

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Zapínací proud transformátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel POSPÍŠIL**  
Osobní číslo: **E12B0047P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Zapínací proud transformátoru**  
Zadávací 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 přechodový děj vznikající při připojení transformátoru k síti.
2. Uveďte možnosti omezení zapínacího proudu.
3. Ověřte vznik přechodového děje měřením na transformátoru 400/230V, 900VA.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

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

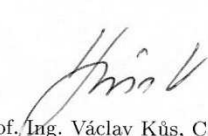
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Šobra**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CS  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zapínací proud transformátoru, konkrétně popis vznikajícího přechodového děje, způsoby omezování zapínacího proudu a měření zapínacího proudu na zadaném transformátoru.

## **Klíčová slova**

Zapínací proud, transformátor, okamžik připojení, indukované napětí, magnetický tok, magnetický obvod, jádro, saturace, magnetická indukce, remanentní indukce

## **Abstract**

The bachelor theses is focused on inrush current of transformer, especially description of the incipient transient event, the ways of reducing of inrush current and measuring of inrush current on specific transformer.

## **Key words**

Inrush current, transformer, moment of connection, induced voltage, magnetic flux, magnetic circuit, core, saturation, magnetic induction, remanent induction

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 4.6.2015

Karel Pospíšil

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janovi Šobrovi za užitečné rady a připomínky při vypracovávání této práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POPIS VZNIKAJÍCÍHO PŘECHODOVÉHO DĚJE</b> .....	<b>11</b>
1.1 ODVOZENÍ PŘECHODOVÉHO DĚJE .....	11
1.2 VELIKOST ZAPÍNACÍHO PROUDU .....	14
<b>2 ZPŮSOBY OMEZENÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU</b> .....	<b>16</b>
2.1 ZVÝŠENÍ IMPEDANCE PRIMÁRNÍHO OBVODU .....	16
2.1.1 <i>Dvoustupňové spínání</i> .....	16
2.1.2 <i>NTC Termistor</i> .....	17
2.2 SNÍŽENÍ REMANENCE .....	18
2.2.1 <i>Použití materiálu s menší remanentní indukci</i> .....	19
2.2.2 <i>Definovaná vzduchová mezera</i> .....	19
2.2.3 <i>Virtuální vzduchová mezera</i> .....	19
2.3 PŘEDMAGNETIZACE JÁDRA.....	20
2.4 OMEZOVAČE VYUŽÍVAJÍCÍ VYSOKOTEPLTNÍ SUPRAVODIČE .....	21
2.5 OMEZOVAČ SE STEJNOSMĚRNOU INDUKČNOSTÍ .....	22
2.6 PWM MĚNIČ .....	24
2.7 OBVOD MĚKKÉHO ROZBĚHU .....	25
<b>3 MĚŘENÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU</b> .....	<b>26</b>
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>30</b>
<b>5 SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>32</b>
<b>6 PŘÍLOHY</b> .....	<b>33</b>



## Seznam symbolů a zkratek

B.....	Magnetická indukce
H.....	Intenzita magnetického pole
$I_{\max}$ .....	Maximální hodnota zapínacího proudu
L.....	Indukčnost
N.....	Počet závitů
R.....	Odpor
S.....	Plocha
$u_i$ .....	Indukované napětí
$\Phi$ .....	Magnetický tok
$\psi$ .....	Úhel přípnutí
$\vartheta$ .....	Teplota
$\mu$ .....	Permeabilita
$\tau$ .....	Časová konstanta
$\varphi$ .....	Fázový posuv
$\omega$ .....	Úhlová frekvence

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na princip vzniku zapínacího proudu transformátoru, uvedení používaných způsobů omezení zapínacího proudu a ověření tohoto děje měřením na osciloskopu.

Zapínací proud transformátoru je přechodový jev, který vzniká při připojování transformátoru k síti. Velikost tohoto proudu může být několikanásobek hodnoty jmenovitého proudu. Při připojení tedy hrozí, že vlivem velké špičky zapínacího proudu zareagují ochrany a transformátor je následně odpojen ze sítě. Magnetizační charakteristiky feromagnetických materiálů používaných v magnetických obvodech s rostoucí intenzitou magnetického pole přecházejí do stavu přesycení, při kterém výrazně klesá indukčnost transformátoru. Tato okolnost celou situaci značně zhoršuje, jelikož velikost zapínacího proudu je potom omezena pouze odporem vinutím a rozptylovým tokem transformátoru.

Práce je rozdělena na 3 části. První část popisuje vznik zapínacího proudu, ve druhé části jsou uvedeny možné způsoby omezení zapínacího proudu a ve třetí části je ověřen vznik tohoto přechodového děje laboratorním měřením na zadaném transformátoru.

# 1 Popis vznikajícího přechodového děje

## 1.1 Odvození přechodového děje

Přechodný děj připojení transformátoru na síť začneme popisovat na jednofázovém transformátoru s jednoduchým magnetickým obvodem.

Intenzitu magnetického pole v jádře popisuje 1. Maxwellova rovnice jinak nazývaná zákon celkového proudu:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_c \quad (1.01)$$

kde  $c$  je integrační dráha představující magnetický obvod

Tato rovnice nám v podstatě říká, že zdrojem magnetického pole je pohybující se náboj nebo-li elektrický proud. Proudů v transformátoru budou časově proměnné.

Pro zjednodušení si magnetický obvod rozdělíme na části ve kterých jsou stejné geometrické a magnetické vlastnosti. Tímto zjednodušením můžeme přejít od integrace k algebraickému součtu:

$$\sum_j \mathbf{H}_j \cdot \mathbf{l}_j = \sum_k N_k \cdot I_k \quad (1.02)$$

Magnetický tok je definován z Faradayova zákona elektromagnetické indukce vztahem:

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.03)$$

Magnetický tok můžeme též vyjádřit jako:

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S B_n dS \quad (1.04)$$

kde  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$  je skalární součin vektorů magnetické indukce a normály elementu plochy  $dS$ , když si vyjádříme z magnetické indukce složku kolmou na plochu  $dS$  tak se nám rovnice zredukuje na součin velikostí obou vektorů

V případě homogenního magnetického pole se nám výraz zjednoduší z integrálu na součin

$$\Phi = BS \quad (1.05)$$

Dosažením do indukčního zákona získáme vztah:

$$u_i = -NS \frac{dB}{dt} \quad (1.06)$$

Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole je:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (1.07)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $4\pi 10^{-7}$ ) a  $\mu_r$  je relativní permeabilita, tento vztah platí pouze pro lineární magnetický materiál, v reálných feromagnetikách je magnetická indukce závislá na více faktorech (intenzita mag. pole, teplota...) a závislost je již nelineární.

Pro nelineární materiály teda platí:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1.08)$$

kde  $\mathbf{M}$  je veličina zvaná magnetizace a vyjadřuje příspěvek daného prostředí k výslednému magnetickému poli, ve feromagnetických materiálech je závislá na intenzitě vnějšího magnetického pole, teplotě, mechanickém napětí atd.

Dále budeme předpokládat, že síť, ke které transformátor připojíme, je dostatečně tvrdá a její napětí je harmonické:

$$u_{(t)} = U_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1.09)$$

kde úhel  $\psi$  udává fázi vstupního napětí vzhledem ke spínacímu ději

Z 2. Kirchhofova zákona si vyjádříme rovnici pro smyčku primární strany transformátoru:

$$u_{i1(t)} = u_{(t)} - R_1 i_1(t) - L_{1\sigma} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1.10)$$

Odpor vinutí a rozptylovou indukčnost prozatím zanedbáme a prozatím budeme považovat magnetické jádro jako lineární.

Nyní dosadíme zjednodušenou rovnici do Faradayova indukčního zákona:

$$\int \frac{U_m}{N} \sin(\omega t + \psi) dt = -\phi(t) \quad (1.11)$$

Integrací této rovnice získáme vztah:

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\omega t + \psi) + k = -\phi(t) \quad (1.12)$$

Počáteční podmínka v čase  $t=0$  je dána remanentním magnetickým tokem  $\Phi_r$ :

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) + k = -\phi_r \quad (1.13)$$

$$k = \frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) - \phi_r \quad (1.14)$$

Průběh výsledného magnetického toku je tedy:

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \left[ \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) - \cos(\psi) \right] + \phi_r \quad (1.15)$$

Při přechodovém ději tedy vzniká stejnosměrná složka magnetického toku, která je závislá na okamžiku připojení a na remanentním toku. S touto složkou je potom superponován magnetický tok v ustáleném stavu:

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) = \phi_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.16)$$

$\Phi_m$  je maximální hodnota toku v ustáleném stavu

Vyšetřením extrémů funkce  $\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \left[ \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) - \cos(\psi) \right] + \phi_r$  zjistíme, že nejvýhodnější je připojit transformátor v okamžiku  $\phi_m \cos(\psi) - \phi_r = 0$ .

V tomto případě nevznikne žádný přechodový jev.

Pro nenulový remanentní tok je to když napětí sítě prochází maximem  $\psi = \frac{\pi}{2}$ . Maximální tok potom bude v čase  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  a jeho hodnota bude  $\Phi_m$ .

V opačném případě maximální tok poteče jádrem pokud výraz  $\phi_m \cos(\psi) - \phi_r$  bude mít maximální hodnotu. Tato situace nastane v případě že napětí v okamžiku sepnutí bude mít nulovou hodnotu, tedy  $\psi = 0$  a remanentní tok bude mít maximální zápornou hodnotu. V čase  $\omega t = \pi$  po připojení k síti bude teoretická hodnota toku  $\phi_{max} = 2\phi_m + \phi_r$ .

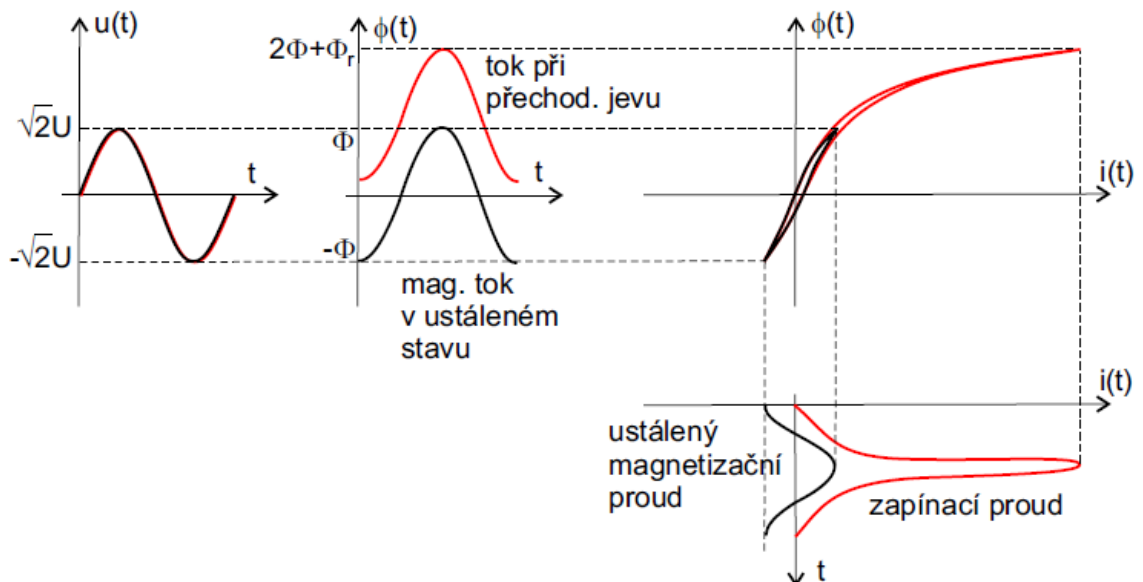
[2]

## 1.2 Velikost zapínacího proudu

Vznikající zapínací proud je omezen pouze impedancí na primární straně transformátoru. Pokud je zanedbána rozptylová indukčnost a je uvažován pouze odpor a hlavní indukčnost transformátoru, řešením diferenciální rovnice získáme průběh zapínacího proudu:

$$i = \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - e^{-\frac{L_1}{R_1} \sin(\psi - \varphi)}] \quad (1.17)$$

Tato rovnice je však platná pouze za předpokladu, že indukčnost magnetického materiálu je konstantní. Jelikož magnetické materiály nemají lineární B-H charakteristiku, ale po dosažení určité hodnoty intenzity magnetického pole dochází k saturaci magnetického materiálu. Ve stavu saturace permeabilita magnetického materiálu je téměř rovna permeabilitě vakua, to vede ke značnému poklesu indukčnosti transformátoru. Pro přesnější výpočet je nutno započítat také nelinearitu magnetického obvodu. Jelikož není znám matematický popis magnetizační charakteristiky magnetického materiálu, je nutno použít pro řešení přechodového děje numerické řešení. Na obrázku 1.1 je zobrazen vznik zapínacího proudu a vliv saturace magnetického jádra.



Obr. 1.1 Ilustrace vzniku zapínacího proudu [2]

Pokud v okamžiku připojení transformátoru k síti bude nenulový rozdíl mezi remanentním tokem v jádře a magnetickým tokem v ustáleném stavu, dojde ke vzniku stejnosměrné složky magnetického toku, která postupně klesá k nule, v případě konstantní indukčnosti by stejnosměrná složka klesala exponenciálně. Vlivem saturace jádra dochází ke snížení indukčnosti, což vede ke značnému navýšení proudu.

Velikost zapínacího proudu může být až 50krát vyšší než hodnota proudu naprázdno v ustáleném stavu. Odeznívání přechodového děje trvá několik period. Špičková hodnota zapínacího proudu je svými silovými účinky mezi závity, hrozí riziko poškození vinutí. Je také nutno vhodně zvolit ochrany, aby při připojení transformátoru nedocházelo k reakci ochran a následnému odpojení transformátoru od sítě. [1]

## 2 Způsoby omezení zapínacího proudu

K omezení zapínacího proudu transformátoru se využívají 3 základní metod: Snížení pracovní indukce, snížení remanence a připnutí ve vhodném úhlu. V této části jsou popsány základní principy těchto metod a jejich praktická realizace.

### 2.1 Zvýšení impedance primárního obvodu

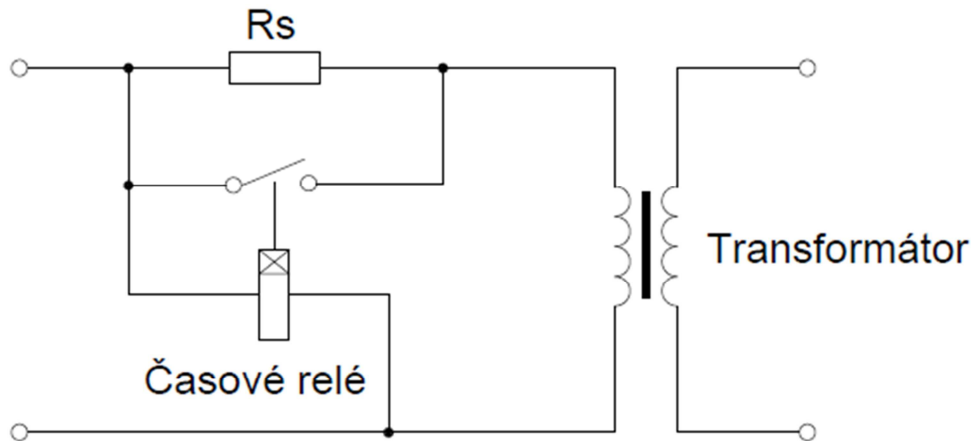
Jednou metod pro omezení zapínacího proudu je zvýšení impedance na primární straně transformátoru. Zvýšením impedance sice nedochází k úplnému odstranění zapínacího proudu, ale vhodně zvolenou impedancí je jeho špičková hodnota značně omezena. Na předřazené impedanci vzniká úbytek napětí, který snižuje elektromotorické napětí na primárním vinutí, proud tedy nedosáhne tak vysoké hodnoty a jádro transformátoru není přesyceno, čímž je zvýšena indukčnost primárního vinutí. Po odeznění přechodového děje je však nutno vyřadit předřadnou impedanci aby na svorkách transformátoru bylo znovu požadované napětí.

#### 2.1.1 Dvoustupňové spínání

Tato metoda využívá k potlačení zapínacího proudu předřadnou impedanci, kdy v prvním stupni je transformátor připojen přes omezovací odpor, který je připojen po dobu trvání přechodového děje a ve druhém stupni je vyzkratován. Přemostění odporů je řešeno buď speciálním přepínačem s mezikontaktem nebo časovým relé se zpožděním přitahu. Další známé řešení odvozuje zpoždění stykače od úbytku napětí na předřadném odporu a je realizováno tak, že cívka stykače je připojena až za tento odpor paralelně k primárnímu vinutí. Spínač se speciálním mezikontaktem musí ještě před odpojením předřadného odporu zajistit aby transformátor nebyl dočasně odpojen od sítě, to by mohlo vést k dalšímu přechodovému jevu jehož maximální hodnota by mohla vlivem reakce ochran odpojit zátěž od sítě. Výhodou tohoto spínače je, že není potřeba dalších spínacích prvků, které po odeznění přechodového jevu udržují předřadný odpor vyzkratovaný. Jelikož je tento spínač ovládán ručně, nevýhodou je tedy v případě krátkodobého výpadku napájení neschopnost omezení zapínacího proudu po opětovném napájení. Další možností je použití časového relé, které po připojení transformátoru k síti má nastavené časové zpoždění, takže v prvním stupni je k primárnímu vinutí transformátoru připojen předřadný odpor a po odeznění přechodového jevu sepne časové relé a svým spínacím kontaktem vyzkratuje předřadný odpor.



Při přepnutí mezi prvním a druhým stupněm dochází k dalšímu přechodovému jevu, jehož proudová špička je však značně nižší než při prvním připojení transformátoru k síti s předřadným odporem. Při návrhu dvoustupňového spouštěče je důležité vhodně nastavit hodnotu předřadného odporu a dobu zpoždění sepnutí časového relé. [2]



Obr. 2.1 Schéma zapojení dvoustupňového spouštěče

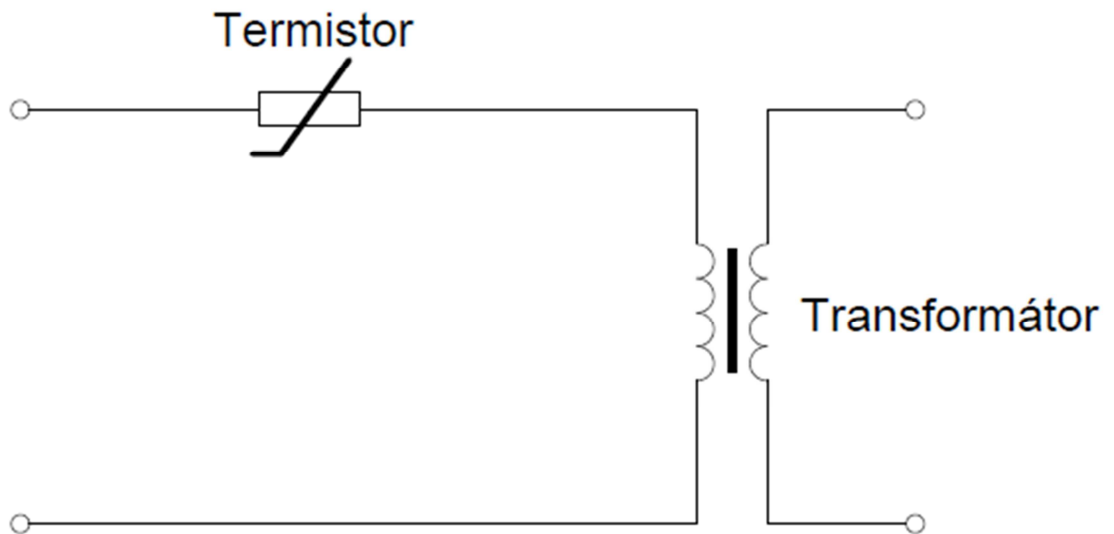
### 2.1.2 NTC Termistor

NTC termistor (negative temperature coefficient) je polovodičová součástka jejíž odpor je závislý na teplotě. U NTC termistorů je teplotní součinitel záporný, s rostoucí teplotou tedy odpor součástky klesá. Závislost odporu na teplotě je přibližně exponenciální. NTC termistory jsou vyráběny z oxidů kovů např. Mn, Fe, Co atd.

Princip omezování zapínacího proudu je následující: Termistor je zapojen sériově s primárním vinutím transformátoru. V okamžiku připojení má termistor pokojovou teplotu, jeho odpor nabývá velké hodnoty. Na termistoru je velký úbytek napětí, tím dochází k omezení maximální hodnoty zapínacího proudu. Průchodem proudu na termistoru vznikají Jouleovy ztráty. Vlivem těchto ztrát dochází k ohřátí termistoru, jehož hodnota odporu se vlivem narůstající teploty snižuje. Hodnota odporu termistoru se sníží na několik procent hodnoty odporu při pokojové teplotě a úbytek napětí na termistoru je minimální po odeznění přechodového jevu. Spotřeba termistoru za provozu je zanedbatelná při nepřetržitém provozu.

Po odpojení transformátoru musí být termistor ochlazen znovu na pokojovou teplotu, aby byla plně obnovena jeho schopnost omezovat zapínací proud. Doba potřebná k vychlazení termistoru na pokojovou teplotu je 30 sekund až 2 minuty, v závislosti na rozměrech součástky.

Výhodou použití NTC termistorů pro omezení zapínacího proudu je celková jednoduchost této metody, jelikož je potřeba pouze jedna součástka a není potřeba žádných řídicích obvodů a spínacích prvků. Nevýhodou je doba potřebná k vychlazení součástky, to vede k neschopnosti omezit proud vznikající při přechodovém jevu vzniklém při krátkodobém výpadku sítě, tím je také vyloučena možnost využití NCT termistorů jako omezovačů zapínacího proudu pro aplikace, při kterých je transformátor v přerušovaném provozu. [3]



Obr. 2.2 Schéma zapojení termistoru

## 2.2 Snížení remanence

Na vzniku zapínacího proudu při připnutí transformátoru k síti se také podílí remanentní indukce, která vytváří stejnosměrnou složku magnetického toku způsobující přesycení jádra. Remanentní indukce se podílí na vzniku zapínacího proudu méně než jednou třetinou. I pokud bude remanentní indukce úplně odstraněna, nedojde k úplnému potlačení vzniku zapínacího proudu. Vliv remanentní indukce na vznik zapínacího proudu je menší než vliv okamžiku připnutí k síti na vznik zapínacího proudu. Výhodnější je metodu snížení remanence zkombinovat s ostatními metodami omezení zapínacího proudu. Snížení remanentní indukce lze provést buď vnějším obvodem nebo úpravami magnetického obvodu.[2]

### 2.2.1 Použití materiálu s menší remanentní indukci

Pro snížení remanentní indukce lze použít magnetické materiály, které mají menší remanentní indukci. Dnes se jako materiály magnetických obvodů používají magneticky měkké orientované oceli, které mají velmi strmou hysterezní smyčku, která má malé hysterezní ztráty. Starší materiály mají sice nižší remanentní indukci, ale hysterezní smyčka je širší, což vede k větším hysterezním ztrátám. Tato metoda není příliš vhodná pro praktické využití.[2]

### 2.2.2 Definovaná vzduchová mezera

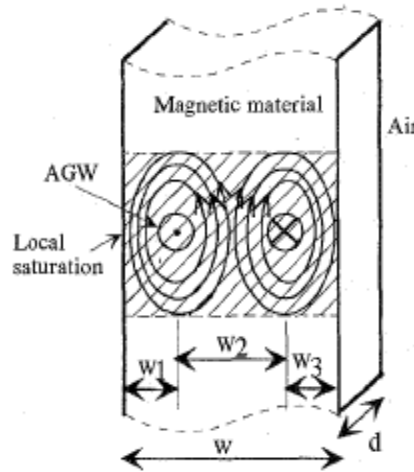
Tato metoda využívá ke snížení remanentní indukce vzduchovou mezeru v magnetickém obvodu. Vzduchová mezera linearizuje magnetizační charakteristiku a zmenšuje strmost magnetizační charakteristiky. Tato metoda sice snižuje remanentní indukci, ale jelikož se zvyšuje reluktance magnetického obvodu, zvyšuje se tím magnetizační proud. Dále se snižuje diferenciální permeabilita v pracovní oblasti, čímž dochází ke snížení indukčnosti, což vede ke vzniku vyššího zapínacího proudu. Tím je tato metoda prakticky nepoužitelná ke snížení remanentní indukce.[2]

### 2.2.3 Virtuální vzduchová mezera

Metoda virtuální vzduchové mezery je založená na přidání pomocného vinutí do magnetického obvodu, které je napájeno stejnosměrným proudem. Tato metoda je svými účinky podobná definované vzduchové mezeře. Rozdíl oproti předchozí metodě spočívá v tom, že šířku této virtuální vzduchové mezery můžeme měnit proudem procházejícím pomocným vinutím. Princip této metody je následující: V oblasti magnetického obvodu s pomocným vinutím, kterým protéká stejnosměrný proud, dochází k lokální saturaci magnetického obvodu. Jelikož je tato oblast saturována, její permeabilita je přibližně stejná jako permeabilita vakua, tato oblast se tedy chová jako kdyby zde byla reálná vzduchová mezera.

Při připojení transformátoru k síti se postupuje následně: Nejprve je zapnut pomocný obvod, průchodem stejnosměrného proudu pomocným vinutím se demagnetizuje magnetický obvod, poté se připojí transformátor k síti.

Nevýhodou této metody je značný zásah do magnetického obvodu kvůli otvorům pro pomocné vinutí a omezení zapínacího proudu maximálně o 30%. Tuto metodu je vhodné kombinovat například s metodou využívající připnutí v optimální fázi.[4]



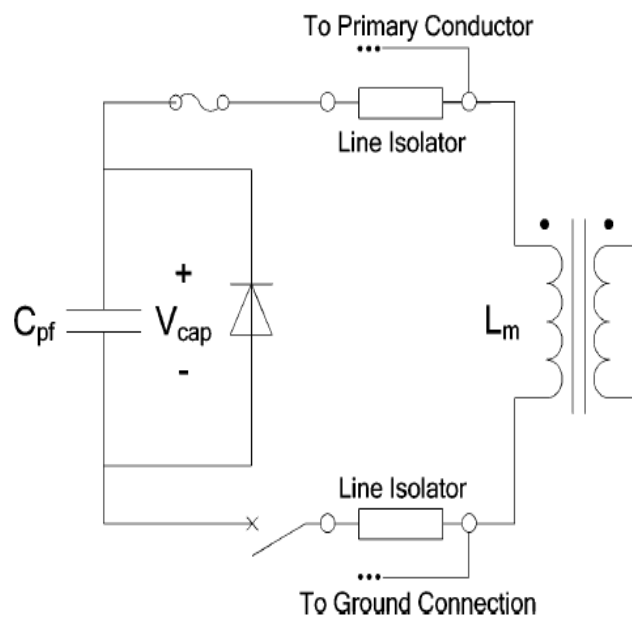
Obr. 2.3 Virtuální vzduchová mezera[4]

### 2.3 Předmagnetizace jádra

Metoda omezování zapínacího proudu transformátoru, která využívá nastavení remanentního toku na známou polaritu poté co je transformátor odpojen od napájení (tomuto procesu se říká předmagnetizace) a kontrolu okamžiku připojení transformátoru k síti založené na polaritě toku. Metoda předmagnetizace neodstraňuje úplně zapínací proud, ale snaží se jej omezit na minimální hodnotu. Zařízení pro předmagnetizaci je konstrukčně jednoduché a pracuje s podstatně nižším napětím než je jmenovité napětí transformátoru. Samotné omezení zapínacího proudu metodou předmagnetizace se skládá ze dvou částí. Nejprve je remanentní tok transformátoru nastaven tak aby se blížil hodnotě maximálního remanentního toku, který může protékat magnetickým obvodem když je transformátor odpojen od sítě, tento tok má buď zápornou nebo kladnou polaritu. Poté je nastaveno sepnutí spínače, který musí sepnout pod úhlem  $210^\circ$  pro kladný remanentní tok nebo  $330^\circ$  pro záporný remanentní tok. Předmagnetizační zařízení se skládá z kondenzátoru, diody, pojistky, spínače a nabíjecího obvodu. Nabíjecí obvod, který není zobrazen, stanovuje počáteční napětí na kondenzátoru. Zařízení je použito, když je transformátor odpojen od sítě a je připojeno před jedno vinutí transformátoru. Výhodné je použít vinutí vyššího napětí díky menšímu proudu potřebnému k vytvoření požadovaného magnetického toku.

Jelikož předmagnetizační zařízení pracuje při odpojeném transformátoru a funguje při nízkém napětí, není potřeba dimenzovat komponenty předmagnetizačního zařízení na velké hodnoty napětí. Zařízení je dimenzováno na hodnoty magnetizačního proudu, takže komponenty mohou být dimenzovány na zlomek jmenovité hodnoty proudu transformátoru.

[6]



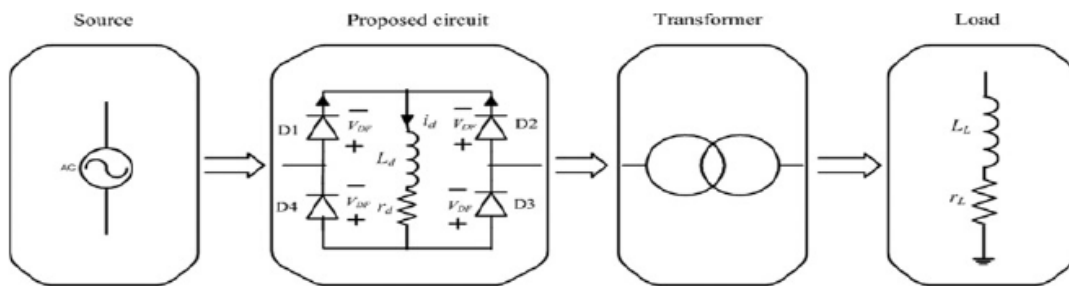
Obr. 2.4 Předmagnetizační zařízení[6]

## 2.4 Omezovače využívající vysokoteplotní supravodiče

Omezit zapínací proud lze také pomocí vysokoteplotních supravodičů. Většina supravodivých omezovačů používá přechod normálního a supravodivého stavu vodiče. Tento typ omezovače využívá "normální rezistivitu" vysokoteplotního supravodiče, kdy jeho teplota roste vlivem zahříváním Jouleovými ztrátami během omezovacího procesu. Když špičková hodnota zapínacího proudu bude vyšší než kritická hodnota proudu supravodiče, tj. maximální proud, při kterém je zachován stav supravodivosti, dojde k přechodu ze supravodivého do normálního stavu během kterého má supravodič poměrně vysoký odpor. Po poklesu proudu pod kritickou hodnotu jsou znovu obnoveny supravodivé vlastnosti.[5]

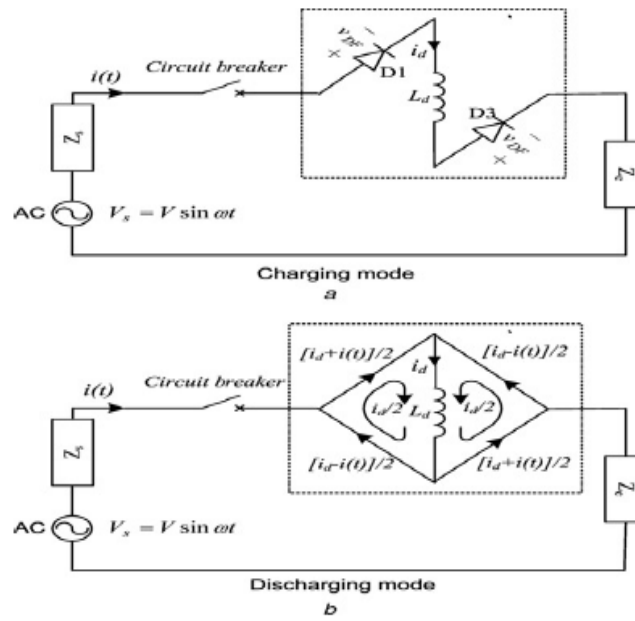
## 2.5 Omezovač se stejnosměrnou indukčností

Tato metoda používá k omezení zapínacího proudu sériový kompenzátor. Kompenzační obvod se skládá ze stejnosměrného diodového můstku v jehož středu se nachází odpor a indukčnost. Můstek je připojen sériově ke všem fázím transformátoru. Na obrázku 2.5 je topologie jednofázového výkonového obvodu omezovače. Hodnoty  $R_d$  a  $L_d$  představují odpor a indukčnost stejnosměrné indukčnosti. Zvolením vhodné hodnoty indukčnosti  $L_d$  je možné dosáhnout téměř stejnosměrného proudu ve stejnosměrné indukčnosti během ustáleného stavu. Indukčnost se v tomto případě chová jako zkrat a nemá vliv na chod transformátoru.

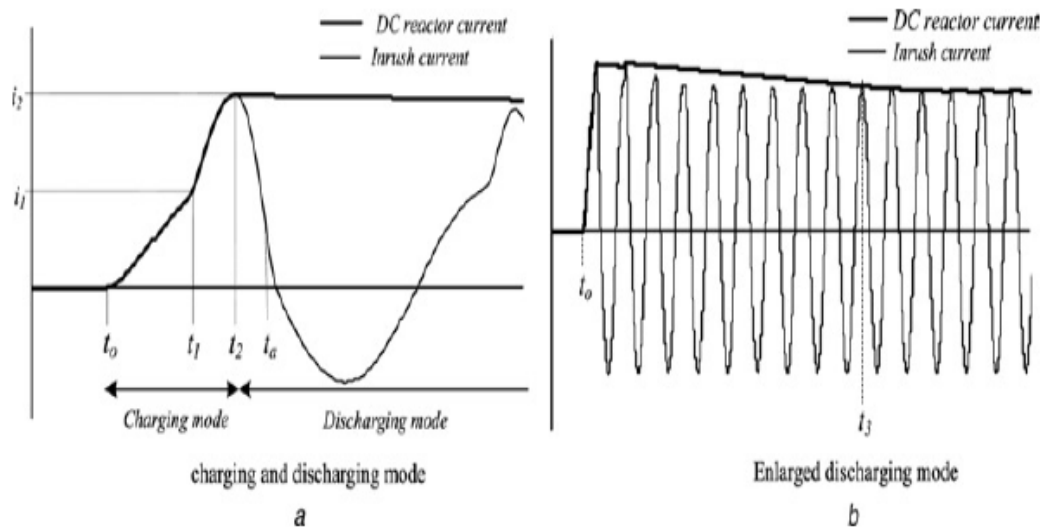


Obr. 2.5 Blokové schéma omezovače připojeného k transformátoru[7]

Metoda se skládá ze dvou módů chodu, první chod je nabíjecí a druhý vybíjecí. Jednofázové obvody obou módů jsou na obrázku 2.6. Zapínací proud a proud stejnosměrnou indukčností jsou na obrázku 2.7. V čase  $t = t_0$  když je transformátor připojen k síti, zapínací proud začne růst. Diody  $D_1$  a  $D_3$  jsou sepnuty a stejnosměrná indukčnost je připojena do obvodu. V tomto nabíjecím módu způsobuje napětí na indukčnosti  $L_d$  omezení zapínacího proudu. V čase  $t = t_2$ , když proud dosáhne maximální hodnoty, začíná vybíjecí mód. Během tohoto módu je zapínací proud menší než proud protékající stejnosměrnou indukčností. Stejnoseměrná indukčnost je zkratována diodami a nemá žádný vliv na chod obvodu. Po čase  $t = t_2$  se stejnosměrná reaktance vybijí kvůli odporu a úbytkům napětí na diodách. V čase  $t = t_3$  proud stejnosměrnou indukčností dosáhne opět hodnoty rovnající se proudu zátěže. Mezi časy  $t_2$  a  $t_3$  stejnosměrná indukčnost nemá žádný vliv na chod transformátoru, protože se nenachází v nabíjecím módu. Obdobně po čase  $t_3$  nemá omezovač téměř žádný vliv na chod transformátoru jelikož na indukčnosti není téměř žádný úbytek napětí který by ovlivňoval chod transformátoru v ustáleném stavu.[7]



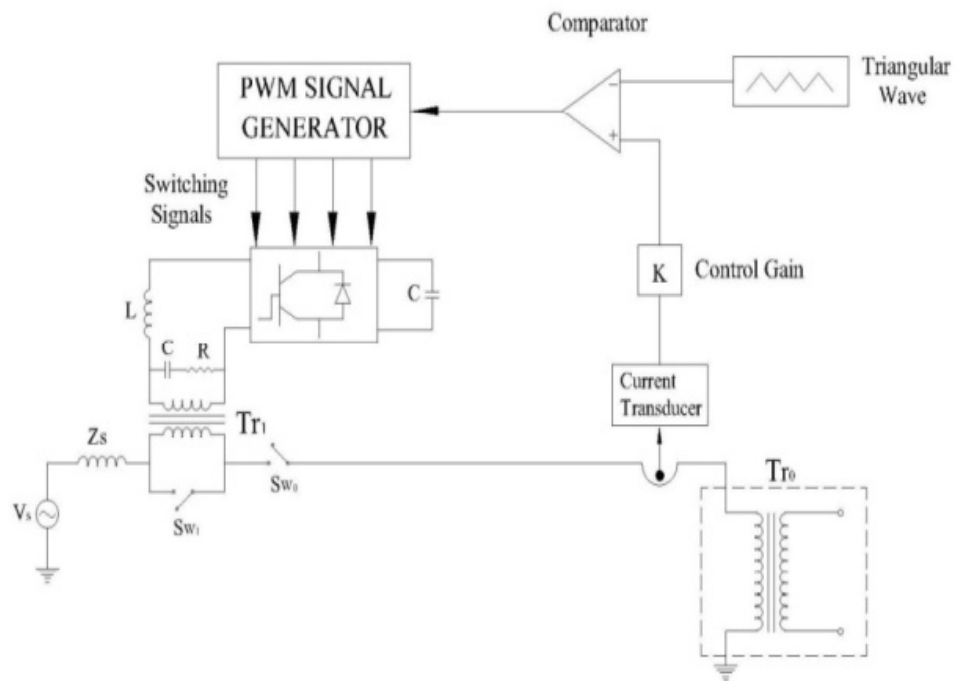
Obr. 2.6 Jednofázové schéma kompenzátoru[7]



Obr. 2.7 Průběh zapínacího proudu a stejnosměrného proudu na indukčnosti  $L_d$ [7]

## 2.6 PWM měnič

Při této metodě se omezení zapínacího proudu provádí pomocí PWM měniče. Sériový kompenzátor dodává kompenzační proud do sekundárního vinutí transformátoru. Tento proud dodávaný sériovým kompenzátozem má opačnou polaritu než zapínací proud, dochází tedy k omezení zapínacího proudu. Na obrázku 2.8 je jednofázové schéma zapojení omezovače. Transformátor  $Tr_0$  je transformátor, na kterém je omezován zapínací proud. PWM měnič je připojen sériově k transformátoru  $Tr_0$  pomocí oddělovacího transformátoru  $Tr_1$ . PWM měnič se chová jako odpor a je řízen protínáním sinusového a pilového signálu. LC filtr je připojen na střídavou stranu PWM měniče pro potlačení zapínací špičky způsobené spínáním.[8]

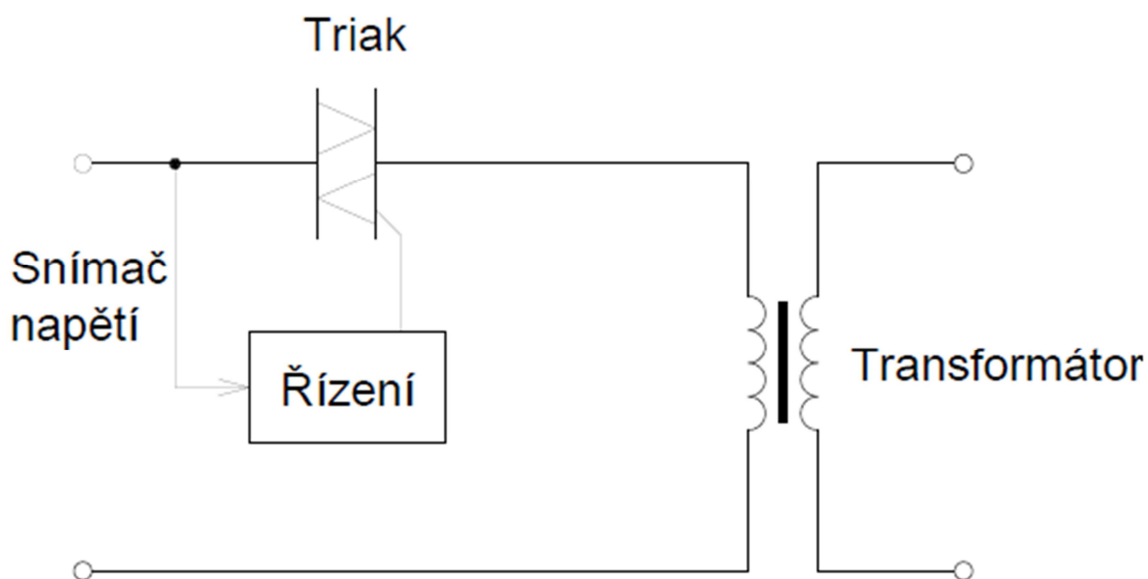


Obr. 2.8 Jednofázové schéma PWM měniče připojeného k transformátoru[8]



## 2.7 Obvod měkkého rozběhu

V této metodě omezení zapínacího proudu je transformátor připojován k síti přes polovodičový spínací prvek, nejčastěji triak. Triak je řízen při omezování zapínacího proudu unipolárně, to znamená, že při připojování je transformátor připínán impulsy, které mají pouze jednu polaritu. Při rozběhu je nutno vhodně nastavit dobu trvání jednoho pulsu a také okamžik rozpojení, aby nedocházelo ke vzniku značných indukovaných napětí. Z tohoto důvodu je vhodné obvod rozpojovat v okamžiku kdy proud na primární straně prochází nulou. Během série těchto pulsů je jádro postupně magnetizováno až do počátku stavu nasycení. Aby nedošlo ke vzniku stejnosměrné složky magnetického toku, musí se aktuální tok v jádře a tok v ustáleném stavu rovnat v okamžiku připojení. Toho lze docílit tím, že po posledním pulsu připojíme transformátor k síti v úhlu  $180^\circ$  napájecího napětí, tedy při průchodu nulou do záporné půlperrody. Tato metoda je kombinací dočasného snížení napájecího napětí a připojení transformátoru k síti ve vhodném okamžiku napájecího napětí. Na obrázku 2.9 je schéma zapojení obvodu měkkého rozběhu. Triak je připojen sériově k primárnímu vinutí transformátoru, k řídicímu obvodu triaku musí být připojeno snímání síťového napětí pro správné vyhodnocení okamžiku připojení triaku.[2]



Obr. 2.9 Schéma zapojení obvodu měkkého rozběhu

### 3 Měření zapínacího proudu

Zapínací proud transformátoru byl měřen na trojfázovém transformátoru s parametry:

$$S_n = 900 \text{ VA}$$

$$U_{s1n} = 400 \text{ V}$$

$$U_{s2n} = 230 \text{ V}$$

$$U_{s1f} = 230 \text{ V}$$

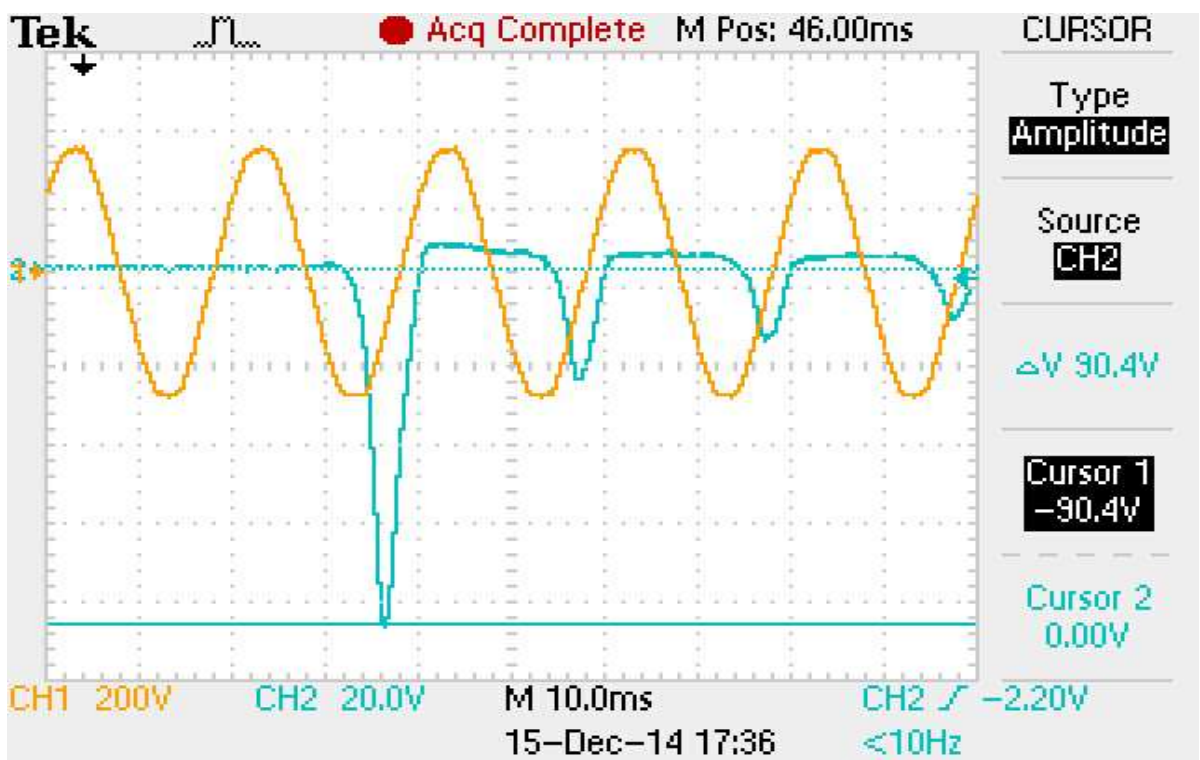
$$U_{s2f} = 132 \text{ V}$$

$$I_{1n} = 2,26 \text{ A}$$

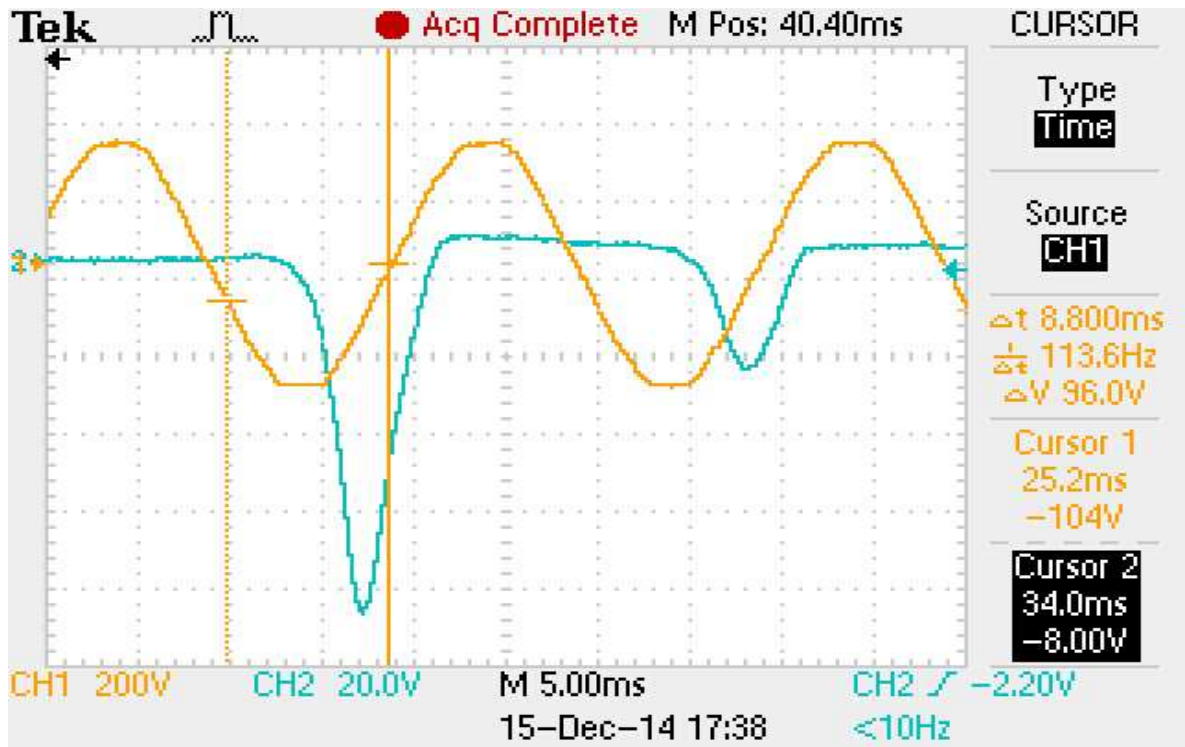
$$I_{2n} = 3,91 \text{ A}$$

Proud naprázdno v ustáleném stavu byl 450 mA. Zapínací proud byl měřen na primární straně transformátoru z důvodu nižšího proudu. Proud byl zaznamenáván na digitálním osciloskopu jako úbytek napětí na bezindukčním odporu jehož hodnota byla 6  $\Omega$ .

Měření č. 1:



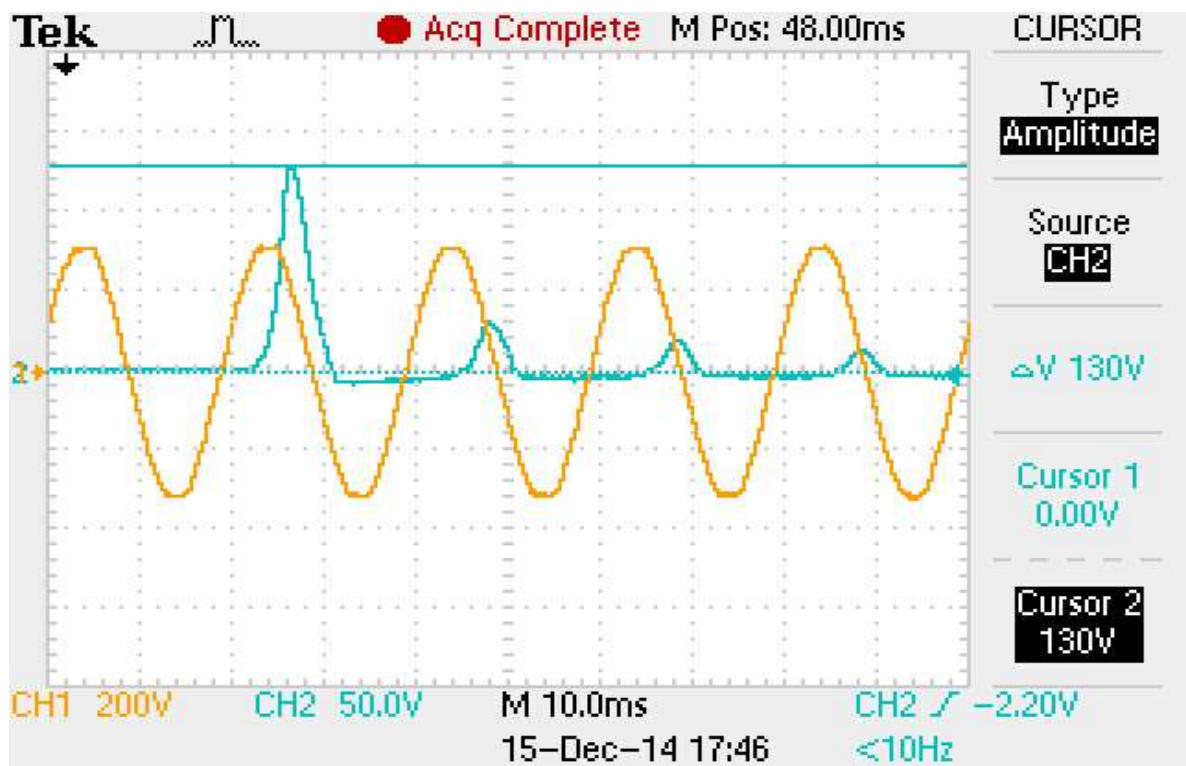
Obr. 3.1 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu



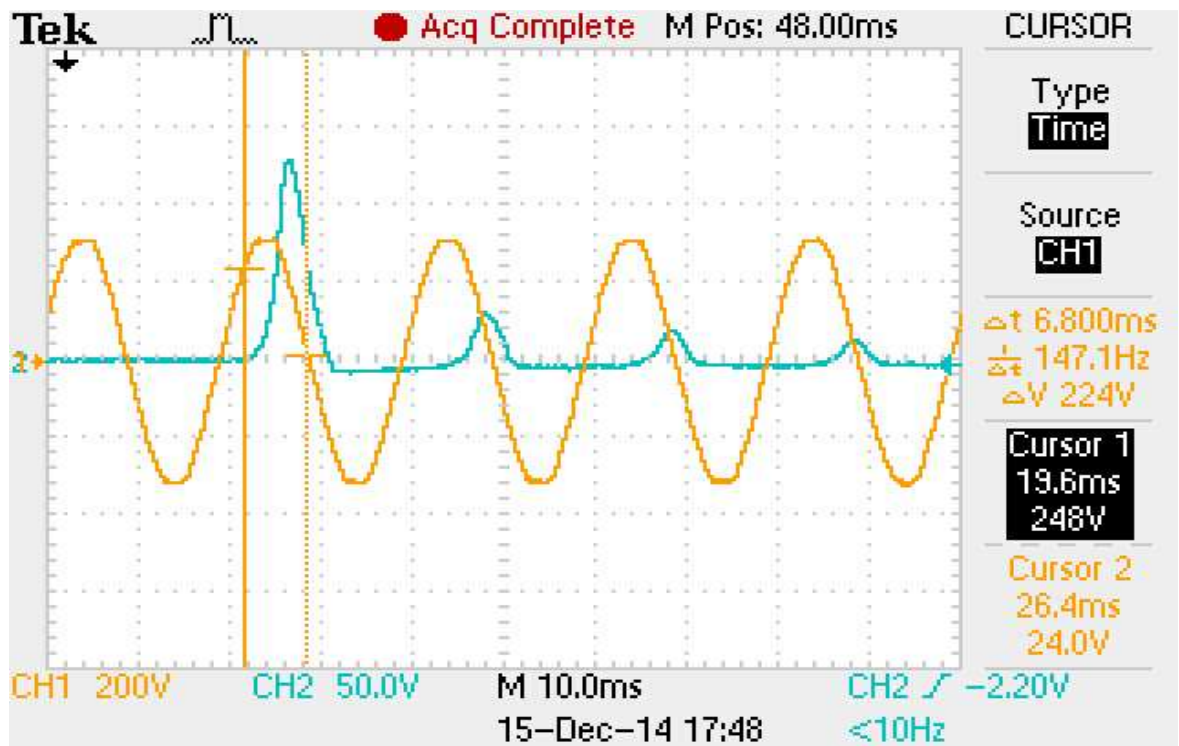
Obr. 3.2 Snímek úhlu připnutí transformátoru

Při tomto měření byla maximální hodnota proudu 15,07 A. Úhel připnutí je  $-158,4^\circ$ .

Měření č. 2:



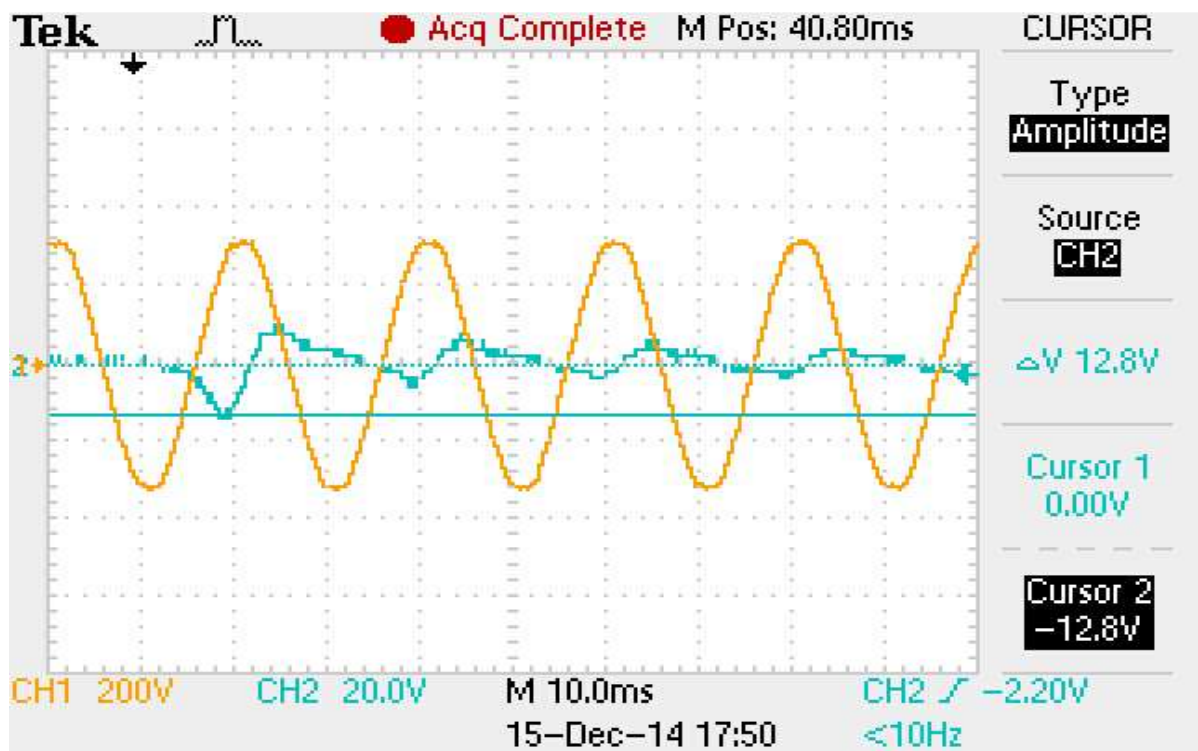
Obr. 3.3 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu



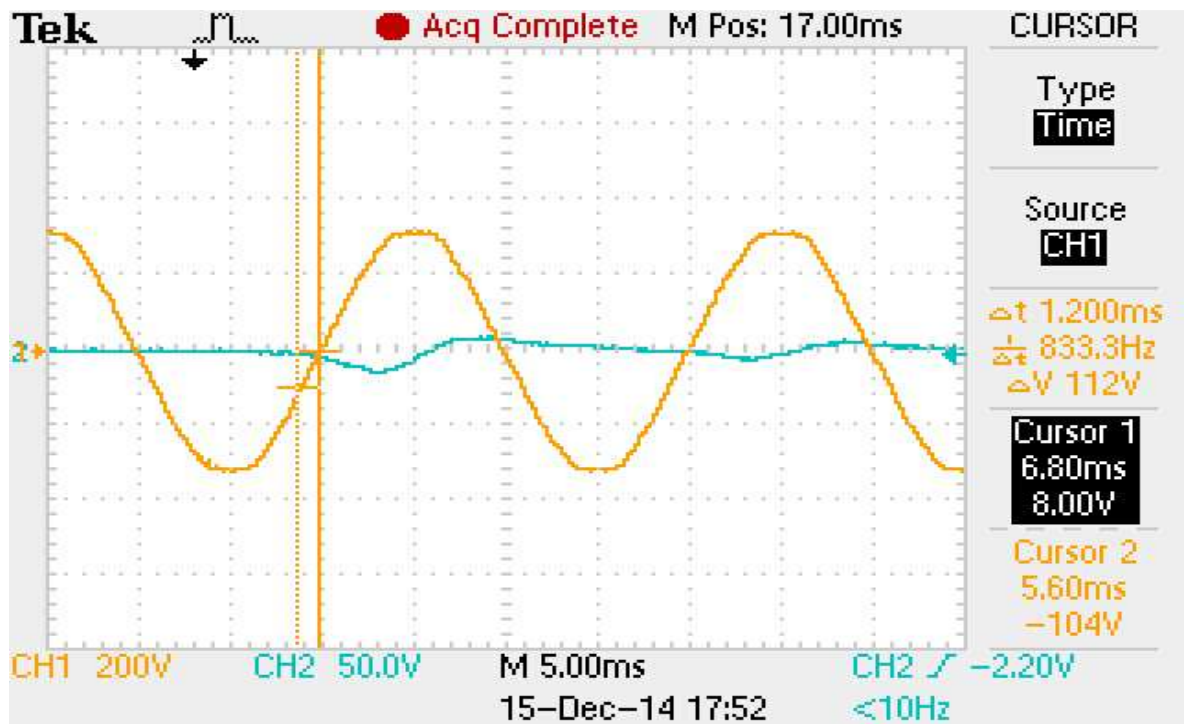
Obr. 3.4 Snímek úhlu připnutí transformátoru

Při tomto měření byla maximální hodnota proudu 21,7 A. Úhel připnutí je 57°.

Měření č. 3:



Obr. 3.5 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu



Obr. 3.6 Snímek úhlu připnutí transformátoru

Při tomto měření byla maximální hodnota proudu 2,1 A. Úhel připnutí je  $-21^\circ$ . Jelikož okamžik připnutí je blízko průchodu nulou, velikost zapínacího proudu by měla být vyšší. Takto nízký proud je pravděpodobně způsoben remanentním tokem v jádře který svou velikostí a polaritou zamezil vzniku stejnosměrné složky magnetického toku, která způsobuje zapínací proud.



## 4 Závěr

Zapínací proud transformátoru je jednoznačně přechodový děj, který by neměl být zanedbáván a při návrhu transformátoru by měl být brán ohled na vliv tohoto jevu.

Z měření v laboratoři bylo zjištěno, že maximální hodnota zapínacího proudu může dosáhnout až 40ti násobku proudu transformátoru naprázdno. Takové proudy již mohou způsobit zareagování ochranných prvků a následné odpojení transformátoru od sítě. Pro správnou funkci transformátoru je tedy potřeba omezovat hodnotu zapínacího proudu.

Ze tří základních principů, kterými lze potlačit zapínací proud je nejméně efektivní metoda snižující remanentní indukci v jádře. Tato metoda omezí maximální hodnotu zapínacího proudu pouze přibližně o 30%. Odstraněním remanentní indukce totiž nelze zabránit vzniku zapínacího proudu, jelikož přechodový děj může přesto vzniknout pokud je transformátoru připnut v nevhodném okamžiku, to jest v oblasti průchodu napětí nulou. Navíc tato metoda vyžaduje zásah do magnetického obvodu transformátoru. Metoda zvyšující dočasně impedanci primárního obvodu je velmi účinná, při vhodně navržené hodnotě impedance může být zapínací proud úplně potlačen. Nevýhodou je však delší doba odeznívání přechodového děje a nutnost použití kontaktního relé pro vyzkratování předřadné impedance. Tato metoda také dočasně snižuje napětí na primárním vinutí, proto tuto metodu nelze použít u aplikací, ve kterých je nežádoucí nižší napětí než jmenovité. Metoda připnutí v optimální fázi napájecího napětí je velmi efektivní a dokáže plně potlačit zapínací proudy. Je však nutno počítat s remanentním magnetickým tokem, proto spínací obvod (nejčastěji obvod měkkého rozběhu) musí jádro transformátoru demagnetizovat a následně transformátor připojit ve vhodné fázi napájecího napětí. Ve srovnání s metodou zvýšení impedance primárního obvodu je tato metoda značně složitější a vyžaduje rychlé spínací součástky, nejčastěji polovodičové spínací prvky a řídicí obvody. Metoda omezení zapínacího proudu použitím vysokoteplotních supravodičů je také velmi účinná, její nevýhodou však je požadavek na chlazení, tuto metodu lze použít například u supravodivých transformátorů, kde je chlazení nutné z důvodu udržení supravodivosti transformátoru. Nové metody založené na použití polovodičových měničů jsou další možností jak omezit zapínací proud. Výhodou použití diodového můstku se stejnosměrnou indukčností je, že není potřeba žádný řídicí obvod. PWM měnič již vyžaduje řídicí obvod.

Při volbě metody potlačení zapínacího proudu je také potřeba znát zátěž, která bude připojena na sekundární stranu a její charakter. Ze znalosti připojené zátěže se dále vychází při návrhu zařízení omezující zapínací proud, určuje se například doba odeznívání přechodového děje a další parametry.

V bakalářské práci byl v první části popsán vznik přechodového děje způsobujícího zapínací proud transformátoru, ve druhé části byly uvedeny možné způsoby potlačení tohoto přechodového děje a ve třetí části byl ověřen vznik tohoto přechodového děje laboratorním měřením na zadaném transformátoru.

## 5 Seznam literatury

- [1] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Překlad Břetislav Benda. Praha: Academia, 1980, 385, [1] s.
- [2] NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: způsoby omezování zapínacího proudu : autoreferát disertační práce. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2003, 29 s.
- [3] NTC Thermistors, Inrushcurrentlimiters. [online]. Applicationnoteof Thomson | CSF pasivecomponents. 22 p. [cit. 1. 6. 2015]. Dostupné na www: [http://www.ryston.cz/pdf/avx/ntc\\_th.pdf](http://www.ryston.cz/pdf/avx/ntc_th.pdf)
- [4] MOLCRETTE, V., J.-L. KOTNY, J.-P. SWAN a J.-F. BRUDNY. Reductionofinrushcurrent in single-phasetransformerusingvirtual air gap technique. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 1998, **34**(4): 1192-1194 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1109/20.706479.
- [5] SHIMIZU, H., K. MUTSUURA, Y. YOKOMIZU a T. MATSUMURA. Inrush-Current-LimitingWithHighT<sub>c</sub>Superconductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2005, **15**(2): 2071-2073 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1109/tasc.2005.849454.
- [6] TAYLOR, Douglas I., Joseph D. LAW, Brian K. JOHNSON a Normann FISCHER. Single-Phase TransformerInrushCurrentReductionUsingPrefluxing. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2012, **27**(1): 245-252 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1109/tpwr.2011.2174162.
- [7] ABAPOUR, M. a M. Tarafdar HAQH. A Non-ControlTransformerInrushCurrentLimiter. 2006 *IEEE International Conference on Industrial Technology* [online]. 2006 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1109/icit.2006.372648.
- [8] WANI, Manisha, Kalyani KURUNDKAR a M. P. BHAWALKAR. Use ofpowerelectronic converters to suppresstransformerinrushcurrent. 2012 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* [online]. 2012 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1109/pedes.2012.6484452.



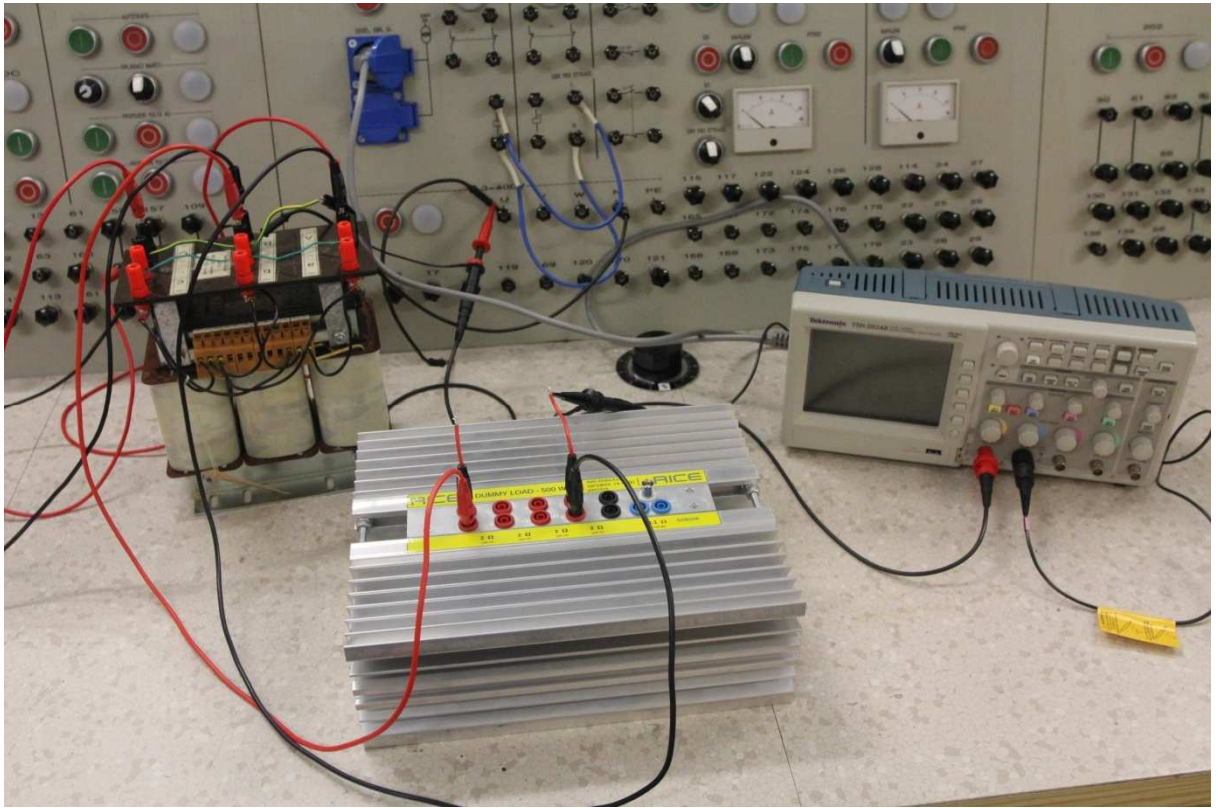
## 6 Přílohy

Seznam příloh:

A. Fotografie měřícího stanoviště + schéma zapojení.....	34
B. Měření číslo 4.....	35
C. Měření číslo 5.....	36
D. Měření číslo 6.....	37

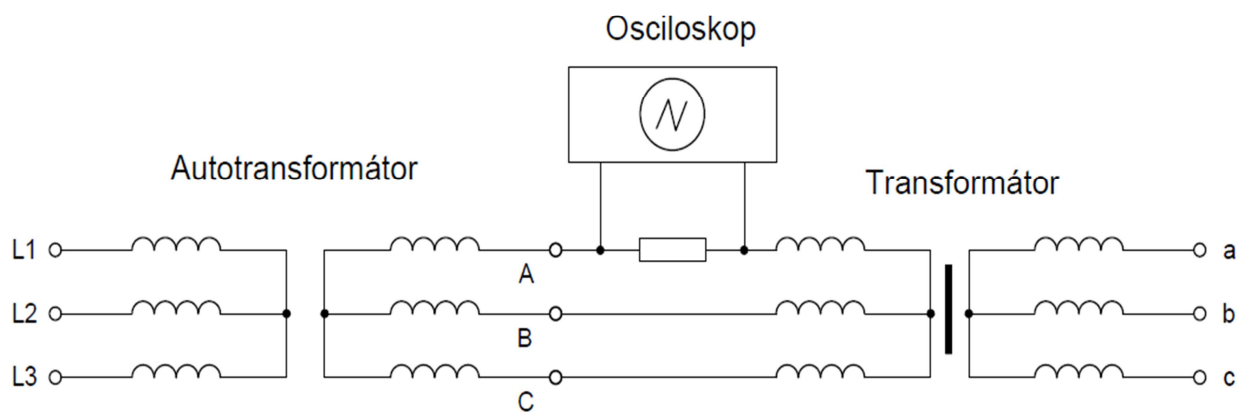
## Příloha A

Fotografie měřícího stanoviště:



Obr. 6.1 Fotografie měřícího stanoviště

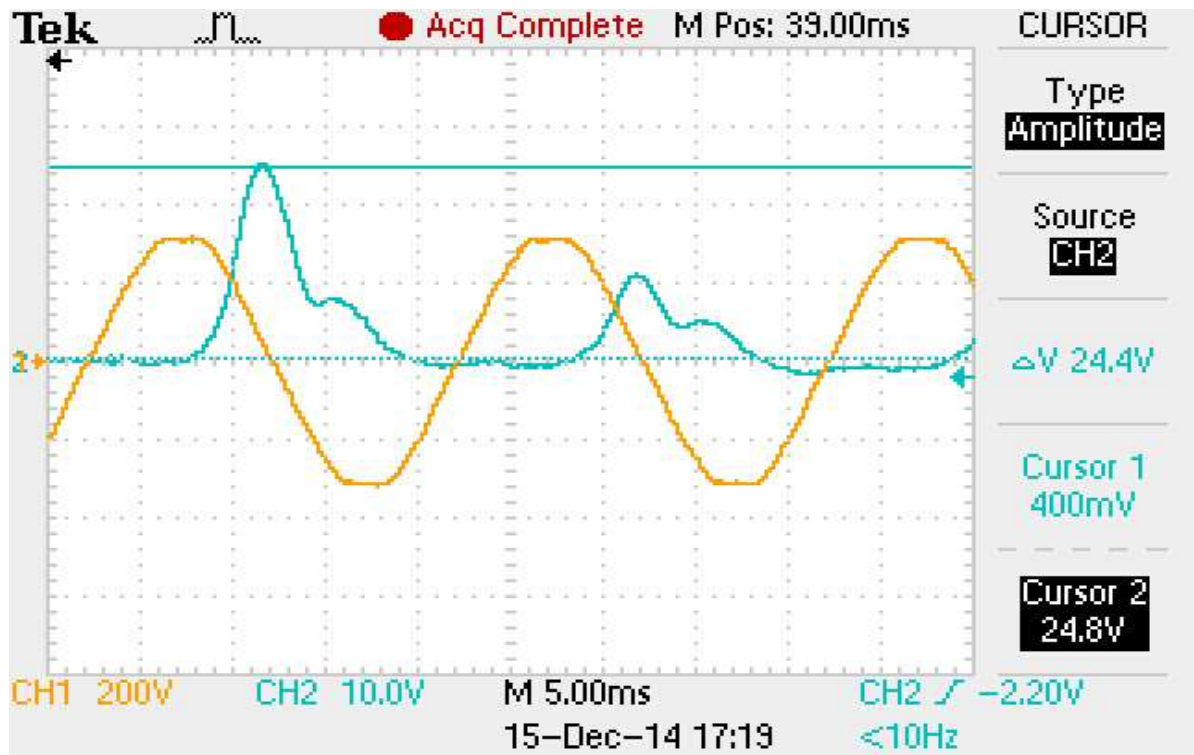
Schéma zapojení:



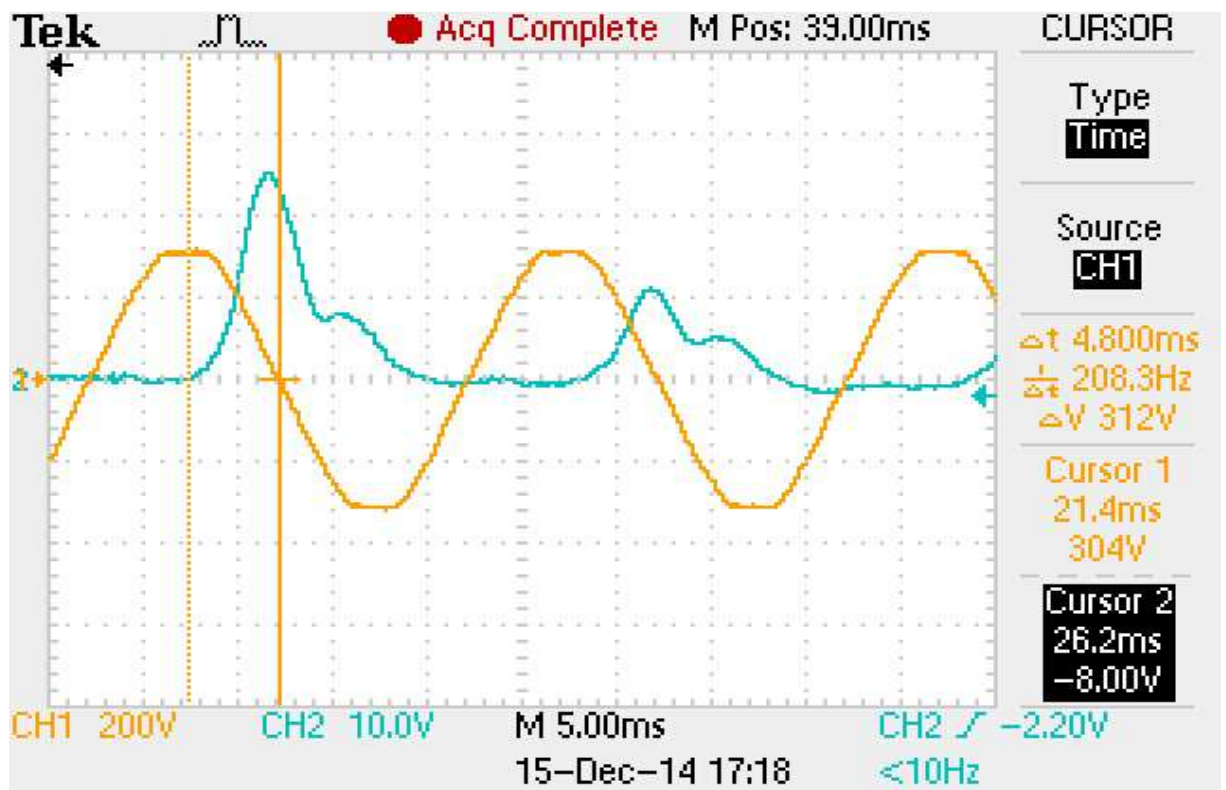
Obr. 6.2 Schéma zapojení měřícího obvodu

## Příloha B

Měření č. 4



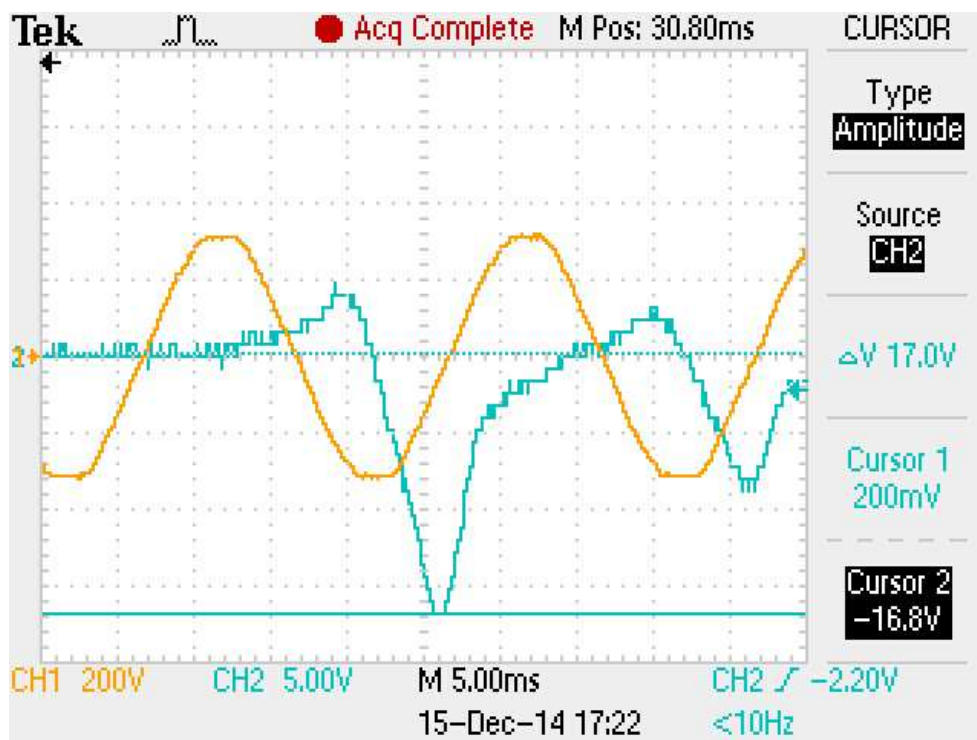
Obr. 6.3 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu



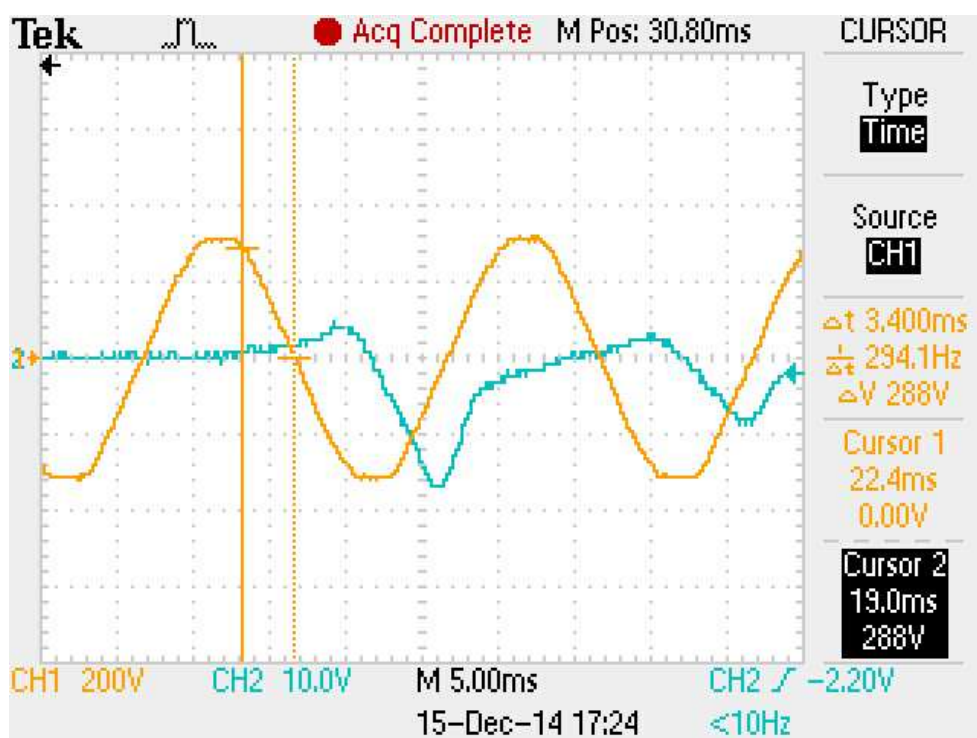
Obr. 6.4 Snímek úhlu připnutí transformátoru

## Příloha C

Měření č. 5:



Obr. 6.5 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu

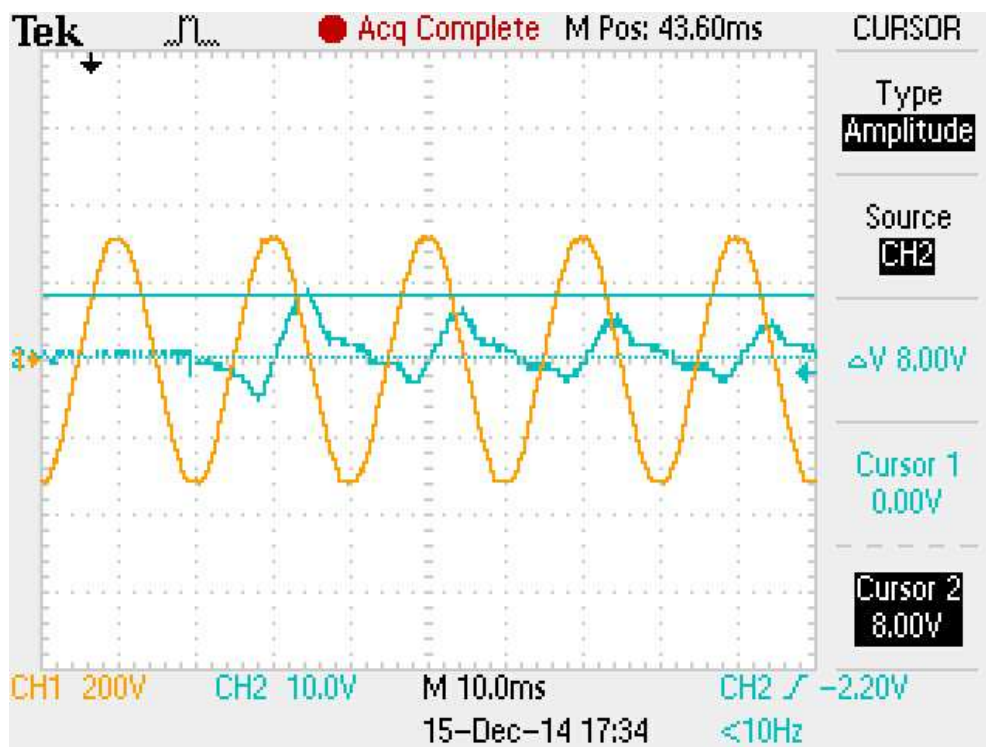


Obr. 6.6 Snímek úhlu připnutí transformátoru

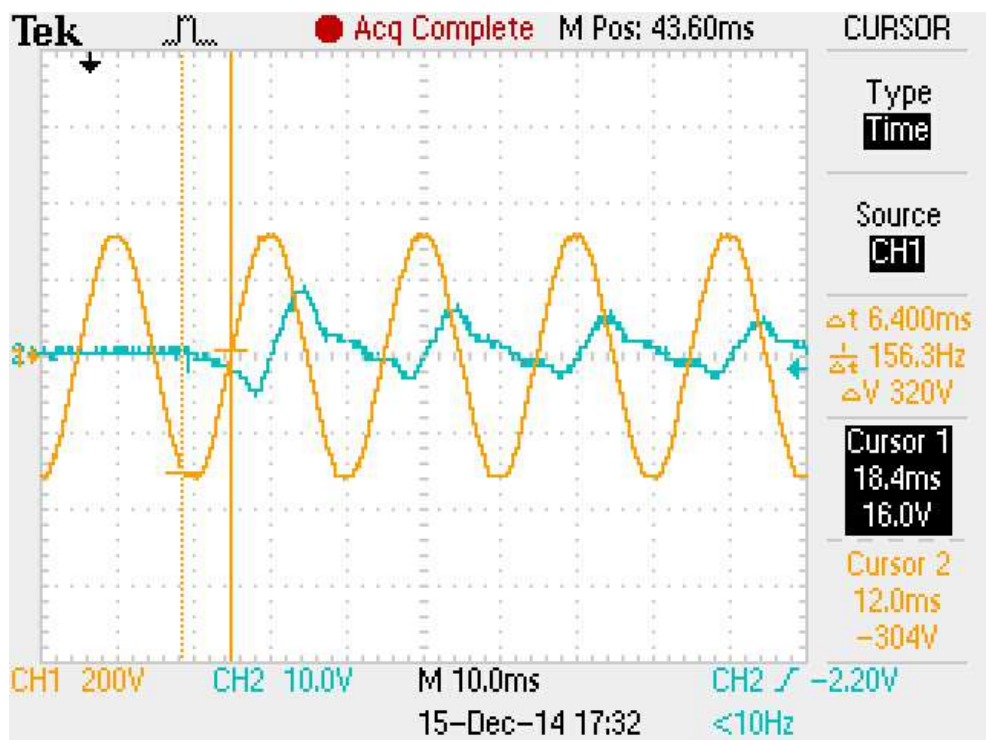


## Příloha D

Měření č. 6:



Obr. 6.7 Snímek max. hodnoty zapínacího proudu



Obr. 6.8 Snímek úhlu připnutí transformátoru