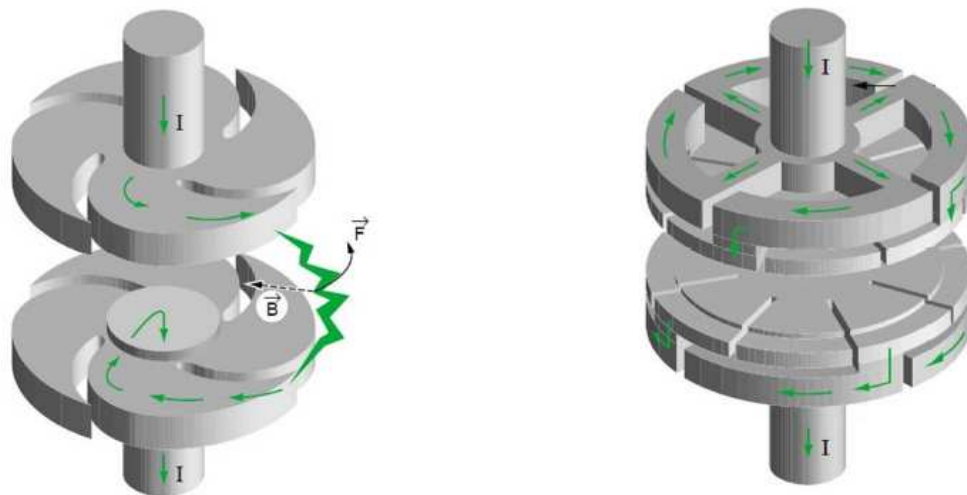
Obrázek 1-1 Vznik difúzního oblouku, čerpáno ze zdroje [1]

1.2.2 Vysokotlaký oblouk

Pokud velikost přenášeného proudu překročí jistou hranici (kolem 10 kA), mění se charakter oblouku z difúzního na vysokotlaký. Plasma oblouku se totiž přesouvá blíže anodě, což vede k jejímu zahřívání a vzniku anodové skvrny. Vznik anodové skvrny je pro nás nežádoucí, protože při průchodu proudu nulou se z anodové skvrny stává katodová a nedojde k přerušení proudu. Proto je nutné zajistit, aby k vytváření anodových skvrn nedocházelo. Jedním z možných řešení je vytvoření magnetického pole, které by oblouk strhávalo. To lze zajistit speciální konstrukcí kontaktů. Dle směrů působení magnetického pole na kontakt hovoříme o poli radiálním a axiálním.

1.3 Vypínače využívající radiální magnetické pole

Tento typ vypínače využívá elektrodynamické síly, které uvedou oblouk do rotace po povrchu kontaktů. Tyto elektrodynamické síly vznikají vzájemnou interakcí vnějšího magnetického pole vytvářeného proudem protékajícím kontakty a magnetického pole oblouku. Rotace oblouku je dosaženo speciální konstrukcí kontaktů, které jsou řešeny jako spirálové nebo se zářezy. V oblasti malých proudů se tvoří katodové skvrny v centrální oblasti a ty, které se dostanou na její okraj, zanikají. V oblasti velkých proudů se vytvoří v centrální oblasti vysokotlaký oblouk, který je vytlačěn k okrajům a začne rotovat. Paty oblouku se působením rotace dostávají do míst, kde mají horší podmínky pro svoji existenci a přechází tak do difúzního tvaru. K tomu dochází s dostatečným předstihem před průchodem nulou, aby teplota kontaktů mohla poklesnout, zmenšilo se množství a tlak par a oblouk mohl při průchodu nulou zaniknout.



Obrázek 1-2 Princip vzniku radiálního a axiálního magnetického pole, čerpáno z [1]

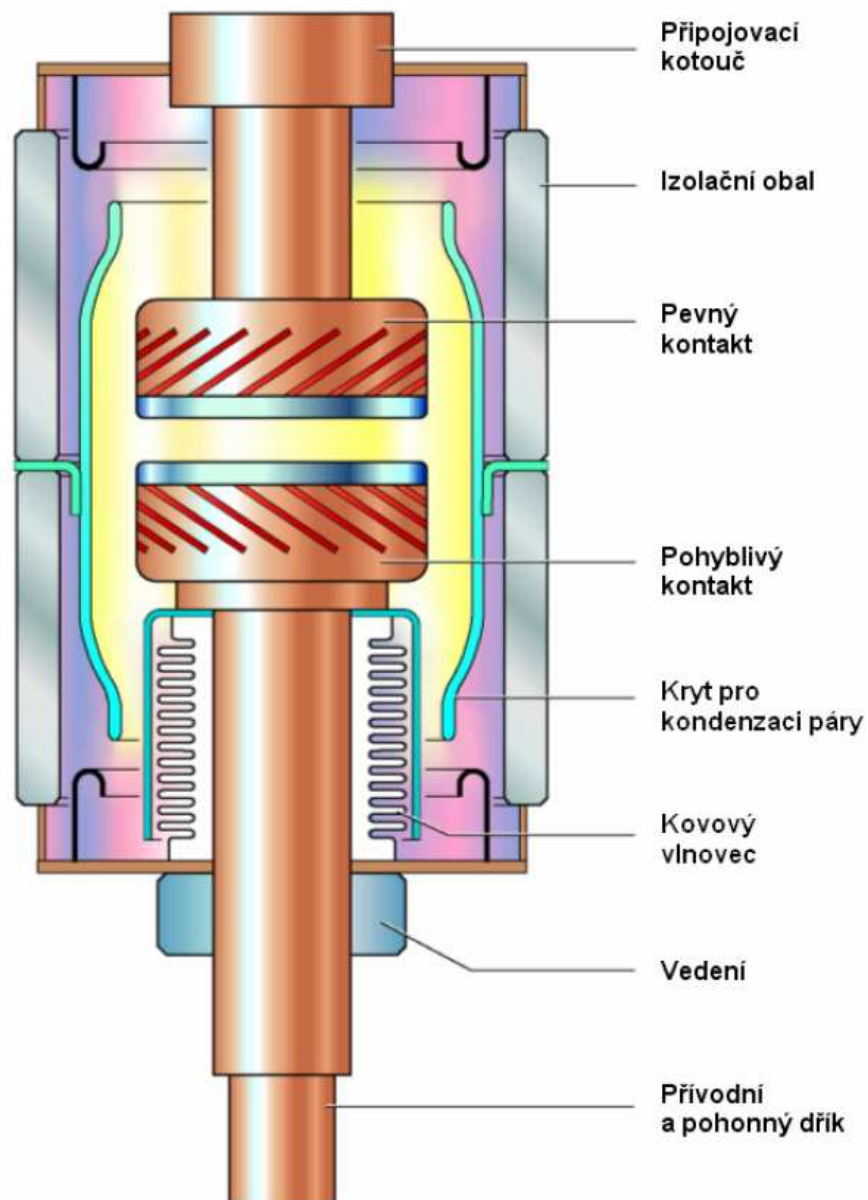
1.4 Vypínače využívající axiální magnetické pole

Princip vypínače využívající axiální magnetické pole pro potlačení vzniku vysokotlakého oblouku je odlišný. Axiální pole zformuje oblouk do staženého útvaru složeného z paralelních difúzních oblouků, které jsou stabilizovány při minimálním obloukovém napětí. Takto dělený oblouk nemá dostatečnou energii k vytvoření anodové skvrny. K vytvoření axiálního magnetického pole je však zapotřebí vysoká indukce ($B_a = 3,9 \text{ mT}$ na každých 10 kA proudu) [1]. Toho je docíleno začleněním cívek do kontaktů. Může být použita i externí cívka, která obklopuje vypínač.

1.5 Konstrukce vakuového vypínače

1.5.1 Konstrukční uspořádání

Jádrem vakuového vypínače je dvojice spínacích kontaktů. Ty jsou umístěny proti sobě ve vakuové nádobě, v které je podtlak přibližně 10^{-3} Pa [1]. Jeden kontakt je pevný, druhý pohyblivý. Udržení vysoké vakuové těsnosti při současném zachování možnosti pohybu má za úkol vlnovec, který je vyroben z titanové oceli a který určuje mechanickou pevnost vypínače. Důležitou součástí je i kryt pro kondenzaci kovových par, aby neusazovaly na povrchu nádoby. Izolační obal je vyroben buď ze skla, nebo z keramiky.



Obrázek 1-3 Konstrukční uspořádání vakuového vypínače, čerpáno ze zdroje [1]

1.5.2 Materiály kontaktů

Podstatnou otázkou konstrukce vakuových vypínačů je i vhodná volba materiálu spínacích kontaktů, které velkou měrou ovlivňují provozní parametry vypínače. Materiály kontaktů jsou voleny s ohledem na řadu faktorů, které jsou často protichůdné. Hledaný materiál by měl mít výbornou elektrickou a tepelnou vodivost, měl by být dostatečně pevný a odolný proti sváření a měl by mít i dobré odplyňovací schopnosti, což souvisí s jeho teplotou tavení a varu. Dobré elektrické vlastnosti má měď, u které však vlivem nedokonalého odvodu tepla dochází k měknutí a následnému sváření kontaktů. Dobré mechanické vlastnosti má Wolfram. Ten má ale vysokou teplotu varu a proto se těžko odplyňuje, což má za následek usekávání proudu již kolem 100 A [1].

Řešením je použití slitutých materiálů, kdy se do kontaktního materiálu s vysokou mechanickou pevností přimísí materiál s vyšší tenzí par, který zajistí dostatečný počet volných nosičů náboje i při nižší teplotě katodové skvrny. Mezi nejpoužívanější slitiny patří CuBi, WCu, WAg, MoCu a CuCr. Ve výkonových vypínačích se nejčastěji setkáme se slitinou mědi a chromu, přičemž 50–80 % připadá na měď [1]. Chrom kromě výborných mechanických vlastností zlepšuje i izolační pevnost vypínače. Tato slitina má výborné vypínací schopnosti pro techniku vysokého napětí, a tak jedinou její nevýhodou je poměrně vysoký proud useknutí kolem 6 A [1].



Obrázek 1-4 Řez vakuovým vypínačem, čerpáno
ze zdroje [2]

2. Vypínání indukativních proudů

Vypínací proces je přechodový děj, který vzniká během odpojování zátěže od zdroje. Pokud výkonový vypínač dostane povel k vypnutí, dojde k okamžitému rozpojení kontaktů, mezi kterými následně hoří oblouk. Ten by měl v ideálním případě uhasnout při průchodu proudem tzv. „přirozenou nulou“. Zda oblouk při jejím průchodu uhasne, to závisí na veličině zvané „zotavené napětí“. Zotavené napětí je rozdíl potenciálů mezi kontakty vypínače. Pokud se vypínač nachází v sepnutém stavu, je toto napětí nulové. Při zhášení oblouku však může i několikanásobně převýšit napětí sítě.

Když odpojujeme zátěž odporového charakteru, k žádným problémům během vypínání nedochází. Napětí i proud jsou ve fázi a tedy v okamžiku průchodu proudem nulou je i zotavené napětí nulové. V případě vypínání indukativní zátěže (proud je proti napětí zpožděn o fázi 90°) však při průchodu proudem nulou dosahuje zotavené napětí svého maxima, což může vést až k dielektrickému průrazu vypínací dráhy a opětovnému zapálení oblouku. Přechodné zotavené napětí můžeme popsat rovnicí:

$$u_{trv}(t) = U_{\max} [\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)] \quad (2.0-1)$$

U_{\max} značí velikost amplitudy napětí zdroje, ω je úhlová frekvence sítě a ω_0 je vlastní úhlová frekvence obvodu zátěže. Ta je dána vztahem:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_L \cdot C_L}} \quad (2.0-2)$$

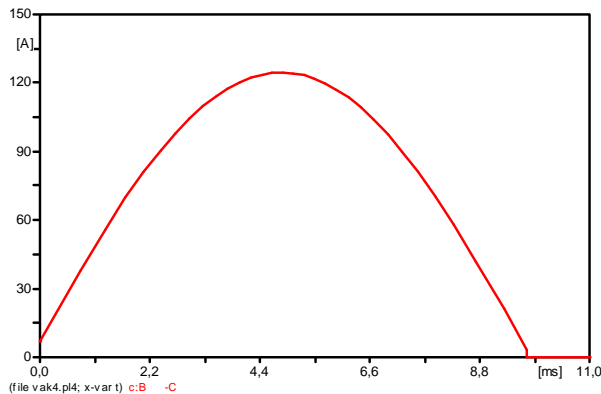
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L \cdot C_L}} \quad (2.0-3)$$

Kde L_L a C_L představují souhrnnou indukčnost a kapacitu obvodu zátěže. Tato frekvence se u sítě se zátěží indukativního charakteru pohybuje většinou v řádu jednotek až desítek kHz. Přechodné zotavené napětí se ve výsledku skládá ze dvou složek. Nosné o frekvenci sítě a na ní superponované napětí o vlastní frekvenci obvodu zátěže.

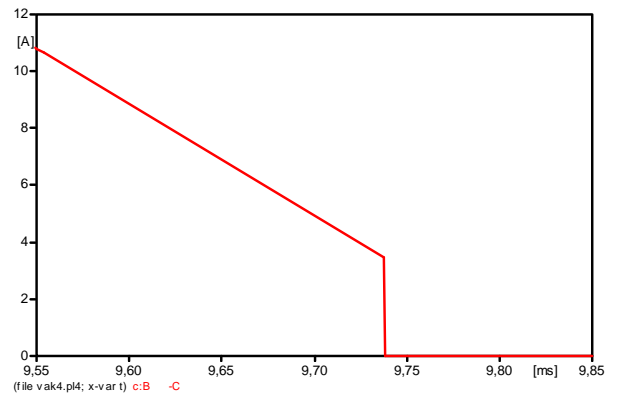
2.1 Useknutí proudu

„Useknutí proudu“ (někdy též nazývané jako „utržení proudu“) je definováno jako náhlé přerušení proudu o frekvenci sítě před průchodem přirozenou nulou. K tomuto jevu u vakuových vypínačů dochází vlivem nestability hoření oblouku při nízkých proudech.

Z katodových skvrn je emitováno menší množství kovových par, klesá počet volných nosičů náboje v mezikontaktním prostoru a oblouk předčasně zhasíná.

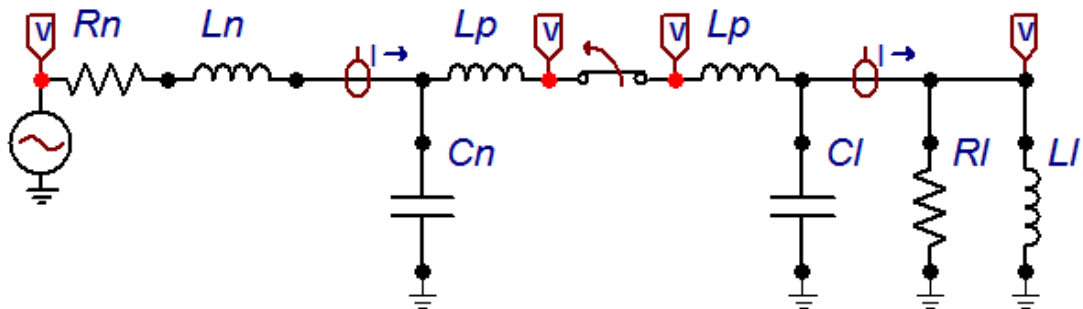


Obrázek 2-1 Proud procházející vypínačem



Obrázek 2-2 Detail proudu utržení

Jaké má useknutí proudu před průchodem přirozenou nulou důsledky si demonstrujeme na odpojování transformátoru naprázdno. Transformátor, který je reprezentovaný indukčností L_L a odporem R_L , je napájen ze sítě 22 kV přes venkovní vedení o parametrech R_N , L_N a C_N . Během rozpojování kontaktů vypínače hoří mezi kontakty oblouk, který se při hodnotě proudu I_{ch} stává nestabilním a zhasíná.



Obrázek 2-3 Schéma sítě při odpojování transformátoru naprázdno

Cívky L_N a L_L se brání náhlé změně proudu indukovaním vnitřního napětí, které nabíjí kondenzátory C_N a C_L . Kondenzátory se zpátky vybijí přes cívky L_N a L_L a celý děj se opakuje. Výsledkem jsou na obou stranách vypínače oscilační přepětí, která mají amplitudu o velikosti:

$$U_{mN} = I_{ch} \cdot \sqrt{\frac{L_N}{C_N}} \quad (2.1-1)$$

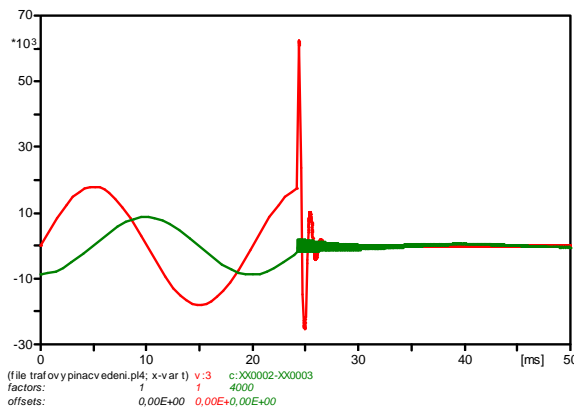
$$U_{mL} = I_{ch} \cdot \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (2.1-2)$$

A oscilují při frekvencích:

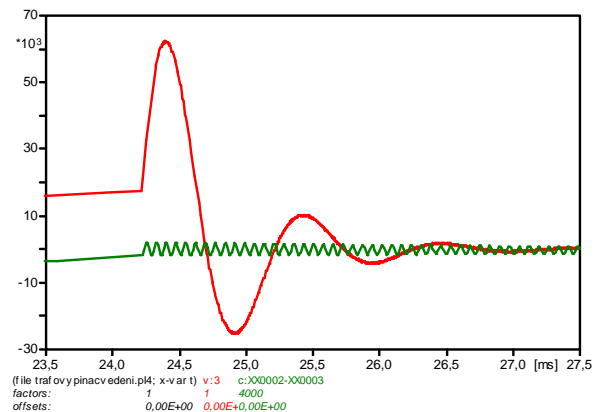
$$f_{0N} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_N \cdot C_N}} \quad (2.1-3)$$

$$f_{0L} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L \cdot C_L}} \quad (2.1-4)$$

Protože indukčnost L_L představující hlavní magnetizační reaktanci transformátoru je mnohem větší jak indukčnost vedení L_N , je i přepětí na straně zátěže mnohonásobně větší než na straně sítě. Stejně tak vlastní frekvence obvodu zátěže je mnohem menší než na straně sítě. To je dobře patrné na obrázcích 2-4 a 2-5, kde červeně je označeno napětí na straně zátěže a zeleně proud průchozí vypínačem. Vidíme, že v důsledku useknutí proudu mohou vznikat nebezpečná přepětí, která mohou dosahovat značně vysokých hodnot. A ta jsou dle vztahu 2.1-2 tím větší, čím větší je hodnota proudu utržení.

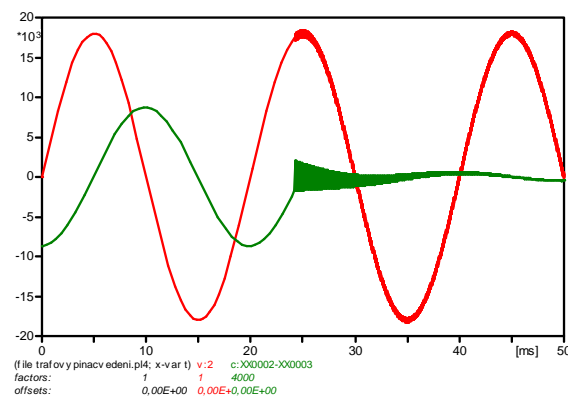


Obrázek 2-4 Napětí na straně zátěže

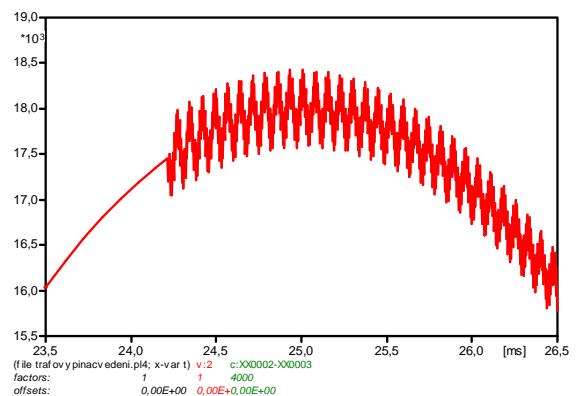


Obrázek 2-5 Napětí na straně zátěže v detailu

Na straně sítě mají tyto oscilace velmi nízkou amplitudu a vysokou frekvenci, což je dobře patrné v detailu napětí na obrázku 2-7.



Obrázek 2-6 Napětí na straně sítě



Obrázek 2-7 Napětí na straně sítě v detailu

U vakuových vypínačů je velikost proudu useknutí I_{ch} závislá na více faktorech. Význam volby materiálu byl již podrobně vysvětlen v předchozí kapitole. Důležitým faktorem je i velikost vypínaného proudu. Protože neexistuje přímý způsob, jak změřit hodnotu proudu useknutí, stanovuje se její hodnota nepřímo na základě vztahu 2.1-2, z kterého si vyjádříme I_{ch} . Poté testujeme vypínač na zkušebním obvodu, jehož parametry zátěže známe, a přepětí vzniklé v důsledku useknutí proudu můžeme změřit.

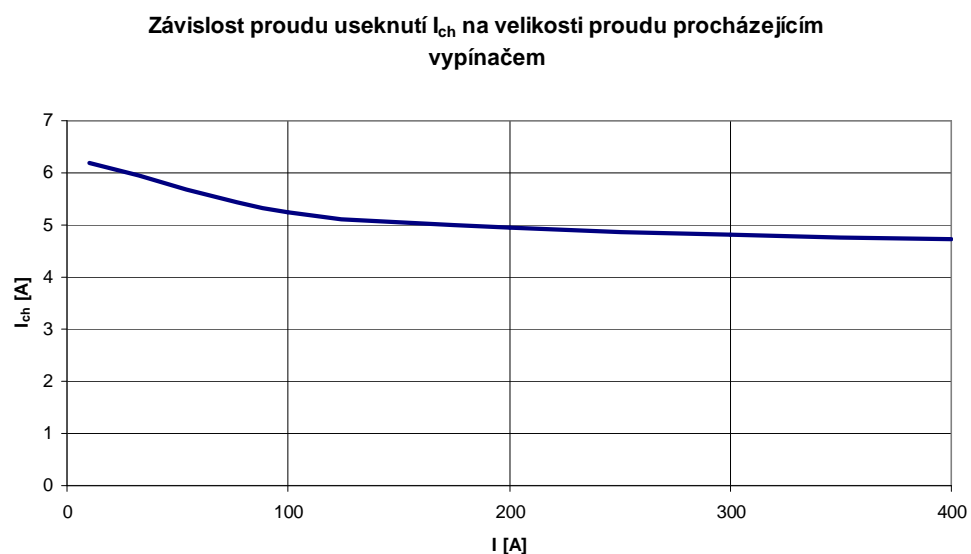
Protože při každém pokusu panují na kontaktech vakuového vypínače jiné podmínky, dostáváme pro stejné nastavení zkušebního obvodu různé hodnoty proudu useknutí. Proto musíme pro každý měřený proud zátěže testování několikrát opakovat a z naměřených výsledků spočítat průměr. Pokud průměrné hodnoty proudu useknutí pro různé proudy zátěže dáme do grafu a ten proložíme exponenciální funkcí, dostaneme vztah [3]:

$$I_{ch} = (\omega \cdot I \cdot \alpha \cdot \beta)^q \quad (2.1-5)$$

Kde ω značí úhlovou frekvenci sítě, I je amplituda průchozího proudu vypínačem a α , β a q jsou konstanty. Pro kontakty vyrobené ze slitiny CuCr byly zjištěny tyto hodnoty:

α	$6,2 \cdot e^{-16} s$
β	14,3
q	$(1 - \beta)^{-1}$

Po dosazení do vzorce dostaneme pozvolna klesající závislost, kdy s rostoucím zatížením vypínače klesá velikost proudu useknutí I_{ch} .



Obrázek 2-8

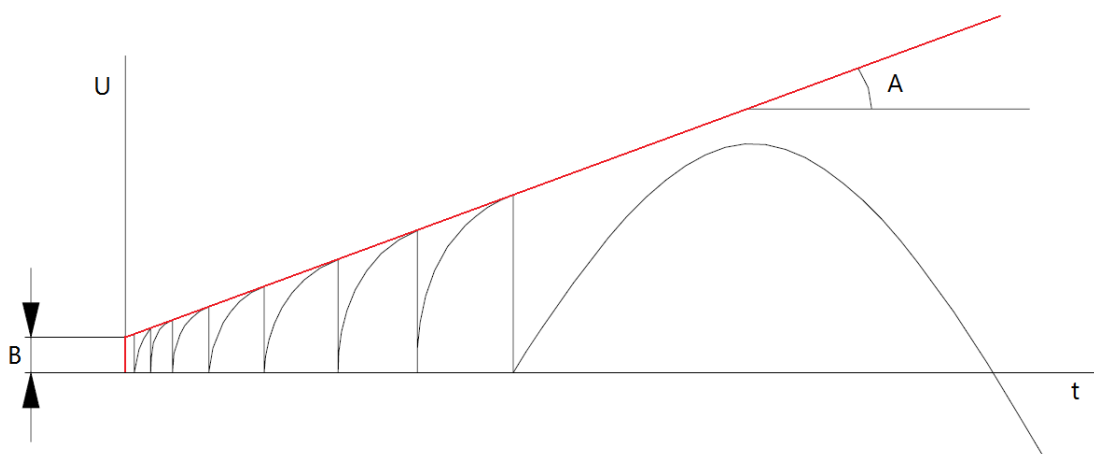
2.2 Charakteristika výdržného napětí

Charakteristika výdržného napětí patří mezi základní parametry vakuového vypínače a má zásadní vliv na jeho vypínací schopnosti. Po uhasnutí oblouku se kovové výpary usadí na kontaktech a na ochranném štítu a dochází k prudkému poklesu volných nosičů náboje v mezikontaktním prostoru a jeho deionizaci. Tím se velmi rychle obnoví podmínky vakua, což vede k zvýšení dielektrické pevnosti mezi kontakty. Na průběhu obnovy dielektrické pevnosti v čase závisí, zda dojde k úspěšnému uhasnutí oblouku či nikoliv. Pokud je zotavné napětí větší než výdržné napětí, které je dáno dielektrickou pevností vypínací dráhy, dojde k znovuzapálení oblouku.

Průběh charakteristiky výdržného napětí závisí na vzdálenosti kontaktů a na rychlosti jejich oddalování. Čím větší je mezikontaktní vzdálenost, tím je výdržné napětí vyšší a čím vyšší je rychlost oddalování kontaktů, tím větší je jeho strmost. Proběhlo mnoho měření této charakteristiky a ve všech případech byla zjištěna exponenciální závislost. Nás však při studiu vypínacích procesů na vakuovém vypínači zajímá pouze její průběh na prvním milimetru vypínací dráhy, který jde s velmi dobrou přesností aproximovat pomocí přímky. Velikost výdržného napětí v závislosti na čase tak lze popsat pomocí rovnice [3]:

$$BV = A \cdot (t - t_{open}) + B \quad (2.2-1)$$

Kde BV značí tzv. „výdržné napětí“ (breakdown voltage), t_{open} je čas otevření, A je strmost výdržného napětí a B jeho počáteční velikost.

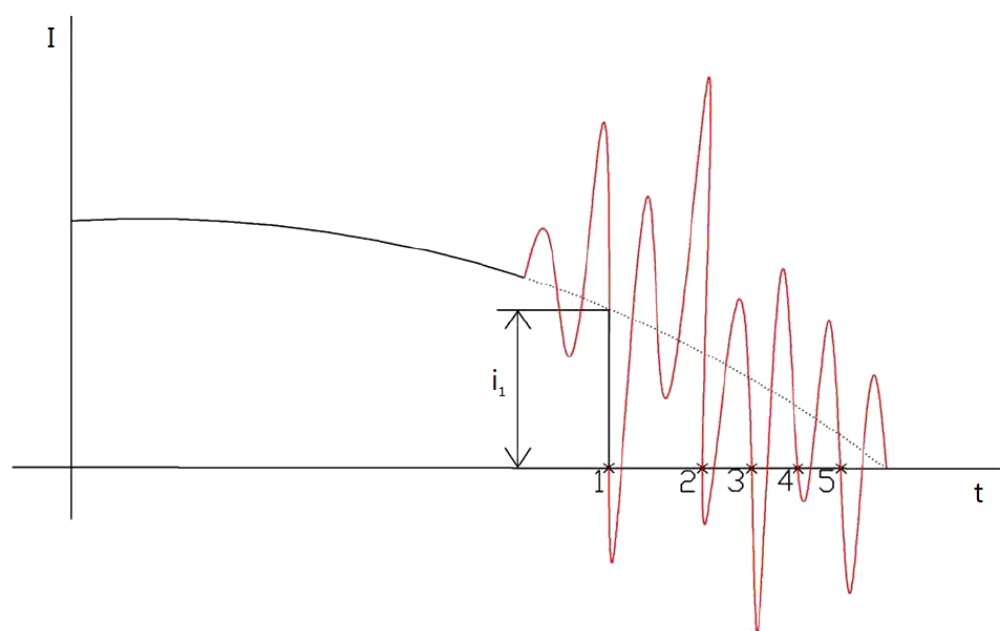


Obrázek 2-9 Charakteristika výdržného napětí, čerpáno ze zdroje [4]

Stanovení parametrů A a B probíhá na základě měření na zkušebních obvodech, kdy při vypínacím procesu dochází k opětovnému zapálení oblouku. K tomuto jevu dochází, když zotavné napětí překoná dielektrickou pevnost mezi kontakty, což má za následek prudký pokles zotavného napětí k nule. Tento děj se několikrát opakuje, dokud nakonec nedojde k úspěšnému vypnutí. Spojením špiček zotavného napětí, jehož průběh známe z měření, dostaneme přímku o sklonu A a počáteční velikosti B . Vzhledem k deformacím na kontaktech lze i na jednom typu vypínače naměřit různé hodnoty těchto parametrů. Ve většině případů se strmost výdržného napětí pohybuje mezi 20–60 kV/ms a jeho počáteční velikost v rozmezí 0–5 kV [3].

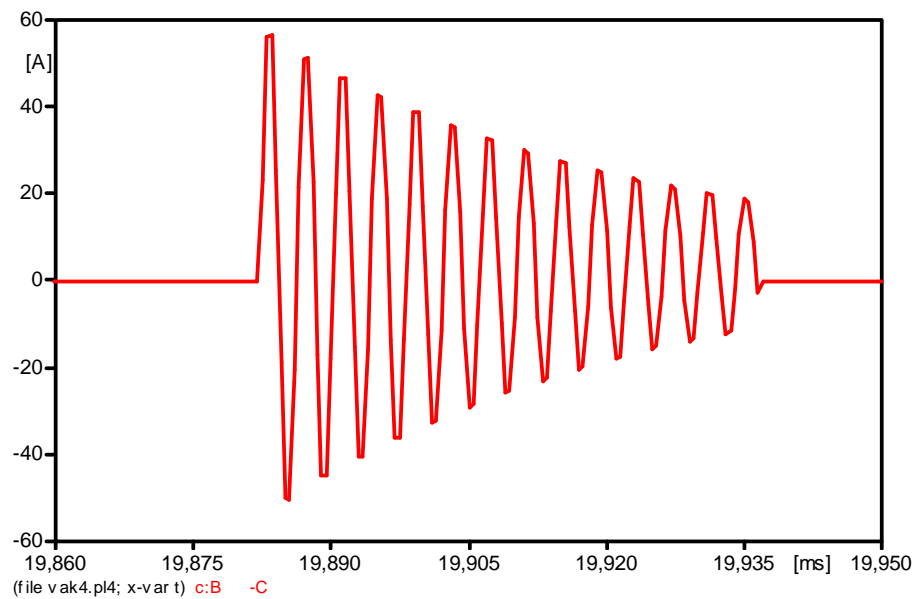
2.3 Zhášení vysokofrekvenčních proudů

Hoří-li při rozepínání vypínače mezi kontakty oblouk, vznikají vlivem nestability jeho hoření vysokofrekvenční proudové kmity, které se superponují na proud o frekvenci sítě.



Obrázek 2-10 Vysokofrekvenční kmity proudu, čerpáno ze zdroje [5]

Tyto kmity mohou způsobit, že k uhasnutí oblouku může dojít předčasně v tzv. „vnucené nule“ místo v při průchodu přirozenou nulou. To má za následek nárůst zotavného napětí, které při překročení dielektrické pevnosti vypínací dráhy vede k opětovnému zapálení oblouku. S rostoucím časem a blížícím se průchodem přirozenou nulou se amplituda těchto kmitů zmenšuje, až nakonec tato vysokofrekvenční složka proudu zaniká.



Obrázek 2-11 Zánik vysokofrekvenční složky proudu

Musí však být splněna podmínka, aby strmost proudu při průchodu nulou byla menší než kritická hodnota. Pokud ano, vypínač úspěšně vypne. Tuto podmínku lze vyjádřit matematicky pomocí vzorce [3]:

$$\frac{di}{dt} = C \cdot (t - t_{open}) + D \quad (2.3-1)$$

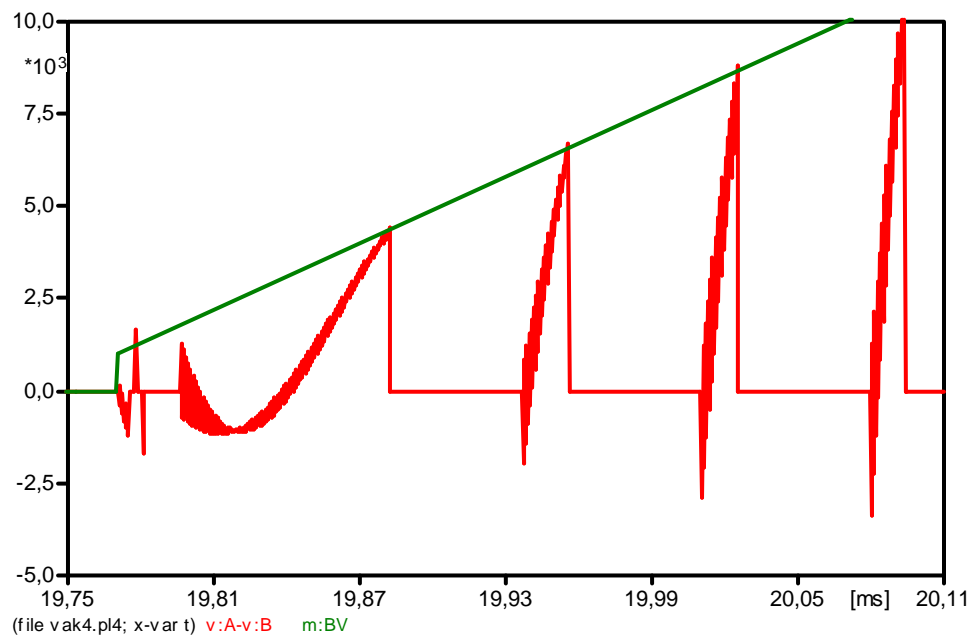
Kde di/dt je změna proudu v čase, t_{open} je čas otevření, D je kritická strmost proudu při průchodu nulou a C je kritické zakřivení proudu při průchodu nulou. Kritická strmost u vakuových vypínačů se pohybuje od 100–600 A/ μ s. Přesné hodnoty parametrů C i D pro jednotlivé druhy vypínačů lze najít v literatuře [3].

2.4 Opětovné zapálení oblouku

K tomuto jevu na vakuovém vypínači dochází, jsou-li splněny tyto podmínky:

- *Je vypínána zátěž indukativního charakteru*
- *K rozpojení kontaktů vypínače dojde těsně před průchodem přirozenou nulou*
- *Dielektrická pevnost není dostačující, aby vydržela zotavné napětí*
- *Obvod zátěže má takový charakter, že strmost zotavného napětí je větší, než strmost charakteristiky výdržného napětí vypínače*
- *Vypínač je schopen zhášet vysokofrekvenční kmity proudů*

Pro lepší pochopení vzniku tohoto děje si popíšeme situaci na obrázku 2-12. Před průchodem přirozenou nulou dojde vlivem nestability hoření oblouku k useknutí proudu, které vede k nárůstu zotavného napětí (červená barva). To v okamžiku překročení charakteristiky výdržného napětí (zelená barva) vede k opětovnému zapálení oblouku a vypínačem opět prochází proud, na kterém je však nasuperponována vysokofrekvenční složka. Pokud je její amplituda vyšší než složky proudu o síťové frekvenci, dochází k dalšímu useknutí proudu, tentokrát ve vnučené nule. To vyvolá opětovný nárůstu zotavného napětí. Celý cyklus se několikrát opakuje, než nakonec dojde k uhasnutí oblouku a úspěšnému vypnutí.



Obrázek 2-12 Opětovné zapálení oblouku

3. Tvorba modelu vakuového vypínače

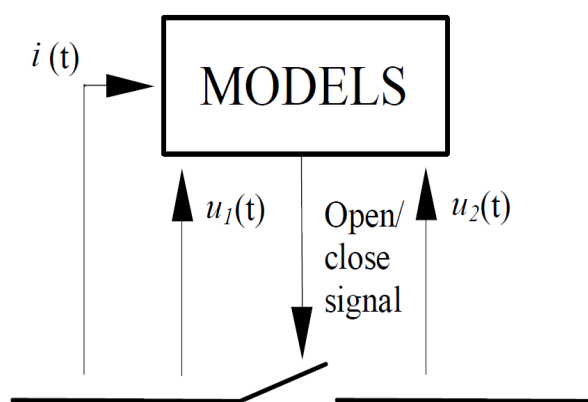
K simulaci vypínání indukativních proudů jsem si vybral program ATP-EMTP, který je světově nejpoužívanějším simulačním programem k modelování elektrických sítí. Jeho grafická nadstavba ATP-Draw však neobsahuje žádný odpovídající model vakuového vypínače, proto bylo nutno jej vytvořit. Při jeho tvorbě jsem bral ohledy na:

- Velikost proudu useknutí
- Charakteristiku výdržného napětí
- Schopnost vypínače zhaset vysokofrekvenční proudy

Jako základ modelu byl použit ideální vypínač kontrolovaný pomocí logiky programu napsanému v jazyku FORTRAN. Vstupní veličinami jsou napětí vypínače na straně zdroje i zátěže a proud průchozí vypínačem. Tyto vstupy pak vnitřní logika vyhodnotí a rozhodne, zda se mají kontakty vypínače sepnout či rozpojit. Výstupem je veličina „*vcbstate*“, která ovládá vypínač.

Dalšími výstupy programu jsou velikost výdržného napětí a počítadlo opětovných zapálení oblouku. Tyto výstupy slouží pouze k vyhodnocení výsledků a nemají na funkci vypínače vliv. Uživatel si může zvolit vstupní data, která ovlivňují vypínací schopnosti vypínače. Lze tak simulovat různé procesy, které probíhají při vypínání indukativních proudů vakuovým vypínačem.

Mezi vstupní parametry modelu patří:

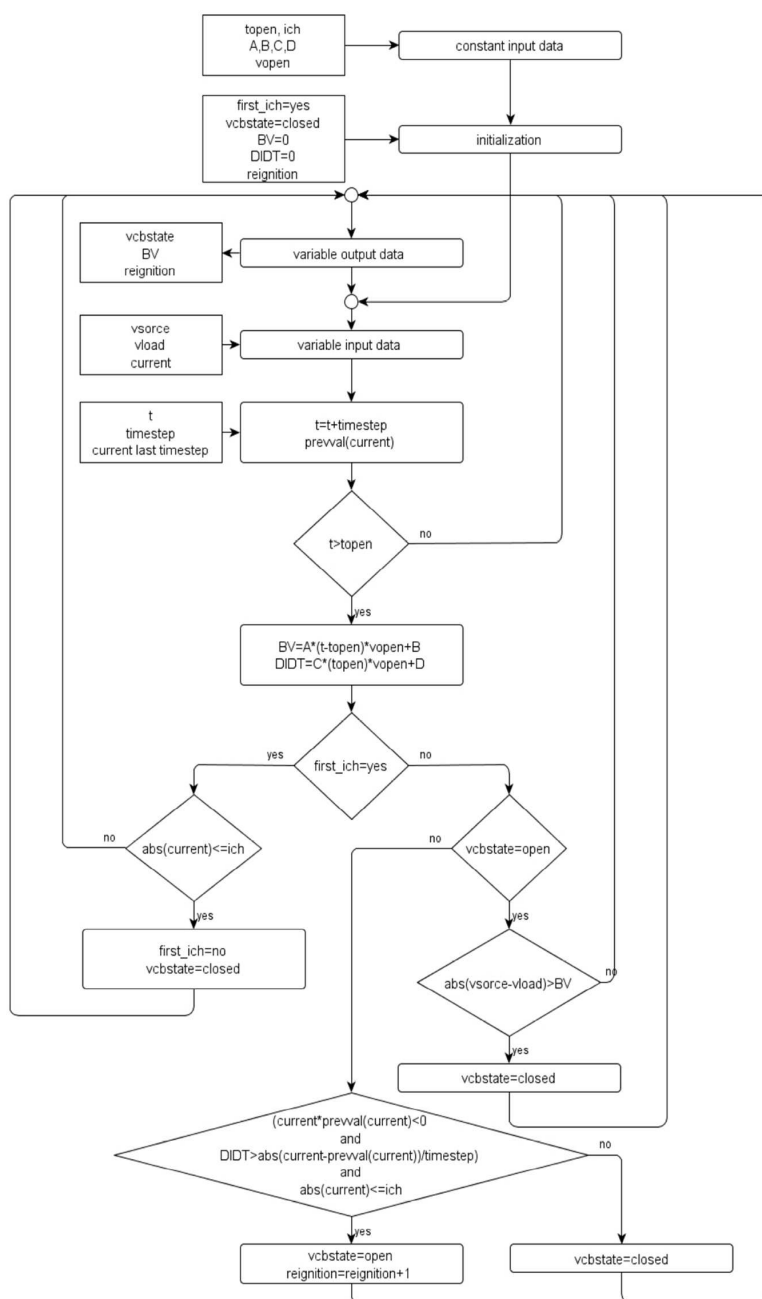


Obrázek 3-1 Princip modelu vakuového vypínače,
čerpáno ze zdroje [6]

<i>A</i>	[kV/ms]	strmost výdržného napětí
<i>B</i>	[kV]	počáteční velikost výdržného napětí
<i>C</i>	[A/μs ²]	kritické zakřivení proudu
<i>D</i>	[A/μs]	kritická strmost proudu
<i>I_{ch}</i>	[A]	proud useknutí
<i>t_{open}</i>	[ms]	čas otevření
<i>v_{open}</i>	[m/s]	rychlost rozpojení kontaktů

O tom jak program funguje, napovídá vývojový diagram. Nejprve jsou načtena vstupní data a počáteční podmínky. Program jde následně do nekonečné smyčky, která je každý krok simulace přepočítána. V počátečním stavu jsou kontakty vypínače spojené a vstupní logika modelu vypínače je ve stavu „sepnuto“. Od okamžiku času otevření t_{open} běží výpočet charakteristiky výdržného napětí a zážecí schopnosti dle rovnic 2.2-1 a 2.3-1. Změna nastává až v okamžiku, kdy proud průchozí vypínačem je menší než proud utržení a výstupní logika kontakty poprvé rozpojí.

V ten moment začne závod mezi zotavným napětím a charakteristikou výdržného napětí. Když velikost zotavného napětí zvítězí nad dielektrickou pevností vypínací dráhy, dojde k opětovnému zapálení oblouku a vypínač se přepne zpátky do polohy „sepnuto“. Pokud je vypínač znovu sepnutý, je sledováno, zda strmost proudu při průchodu nulou je menší než kritická. Jestliže ne, kontakty ovládaného vypínače se znova rozpojí. Tento proces probíhá do doby, než dielektrická pevnost mezi kontakty není dostatečná, aby vydržela zotavné napětí a proud vypínačem mohl při průchodu přirozenou nulou zaniknout.

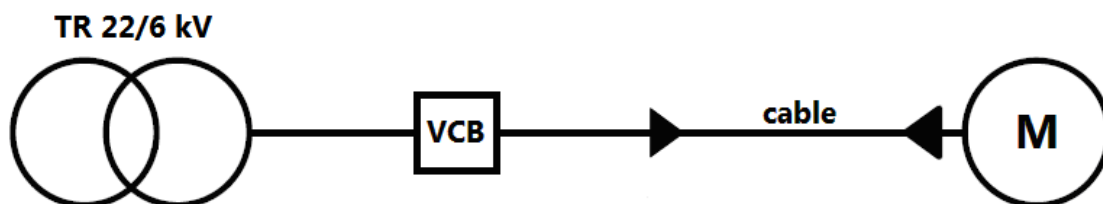


Obrázek 3-2 Vývojový diagram modelu vakuového vypínače, čerpáno ze zdroje [7]

4. Vypínání indukční zátěže pomocí vakuového vypínače

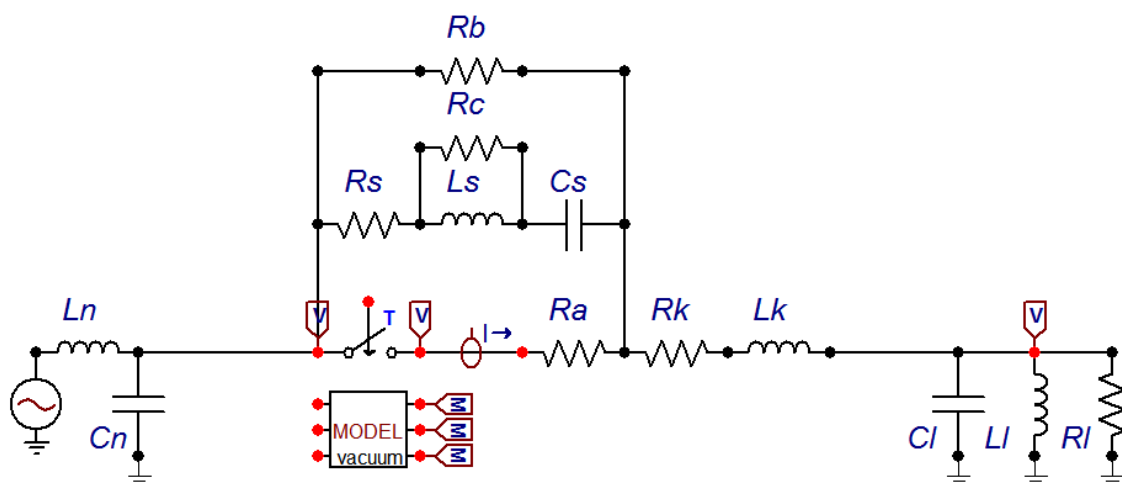
Vakuové vypínače se pro své dobré vypínací schopnosti a vysokou spolehlivost používají převážně na úrovni vysokého napětí. Zpravidla na hladině 1–52 kV, které se v anglické literatuře nazývá jako tzv. úroveň středního napětí („*medium voltage*“). Na této napěťové hladině se můžeme s problematikou vypínání indukční zátěže setkat při odpojování transformátoru naprázdno, tlumivek reaktorů nebo indukčních motorů. Nejčastěji však při vypínání motorů v průmyslových rozvodech na hladině 3–15 kV.

Proto jsem si pro testování modelu vakuového vypínače vybral typický příklad z rozvodné sítě v průmyslovém podniku, kdy indukční motor je napájen přes kabel a vypínač z distribučního transformátoru. V programu ATP Draw jsem vytvořil odpovídající jednofázový model obvodu a simuloval přechodné děje, které při vypínání motoru mohou nastat.



Obrázek 4-1 Náhradní schéma sítě, VCB znamená „*Vacuum circuit breaker*“

Zdroj o napětí 6 kV spolu s indukčností L_N a kapacitou C_N tvoří stranu sítě. Protože hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru je efektivní hodnota sdruženého napětí, bylo nutno provést přepočty na velikost amplitudy fázového napětí. Stranu zátěže představují kabel o odporu R_K a indukčností L_K a indukční motor reprezentovaný odporem R_L a indukčností L_L . Kabel a motor mají společnou kapacitu proti zemi C_L . Prvky R_S , L_S a C_S tvoří sériový rezonanční obvod, který je paralelně připojen k modelu vakuového vypínače. Tento sériový rezonanční obvod slouží k věrnější simulaci vypínacího děje, protože skutečný vakuový vypínač má také parazitní indukčnost, odpor a kapacitu. Zároveň zesiluje vysokofrekvenční složku proudu. Přirozenou tlumící schopnost vakuového vypínače bere v úvahu odpor R_B . Odpor R_A nahrazuje odpor kontaktů vypínače, odpor R_C má pomocnou tlumící funkci. Velikost všech prvků v schématu lze nalézt v tabulce.



Obrázek 4-2 Schéma sítě s vakuovým vypínačem při vypínání motoru

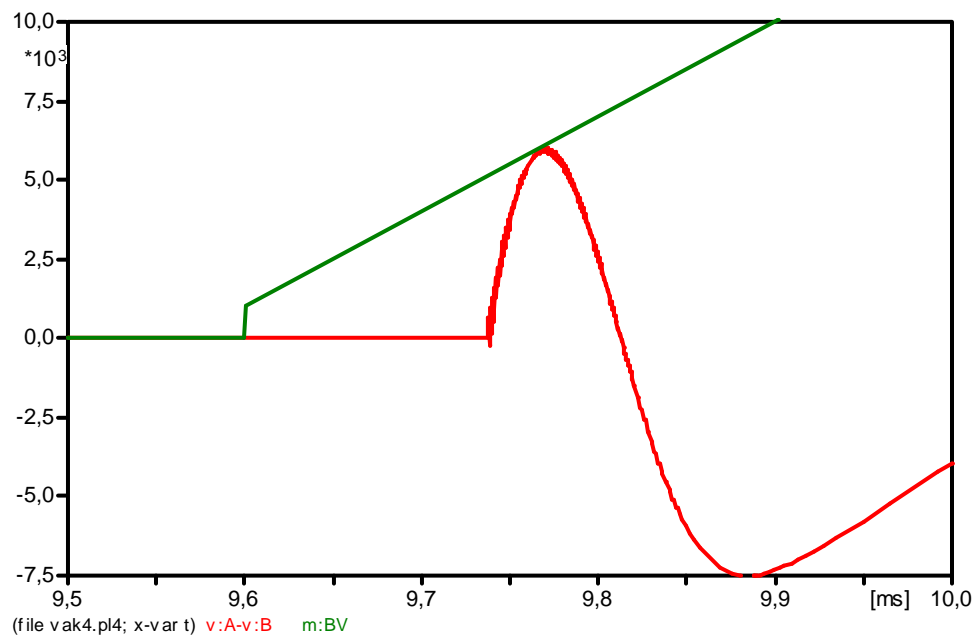
	$L_C = 5 \text{ mH}$	$C_C = 0,1 \mu\text{F}$
$R_S = 50 \Omega$	$L_S = 5 \text{ nH}$	$C_S = 200 \text{ pF}$
$R_K = 2 \Omega$	$L_K = 40 \mu\text{H}$	
$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	$L_L = 120 \text{ mH}$	$C_L = 10 \text{ nF}$
$R_A = 1 \cdot 10^{-5} \Omega$	$R_B = 9500 \Omega$	$R_C = 1,33 \Omega$

Při vypínání motoru mohou nastat celkem tři případy:

- Vypínač úspěšně vypne při průchodu přirozenou nulou bez opětovného zapálení oblouku
- Vypínač úspěšně vypne při průchodu přirozenou nulou s opětovným zapálením oblouku
- Vypínač v důsledku opětovného zapálení oblouku úspěšně vypne až v příští půl-periodě při průchodu přirozenou nulou

O tom, o jaký případ se jedná, rozhoduje hned několik faktorů. Mezi hlavní patří čas otevření, charakteristika výdržného napětí, schopnost vypínače zhaset vysokofrekvenční složky proudu, ale také i parametry obvodu zátěže. Statisticky nejpravděpodobnější je první varianta. Pokud má vypínač dobré zhasecí schopnosti, nemělo by k vzniku opětovného zapálení oblouku dojít přibližně 500 μs před průchodem přirozenou nulou, tedy v 95 % všech případů (půl-perioda proudu o frekvenci sítě má 10 ms). Tento čas je dán hlavně velikostí proudu useknutí a velikostí proudu zátěže. V našem případě je proud useknutí 3,5 A a velikost amplitudy proudu zátěže 125 A, k prvnímu useknutí proudu tedy dojde v čase 260 μs před průchodem přirozenou nulou.

Kritický je však okamžik prvního opětovného zápalu oblouku. Ten nastává v momentě, kdy velikost zotavného napětí poprvé překročí charakteristiku výdržného napětí. Při naší konfiguraci obvodu a při strmosti výdržného napětí 30 kV/ms k tomu dojde v čase 400 μ s před průchodem přirozenou nulou. Na obrázku 4-3 vidíme okamžik, kdy zotavné napětí (červená barva) poprvé překročí charakteristiku výdržného napětí vypínače (zelená barva).

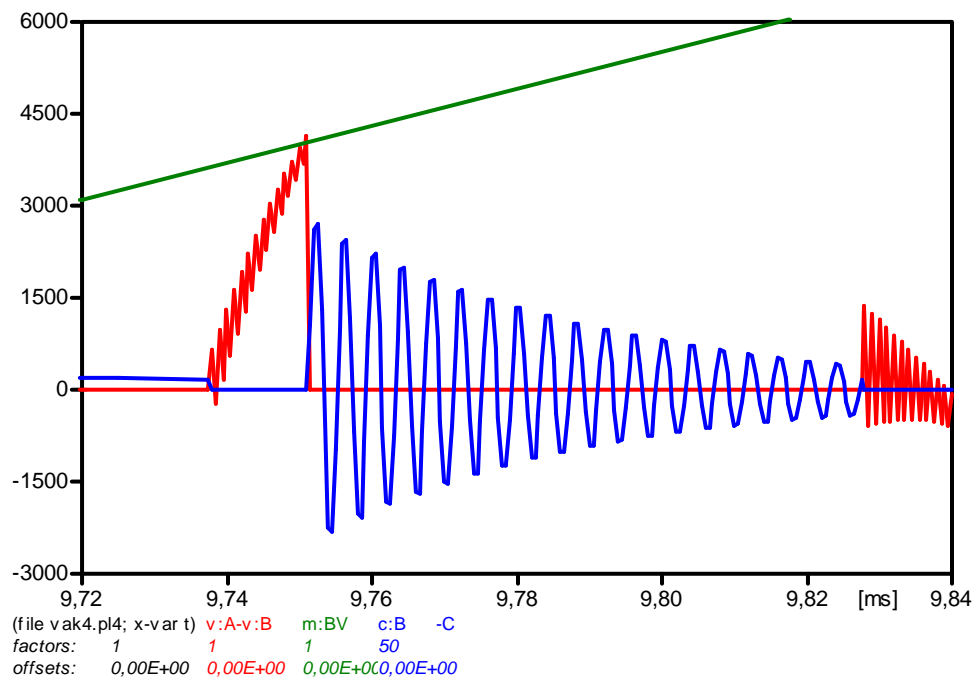


Obrázek 4-3 Překonání dielektrické pevnosti mezi kontakty vypínače

Můžeme tedy říci, že na intervalu 0–9,6 ms dochází k úspěšnému zhašení oblouku bez vzniku jeho opětovného zapálení. V důsledku useknutí proudu však vzniká na straně zátěže přepětí, jehož velikost je dána vztahem 2.1-2 a jeho frekvence vztahem 2.1-4.

$$U_m = I_{ch} \cdot \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = 12,1 \text{ kV} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L \cdot C_L}} \approx 4,6 \text{ kHz}$$

Tomu odpovídají i hodnoty odečtené z grafu při simulaci, kdy špička napětí na zátěži dosahuje hodnoty 10 kV. O něco menší hodnotu oproti výpočtu lze vysvětlit přidavným tlumením odporu R_b . Horší varianta nastává v době 0–400 μ s před průchodem přirozenou nulou. Vlivem průrazu vypínací dráhy dochází k opětovnému zapálení oblouku a to dokonce několikanásobnému. To může vést až k tomu, že vypínač nestihne uhasit oblouk před průchodem přirozenou nulou a ten hoří celou následnou půl-periodu. Pro bližší pochopení problematiky si popíšeme, jak celý děj probíhá.



Obrázek 4-4 Vypínací proces na vakuovém vypínači

V čase 9,74 ms dojde k useknutí proudu, což vyvolá vznik přechodného zotavného napětí. To má hlavní frekvenci f_1 , ale vlivem vzájemného působení indukčnosti kabelu L_K , společně kapacity zátěže C_L a podélné parazitní kapacity vypínače C_S vznikají kmity o frekvenci f_2 .

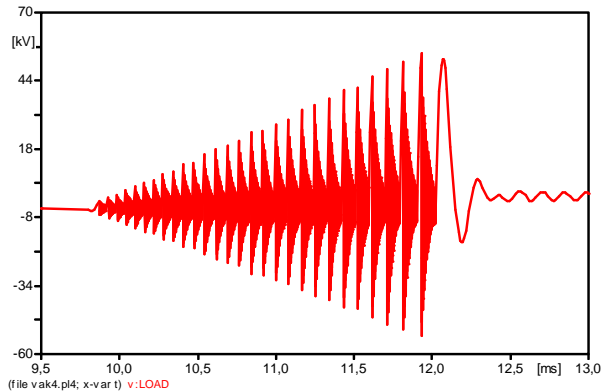
$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_L \cdot \frac{C_S \cdot C_L}{C_S + C_L}}} \approx 1,8 \text{ MHz}$$

Tyto kmity můžeme vidět na obrázku 4-4 jako drobné záchvěvy na křivce přechodného zotaveného napětí (červená barva). Když velikost přechodného zotavného napětí v čase 9,75 ms protne charakteristiku výdržného napětí (zelená barva), dojde k průrazu vypínací cesty a opětovnému zapálení oblouku. Vypínačem znova protéká proud (modrá barva), jehož frekvence je dána parametry L_K a C_L .

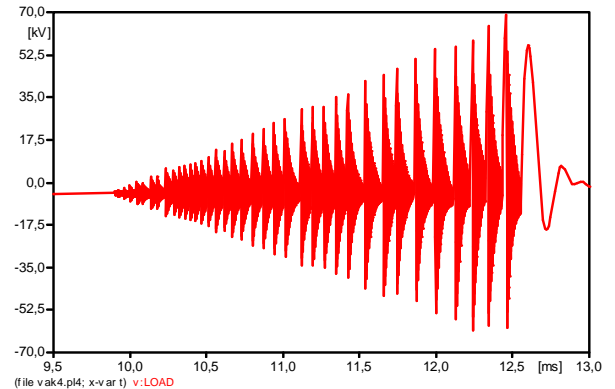
$$f_3 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_K \cdot C_L}} \approx 250 \text{ kHz}$$

Protože vakuový vypínač umí tyto vysokofrekvenční proudy zhášet, proud v čase 9,85 ms zaniká. To vede k dalšímu nárůstu přechodného zotavného napětí, a pokud dielektrická pevnost mezi kontakty není dostatečná, celý cyklus se opakuje.

O úspěchu vypnutí rozhoduje více faktorů. Mezi hlavní patří čas otevření vypínače a strmost charakteristiky výdržného napětí. Platí čím blíže je čas otevření průchodu přirozenou nulou, tím méně času je na obnovení dielektrické pevnosti vypínací dráhy a tím vyšší je riziko opětovného zapálení oblouku.

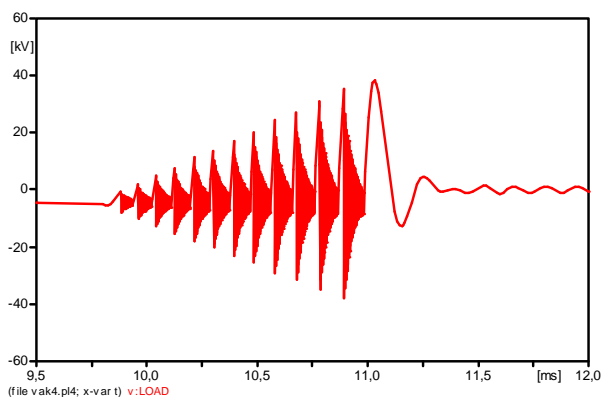


Obrázek 4-5 Napětí na zátěži v čase rozpojení kontaktů 200 μ s před průchodem přirozenou nulou

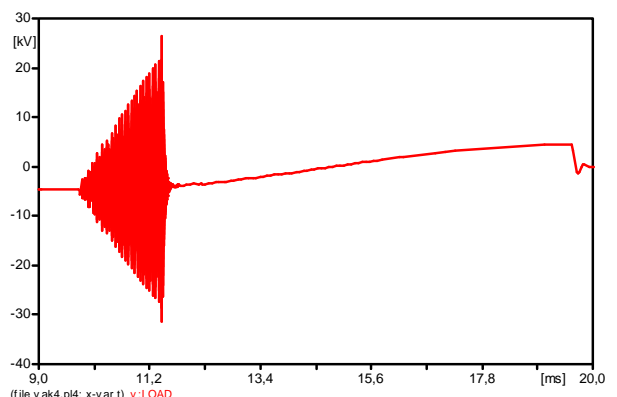


Obrázek 4-6 Napětí na zátěži v čase rozpojení kontaktů 100 μ s před průchodem přirozenou nulou

Na obrázcích 4-5 a 4-6 můžeme vidět, jakou roli hraje rozdíl 100 μ s mezi dobou rozpojení kontaktů vypínače. Tento rozdíl má za následek nárůst přepětí z 54 kV na 70 kV, přičemž v prvním případě došlo k 28 opětovným zapálením oblouku, v druhém dokonce k 43. Dalším důležitým faktorem je strmost charakteristiky výdržného napětí. Platí úměra čím větší sklon výdržného napětí, tím lepší zhášecí schopnosti vypínače.



Obrázek 4-7 Napětí na zátěži při strmosti 40 kV/ms



Obrázek 4-8 Napětí na zátěži při strmosti 20 kV/ms

Při zachování doby rozpojení kontaktů 200 μ s před průchodem přirozenou nulou dojde vlivem zvýšení strmosti charakteristiky výdržného napětí k redukci přepětí na 40 kV/ms (obrázek 4-7) oproti stavu na obrázku 4-5, kdy měla výdržná charakteristika strmost 30 kV/ms. Při jejím snížení na 20 kV/ms vypínač oblouk uhasí dokonce až v následné půl-periodě (obrázek 4-8).

5. Provozní pravidla pro vypínání indukativní zátěže

Při vypínání indukativní zátěže je největším a prakticky jediným nebezpečím vznik přepětí. To může vést k nedovolenému namáhání izolace kabelů či vinutí transformátorů a motorů, v extrémních případech dokonce k jejich průrazu. Aby k těmto pro nás nežádoucím jevům nedocházelo, vydala Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC) sadu norem pro bezpečné vypínání indukativní zátěže. Každý výkonový vypínač musí projít řadou testů na zkušebním obvodu přesně stanovených parametrů a na kterém jsou ověřovány jeho vypínací schopnosti. Vypínací interval je rozdělen po 0,5 ms na 20 časů otevření a v každém probíhá měření vzniklého přepětí na zátěži zkušebního obvodu [8]. Celé měření se čtyřikrát opakuje. Na základě získaných výsledků byly stanoveny tyto závěry pro vypínání indukativní zátěže:

- *Předčasné useknutí proudu nezpůsobuje závažnější problémy*
- *Přepětí vzniklé v důsledku opětovného zapálení oblouku by nemělo být větší než 3.0 p.u., jinak může dojít k poškození izolace namáhaných zařízení*
- *Doba opětovného hoření oblouku by neměla překročit 50 μ s*
- *Za žádných okolností nesmí dojít k uhasnutí oblouku až v průběhu následující půlperiody*

Splnění těchto podmínek nezáleží jen na vypínacích schopnostech vypínače, ale i na konfiguraci vypínaného obvodu. V některých případech mohou vznikat vysoká přepětí i při použití vypínače o dobrých vypínacích schopnostech, proto si musíme vypomoci ochrannými prvky na omezení přepětí. Mezi základní dva typy přepět'ových ochran patří omezovače přepětí a RC-články.

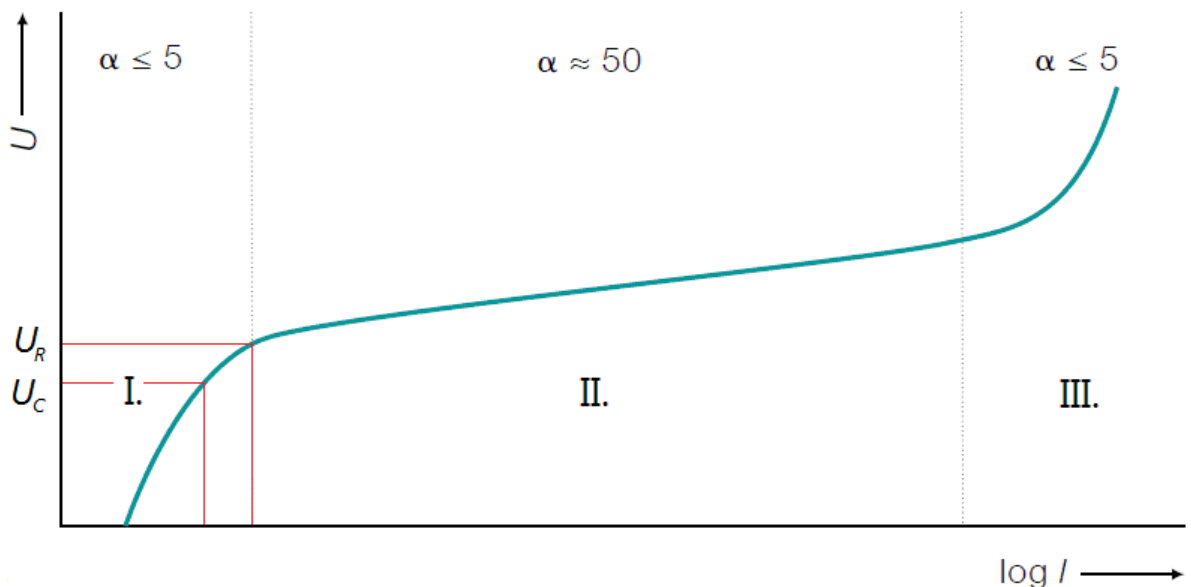
5.1 Omezovače přepětí

Omezovače přepětí jsou pro svoji jednoduchost, vysokou spolehlivost a příznivou cenu nejčastěji používaným ochranným prvkem na úrovni vysokého napětí. Fungují na principu napět'ově závislého odporu, jehož elektrická vodivost s rostoucím napětím stoupá. Tvar V-A charakteristiky je dán vztahem:

$$I = U^\alpha \tag{5.1-1}$$

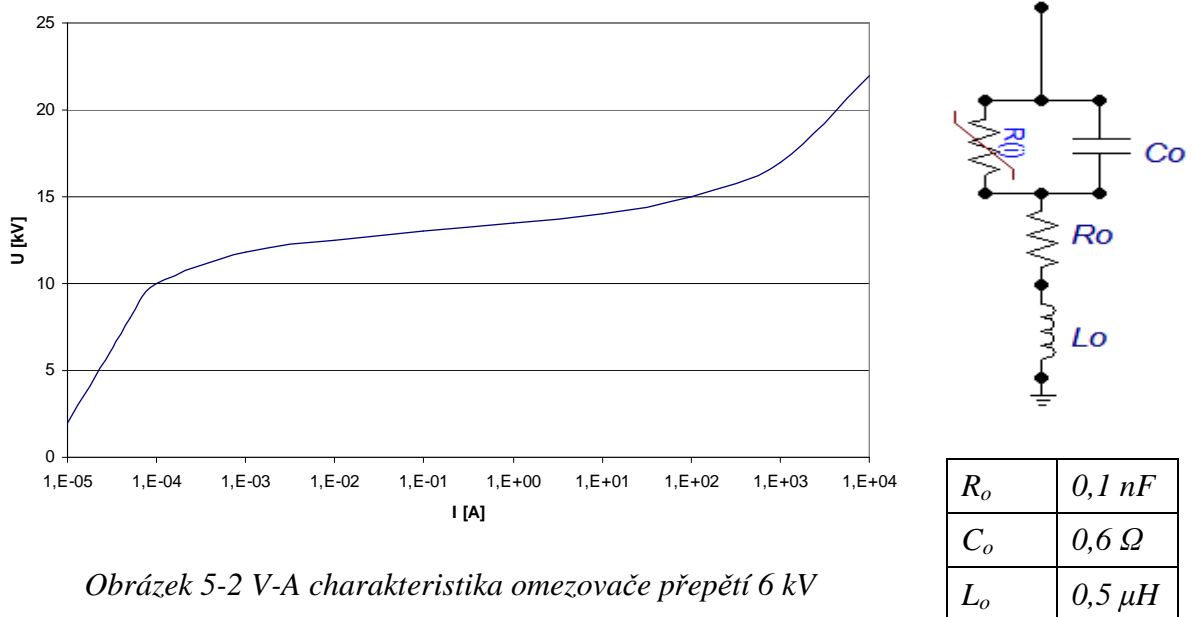
Velikost tohoto exponentu α je závislá na pracovní oblasti omezovače.

Za normálních provozních podmínek se pohybujeme v oblasti **I**, kdy α nabývá hodnot menších než 5 a odpor omezovače je velmi vysoký (cca $10^{12} \Omega$) [9]. V této oblasti se nachází parametry U_C a U_R . Jako U_C značíme trvalé provozní napětí omezovače, což je nejvyšší efektivní hodnota napětí, která může být trvale připojena na svorky omezovače. U_R definuje nejvyšší efektivní hodnotu napětí, na kterou je omezovač konstruován, aby v případě dočasného přepětí správně zapůsobil, a nazýváme jej jmenovité napětí omezovače. Jmenovité napětí omezovače je vždy vyšší než jeho trvalé provozní napětí a to přibližně 1,25×. Nad hodnotou U_R se dostáváme do oblasti **II**, kde odpor varistoru prudce klesá (na 1–10 Ω) a dochází ke svodu přepětí do země [9]. Moderní omezovače přepětí používají varistory na bázi oxidu zinečnatého (ZnO). Ten předčí karbid křemíku (SiC) ve velikosti exponentu α , který má na funkčnost omezovače rozhodující vliv.



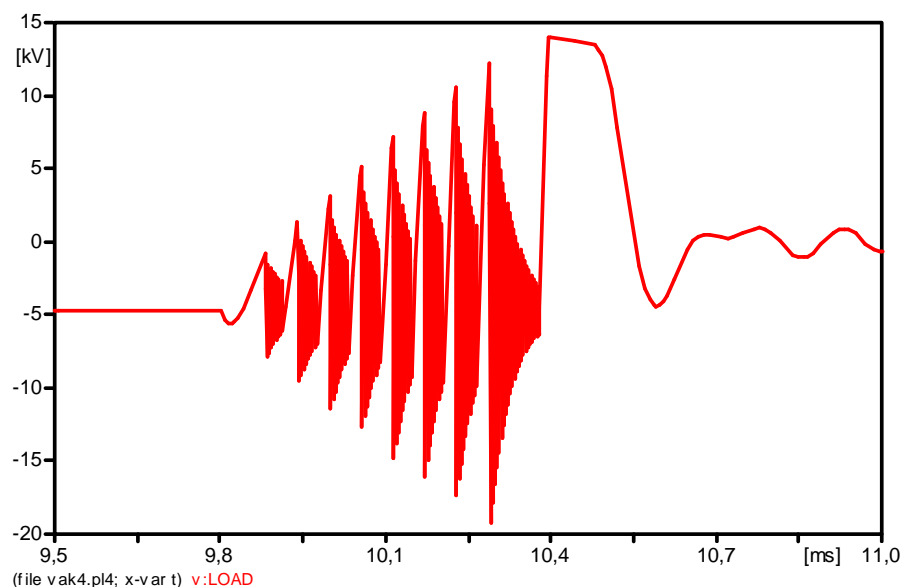
Obrázek 5-1 V-A charakteristika omezovače přepětí, čerpáno ze zdroje [10]

Použití omezovače přepětí při vypínání indukativní zátěže jsem testoval na zkušebním obvodu z kapitoly 4. Napětí zdroje je 6 kV, proto volíme omezovač přepětí s katalogovými údaji $U_C = 7,2 \text{ kV}$ a $U_R = 9 \text{ kV}$ [11]. Protože přepětí měříme jako poměr amplitud nejvyššího napětí a provozního napětí a parametry U_C a U_R jsou definovány jako efektivní hodnoty, musíme provést jejich přepočty. Na základě katalogových údajů můžeme vytvořit V-A charakteristiku omezovače, kterou můžeme vidět na obrázku 5-2. Skutečný omezovač přepětí není jen napětově závislý prvek, ale i frekvenčně. Proto je dobré při vytváření modelu vzít v úvahu i jeho parazitní prvky, jejichž hodnoty lze najít v tabulce.



Obrázek 5-2 V-A charakteristika omezovače přepětí 6 kV

Takto vytvořený model omezovače přepětí jsem připojil před chráněný objekt (za přívodní kabel a před svorky motoru) a simuloval vypínání zátěže v různých časech. Při přepětí vzniklém v důsledku předčasného useknutí proudu nebyl pozorován žádný útlum. Protože izolace přívodního kabelu a vinutí motoru jsou nejvíce namáhány při opakovaném zapálení oblouku, zajímala nás funkce omezovače při rozpojení kontaktů vypínače těsně před průchodem proudu přirozenou nulou. Při stejném čase otevření i parametrech vypínače bylo s použitím omezovače sníženo vzniklé přepětí z 54 kV ($t_{open} = 9,8 \text{ ms}$), resp. 70 kV ($t_{open} = 9,9 \text{ ms}$) v obou případech shodně na 15 kV, tedy 3.0 p.u.



Obrázek 5-3 Napětí na zátěži při použití omezovače přepětí

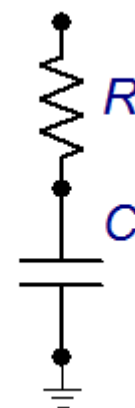
Je patrné, že omezovač přepětí dokáže snížit amplitudu vzniklého přepětí na požadovanou úroveň, ale nedokáže zabránit vzniku opakovaného zapálení oblouku. To s sebou přináší při častém vypínání motoru zvýšené namáhání izolace, které se může projevit až v delším časovém horizontu. Proto se omezovače přepětí používají jen jako základní ochrana.

5.2 RC článek

Zatímco omezovače přepětí potlačují následky přepětí, RC články potlačují příčiny jeho vzniku. Používají se tam, kde hrozí riziko vzniku přepětí v důsledku opětovného zapálení oblouku. K tomu dochází, když dielektrická pevnost mezi kontakty není dostatečná, aby udržela přechodné zotavné napětí. RC články zvýšením kapacity v obvodu zátěže snižují frekvenci kmitů zotavného napětí (dle vztahu 2.1-4) a tím i jeho strmost. Zároveň zvýšením kapacity dle vztahu 2.1-2 klesá i amplituda zotavného napětí. To v souhrnu prudce snižuje pravděpodobnost vzniku opětovného zapálení oblouku a tedy vzniku nedovoleného přepětí.

Velikost prvků R a C je navrhována s ohledem na technicko-ekonomické parametry. Čím větší velikost kapacity kondenzátoru, tím menší frekvence přechodného zotavného napětí a tím lepší ochranný účinek. S rostoucí kapacitou kondenzátoru ale roste i jeho pořizovací cena. Hodnota kapacit se v provozu nejčastěji pohybují mezi 100–500 nF v závislosti na kapacitě přívodního kabelu [12]. Velikost odporu bývá v rozmezí 5-50 Ω [4], [12]. Nižší hodnota odporu vede k větším ztrátám na RC článku, vyšší hodnota odporu má pak za následek horší tlumení kmitů zotavného napětí.

Použití RC článku jako ochranného prvku jsem testoval na stejném obvodu jako v případě testování omezovače přepětí při stejných parametrech vakuového vypínače. RC článek jsem připojil opět mezi přívodní kabel a svorky motoru. Velikost parametrů R a C jsem volil s ohledem na výše popsaná kritéria, kdy velmi dobrých výsledků jsem dosáhl při kapacitě 100 nF a odporu o velikosti 30 Ω . V žádném čase otevření vypínače nedošlo k opakovanému zapálení oblouku a tedy ani k nedovolenému přepětí. Dokonce velikost přepětí generovaného při useknutí proudu poklesla vlivem zvýšení kapacity obvodu zátěže na zanedbatelnou úroveň (1.2 p.u.).



5.3 Zhodnocení výsledků

S ohledem na výše popsané poznatky jsem na zkušebním obvodu provedl celou řadu simulací pro různé parametry modelu vakuového vypínače, různé časy rozpojení kontaktů a při použití odlišných ochranných prvků. To, k jakému typu vypnutí dojde a jaké při tom vznikne přepětí na obvodu zátěže, byla hlavní hodnotící kritéria. Tři hlavní možnosti, které při vypínání mohou nastat, byly popsány v kapitole 4. V tabulkách těmto případům odpovídá označení písmeny **A**, **B** a **C**. Protože o úspěchu vypnutí rozhoduje hlavně interval 500 μ s před průchodem přirozenou nulou, byly simulace provedeny v tomto intervalu po krocích 100 μ s.

1) *Vypínač s výbornými vypínacími schopnostmi ($A=40$ kV/ms, $D=150$ A/ μ s, $I_{ch}=3,5$ A)*

Bez použití ochranných prvků

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	B	B	B
Velikost přepětí [p.u.]	2.1	2.1	1.5	7.9	10

S použitím omezovače přepětí

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	B	B	B
Velikost přepětí [p.u.]	2.1	2.1	1.7	2.9	3

S použitím RC článku

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	A	A	A
Velikost přepětí [p.u.]	1.2	1.2	1.2	1	1

2) *Vypínač s dobrými vypínacími schopnostmi ($A=30$ kV/ms, $D=150$ A/ μ s, $I_{ch}=3,5$ A)*

Bez použití ochranných prvků

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	B	B	B
Velikost přepětí [p.u.]	2.1	2.1	1.5	11	13.9

S použitím omezovače přepětí

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	B	C	C
Velikost přepětí [p.u.]	2,1	2,1	1,35	4,5	3,2

S použitím RC článku

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	A	A	B
Velikost přepětí [p.u.]	1.2	1.2	1.2	1	1.3

3) Vypínač se špatnými vypínacími schopnostmi ($A=20 \text{ kV/ms}$, $D=100 \text{ A}/\mu\text{s}$, $I_{ch}=5\text{A}$)

Bez použití ochranných prvků

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	B	B	C	C	C
Velikost přepětí [p.u.]	2	7.8	7	10	8.2

S použitím omezovače přepětí

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	B	B	C	C	C
Velikost přepětí [p.u.]	1.9	1.6	3.3	5.3	6

S použitím RC článku

Čas rozpojení kontaktů [ms]	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
Typ vypnutí	A	A	A	B	C
Velikost přepětí [p.u.]	1.2	1.2	1	1.2	1.4

Na základě provozních podmínek stanovených na začátku této kapitoly by normu IEN o vypínání indukivní zátěže splnily jen tři varianty. Vakuový vypínač s výbornými vypínacími schopnostmi spolu s motorem chráněným omezovačem přepětí či RC-článkem, nebo vakuový vypínač s dobrými vypínacími schopnostmi spolu s motorem chráněným RC-článkem. V ostatních případech bylo přepětí na zátěži příliš vysoké nebo nedošlo k úspěšnému uhašení oblouku v první půlperiodě, což je nepřijatelné.

Závěr

V této diplomové práci byla představena problematika vypínání indukativních proudů pomocí vakuového vypínače. V úvodní kapitole byl vysvětlen princip vakuového vypínače, jak probíhá hoření oblouku ve vakuu a jaké jsou základní řešení jeho konstrukce. S ohledem na specifické vlastnosti vakuového vypínače byly popsány děje, které mohou při jeho použití pro vypínání indukativních proudů nastat. Tyto děje jako useknutí proudu před průchodem přirozenou nulou, průraz vypínací dráhy při nárůstu přechodného zotavného napětí či opětovné zapálení oblouku mají zásadní vliv na funkci vypínače a rozhodují o úspěchu vypnutí.

Pro simulaci vypínání indukativních proudů jsem si vybral program ATP-EMTP, který je pro tyto účely určen. Protože však neobsahuje model vakuového vypínače, bylo nutno jej vytvořit. Cílem při tom bylo, aby co nejdříve simuloval chování reálného vakuového vypínače. Tento model na základě vstupních veličin a uživatelem zvolených parametrů ovládá řídicí logiku ideálního vypínače. Chování vakuového vypínače je dáno hlavně jeho charakteristikou výdržného napětí a schopností zhaset vysokofrekvenční složky proudu, které lze popsat pomocí rovnic. Tyto rovnice tvoří jádro programu, který v každém kroku simulace přepočítává, zda nedošlo k překročení dielektrické pevnosti vypínací dráhy či zda strmost proudu při průchodu nulou není větší než kritická. Pokud ano, řídicí logika vyše signál k rozpojení kontaktů vypínače a dochází k opětovnému zapálení oblouku.

Tento model byl poté využit pro simulaci vypínání indukativní zátěže, kde typický příklad použití vakuového vypínače představuje vypínání motoru v průmyslovém rozvodu. Na tomto zkušebním jednofázovém obvodu byly simulovány vypínací procesy pro různé časy rozpojení kontaktů, parametry vypínače či způsoby ochrany proti přepětí. Ukázalo se, že kritické časy rozpojení kontaktů jsou přibližně 500 μ s před průchodem proudu přirozenou nulou. V tomto intervalu docházelo k opětovnému zapálení oblouku, které mělo za následek nedovolené přepětí na zátěži.

S ohledem na požadavky stanovenými Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEA) jsem sestavil pravidla pro vypínání indukativní zátěže pomocí vakuového vypínače. Mezi největší nebezpečí patří vznik nedovolených přepětí, která ohrožují izolace kabelů či vinutí motorů, a také destrukce vypínače, pokud nezvládne uhasit oblouk před průchodem přirozenou nulou. Proto je v některých případech nutné použít opatření pro omezení těchto nebezpečí. Základní

dva způsoby jsou použití omezovačů přepětí či RC-článků. O tom, který způsob ochrany použít, rozhoduje více faktorů. Záleží nejen na vypínacích schopnostech vakuového vypínače, ale i na charakteru vypínaného obvodu, který určuje strmost a velikost zotavného napětí. Pokud je strmost přechodného zotavného napětí větší než strmost výdržného napětí vypínače, je vhodné použít RC-článek, který riziko opětovného zapálení oblouku prakticky eliminuje. V jiných případech je postačujícím řešením aplikace omezovače přepětí, jehož pořizovací cena je nižší než u RC-článku.

Použitá literatura

- [1] Helštýn, D.; Kačor, P.; Hytka, Z.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jisticí*, Ostrava: VŠB 2003
- [2] *Vacuum Switching Technology and Components for Medium Voltage*, Siemens
<http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-distribution/medium-voltage-indoor-devices/HG11-01-en-2007-06-15-Infobroschuere.pdf>
- [3] Wong, S.M.; Snider, L.A.; Lo, E.W.C.; *Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker*
<http://www.ipst.org/TechPapers/2003/IPST03Paper14a-3.pdf>
- [4] *Fast Transient Overvoltages Produced by Switching Distribution Transformers with a Vacuum Circuit Breaker*
http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_954.pdf
- [5] Korejčík, M.: *Návrh svodičů v průmyslovém rozvodu*
- [6] Bianchi Lastra, B.; Barbieri, M.: *Fast Transient in the Operation of an Induction Motor with Vacuum Switches*
<http://iitree-unlp.org.ar/pdf/IPST01Paper063.pdf>
- [7] *Switching of Small Inductive Currents using Vacuum Circuit Breakers*
http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_0488_final.pdf
- [8] Smeets, R.: *Inductive load switching Standardization status*
http://www.hcei.tsc.ru/conf/isdeiv/images/presentations/0_Panel_I_ISDEIV2012.pdf
- [9] Svačina, J.: *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno: VUT 2002
- [10] *Overvoltage protection Metal oxide surge arresters in medium voltage systéme*
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/70e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/\\$file/952_abb_awr_mittelspannung_e_low.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/70e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/$file/952_abb_awr_mittelspannung_e_low.pdf)
- [11] *Cable fittings for medium and high voltage network*
<http://ebookbrowse.com/pfisterer-high-voltage-surge-arrester-6-6kv-7-2kv-pdf-d303081055>
- [12] *Overvoltage protection study on Vacuum breaker switched MV motors*
http://www.researchgate.net/publication/4350468_Overvoltage_protection_study_on_vacuum_breaker_switched_MV_motors/file/79e4150aab90a137a2.pdf