

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Analýza zapínacích proudů malých transformátorů

Jan Kasper

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
Obor: Elektronika, energetika a management
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kasper** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **483589**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza zapínacích proudů malých transformátorů

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of inrush currents of small transformers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište funkci a způsob jištění malých transformátorů a navrhnete možnosti řešení pro jištění ze strany primárního vinutí.
- 2) Analyzujte vliv připojené zátěže (usměrňovač) na zapínací proudy transformátoru.
- 3) Navrhnete možná řešení pro ovlivnění zapínacích proudů.
- 4) Navržená řešení analyzujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] L. Cigánek a M. Bauer, Elektrické stroje a přístroje. Praha: Státní nakladatelství technické literatury 2. vydání, 1957
- [2] M. Novák, Přejímový děj při zapnutí transformátoru. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2003
- [3] Z. Faktor, Transformátory a cívky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1. vydání, 1999
- [4] N. Chiesa, Power transformer modelling for Inrush Current calculation. Disertační práce, Norwegian University of Science and Technology, Norsko, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu za praktické rady a veškerou pomoc i ve večerních hodinách, firmě Mdexx Trutnov za poskytnutí materiálu a zázemí pro měření, kolegům z oddělení EE za pomocnou ruku při prvním sestavování vzorků a věcné rady a také své rodině a kamarádům za veškerou poskytnutou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských prací. 9. května 2022

Jan Kasper

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou zapínacích proudů malých transformátorů z hlediska jejich omezení konstrukčně nebo externím obvodem tak, aby bylo možné jednoduše jistit primární stranu transformátoru. Cílem této práce je shrnout metody pro omezení velikosti zapínacího proudu využitelné při sériové výrobě a dále pak vytvořit návrh pro jištění primární strany transformátorů jednotlivých skupin AM vyráběných firmou Mdexx Trutnov.

Klíčová slova: Transformátor, zapínací proud, přechodový děj, jištění primární strany transformátoru.

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of the inrush currents of small transformers in terms of their limitation by design or external circuit so that it is possible to easily secure the primary side of the transformer. The aim of this work is to summarize the methods for limiting the magnitude of the inrush current usable in series production and then to create a proposal for securing the primary side of the transformers of individual groups AM made by Mdexx Trutnov company.

Keywords: Transformer, Inrush current, Transient phenomena, Protection of the primary winding of small transformer

Title translation: Analysis of inrush currents of small transformers

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 0 Úvod | 1 |
| 0.1 Současný stav problematiky | 1 |
| 0.2 Cíle práce | 1 |
| 0.3 Struktura práce | 1 |
| 1 Transformátor | 3 |
| 1.1 Princip funkce transformátoru | 3 |
| 1.1.1 Konstrukce transformátoru | 4 |
| 1.1.2 Transformátorová rovnice | 5 |
| 1.1.3 Náhradní schéma transformátoru | 6 |
| 1.2 Jističe | 7 |
| 1.2.1 Princip jištění | 9 |
| 1.2.2 Jištění strojních zařízení | 9 |
| 1.3 Vzorový měřený transformátor | 9 |
| 1.3.1 Základní parametry | 10 |
| 1.3.2 Ostatní parametry | 12 |
| 1.3.3 Schéma vzorového transformátoru | 14 |
| 1.3.4 Odporová zátěž | 15 |
| 1.3.5 Zdroj 24VDC jako zátěž transformátoru | 15 |
| 2 Možná řešení snížení zapínacích proudů | 21 |
| 2.1 Přejímový děj v transformátoru | 21 |
| 2.1.1 Zapínací proud | 21 |
| 2.1.2 Metody výpočtu zapínacího proudu | 21 |
| 2.2 Metody pro omezení zapínacího proudu | 23 |
| 2.2.1 Připnutí ve vhodné fázi | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2 Snížení pracovní indukce | 24 |
| 2.2.3 Metoda virtuální mezery | 24 |
| 2.2.4 Snížení remanentní indukce | 25 |
| 2.2.5 Připnutí transformátoru v optimální fázi napájecího napětí | 25 |
| 2.2.6 Změna reluktance magnetického obvodu vložení vzduchové mezery | 26 |
| 2.2.7 Vliv provedení svaru plechu | 27 |
| 2.2.8 Polovodičové relé | 27 |
| 2.2.9 Vliv impedance primární strany na velikost zapínacího proudu | 28 |
| 2.2.10 Zapojení s předradníkem | 28 |
| 2.2.11 Zdroj pro spínání v optimálním bodu síťového napětí | 29 |
| 2.3 Shrnutí metod pro omezení zapínacího proudu | 30 |
| 3 Vliv zátěže transformátoru na velikost zapínacího proudu | 31 |
| 3.1 Stav nakrátko | 31 |
| 3.2 Stav naprázdno | 31 |
| 3.3 Odporová zátěž | 32 |
| 3.4 Kapacitní zátěž | 32 |
| 3.5 Induktivní zátěž | 32 |
| 4 Praktická část | 33 |
| 4.1 Měření vzorového transformátoru 63 VA | 33 |
| 4.2 Měření zapínacího proudu transformátoru 63 VA | 34 |
| 4.2.1 Použité přístroje | 35 |
| 4.3 Průběhy | 40 |
| 4.3.1 Oscilogramy | 40 |
| 4.3.2 Grafy | 41 |
| 4.3.3 Doporučení jištění | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 5 Shrnutí | 49 |
| 5.1 Shrnutí konstrukce vzorkového transformátoru..... | 49 |
| 5.2 Shrnutí řídicího obvodu..... | 49 |
| 5.3 Shrnutí měření | 50 |
| 5.4 Shrnutí možných řešení v praxi | 51 |
| A Vzorový transformátor | 53 |
| B Řídicí obvod s výkonovým spínačem | 55 |
| C Jištění transformátorů řady AM dle skupin | 59 |
| D Seznam použitých symbolů | 61 |
| E Literatura | 65 |
| F Obrázky | 67 |
| G Tabulky | 71 |

Kapitola 0

Úvod

0.1 Současný stav problematiky

Problematika spínání transformátorů je prozkoumávána již řadu let. Při připnutí transformátoru k síti dochází k přechodovému ději, který má za následek velkou proudovou špičku, která zatěžuje jak rozvodnou soustavu, samotný transformátor, tak i obvody připojené na sekundární vinutí transformátoru. Přechodný děj je závislý na mnoha faktorech jako jsou například úhel sepnutí, natočení domén v magnetickém obvodu, energie potřebná k nasycení jádra, kvalita trafoplechů, způsob složení trafoplechů do výsledného jádra aj. Proudová špička způsobená připnutím transformátoru nejen zatěžuje celkovou soustavu, ale také je zde problém tuto špičku jistit. V současnosti je kladen důraz na kvalitní jištění všech elektrických obvodů, což u menších transformátorů není standardem, jelikož se zpravidla jistí jen sekundární strana, protože jištění primární strany je problematické.

0.2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je:

- Nalézt a analyzovat metody pro omezení zapínacího proudu, které mají smysl při sériové výrobě transformátoru.
- Prakticky ověřit vybrané metody pro omezení zapínacího proudu.
- Navrhnout vhodné jištění primární strany malých transformátorů.

0.3 Struktura práce

V kapitole (1) se nachází základní princip funkce transformátoru, dále je zde popsána konstrukce jednofázových transformátorů z hlediska elektrického a magnetického obvodu pomocí transformátorové rovnice, náhradního schématu a popis možností složení magnetického obvodu. V druhé části této kapitoly je rozebrán princip jištění transformátorů z primární strany. Kapitola je zakončena návrhem vzorového transformátoru pro praktické ověření teoretického rozboru.

V kapitole (2) je v první části popsán přechodový děj v transformátoru při připnutí k napájení. V druhé části jsou popsány jednotlivé metody pro omezení zapínacího proudu. Na konci kapitoly je výběr možných metod pro omezení zapínacího proudu použitelných v praxi.

Kapitola (3) se zabývá vlivem zátěže na sekundární straně na velikost zapínacího impulsu. Častý případ užití malých transformátorů je jako součást stejnosměrného zdroje realizovaného transformátorem s připojeným usměrňovačem s filtrační kapacitou na sekundárním vinutí.

V kapitole (4) je na začátku provedeno měření vzorového transformátoru zkonstruovaného pro účely této práce. V další části jsou sepsány výsledky měření zapínacího proudu vzorového transformátoru s různými typy zátěží na sekundárním vinutí a při různém úhlu sepnutí. Závěr této kapitoly tvoří doporučení jistění pro daný transformátor.

Závěrečná kapitola (5) krátce shrnuje naměřené výsledky a diskutovanou problematiku jistění primární strany transformátoru a omezení zapínacích proudů.

V příloze (A) je uvedena dokumentace k vzorovému transformátoru.

V příloze (B) je podrobně rozepsán řídicí obvod použitý při měření.

V příloze (C) jsou v tabulkách sepsány navržené jističe SIEMENS pro transformátory ze skupiny AM dle jejich velikosti a výkonu.

Kapitola 1

Transformátor

1.1 Princip funkce transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který mění střídavý proud o určitém napětí a frekvenci na střídavý proud stejné frekvence a jiného napětí. Vinutí na vstupní straně se nazývá primární a vinutí na výstupní straně sekundární. Někdy tedy označujeme vstupní stranu primár a výstupní stranu sekundár.[1]

Princip funkce transformátoru je založen na Maxwell-Faradayově zákonu o indukovaném napětí:

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \text{ [V]} \quad (1.1)$$

Vlivem střídavého proudu na primárním vinutí je vytvořen hlavní magnetický tok primáru Φ_{1h} . Tento tok indukuje v sekundárním vinutí napětí. Pokud je sekundární obvod uzavřený, proud procházející sekundárním vinutím vytváří hlavní magnetický tok sekundáru Φ_{2h} . Výsledný magnetický tok Φ_h je pak definován jako součet obou toků

$$\Phi_h = \Phi_{1h} + \Phi_{2h} \text{ [Wb]}, \quad (1.2)$$

kde:

$$\Phi_{1h} = \Phi_{1hm} \cdot \sin(\omega t) \text{ [Wb]}, \quad (1.3)$$

$$\Phi_{2h} = \Phi_{2hm} \cdot \sin(\omega t) \text{ [Wb]}, \quad (1.4)$$

$$\Phi_h = \Phi_{hm} \cdot \sin(\omega t) \text{ [Wb]}. \quad (1.5)$$

Proudy procházející primárním a sekundárním vinutím vyvolávají rovněž rozptylové magnetické toky $\Phi_{1\sigma}$ na primáru a $\Phi_{2\sigma}$ na sekundáru. Tyto toky se přes magnetický obvod transformátoru neuzavírají a navzájem se neovlivňují [2].

1.1.1 Konstrukce transformátoru

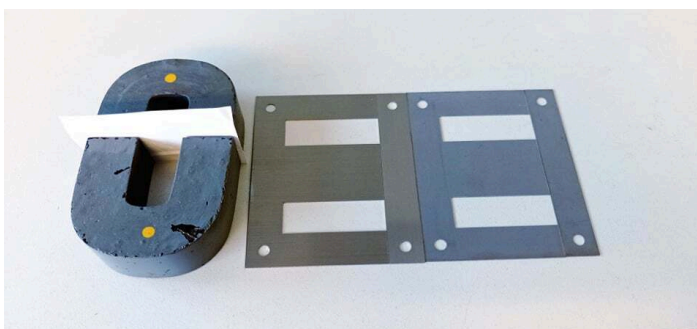
Transformátor je obecně složen z magnetického a elektrického obvodu. Je zde také možnost využít cívkové těleso, na které se navine drát vinutí. Cívkové těleso se používá většinou u transformátorů menších výkonů u jader typu EI, UI a 3UI. Navíjení větších transformátorů probíhá obvykle přímo na jádra bez cívkových těles.

Hlavní magnetický obvod transformátoru pro běžné nízkofrekvenční (nf) aplikace je obvykle skládán z elektrotechnických plechů o tloušťce cca 0,5 mm, vyrobených z elektrotechnické oceli, izolovaných nanesením velmi tenké izolační vrstvy na povrch jednotlivých plechů. Odizolováním jednotlivých plechů od sebe a rozdělením magnetického obvodu do dílčích částí se dosahuje nižších ztrát vířivými proudy. Dalšího snížení ztrát v železe lze docílit válcováním orientovaných plechů za studena a legováním křemíkem, čímž se při této aplikaci sice poněkud zvýší činný odpor železa,lepší se však mechanické a magnetické vlastnosti plechu ve směru válcování. Obsah křemíku bývá až několik procent. Dále obsahuje magnetický obvod magnetické spojky, uzavírající magnetický tok. Nejčastěji se využívají plechy typu EI, které lze skládat tzv. natupo, nebo přeplátováním. Skládání natupo má výhodu v jednodušší montáži, ale problémem zde je tuhost či vyšší pravděpodobnost zkratu. Skládání přeplátováním má lepší magnetické vlastnosti [2][3].

Elektrický obvod transformátoru se skládá z vinutí. Jednotlivá vinutí mohou být galvanicky oddělena. Pokud primární a sekundární vinutí od sebe galvanicky oddělena nejsou, mluvíme o autotransformátoru.

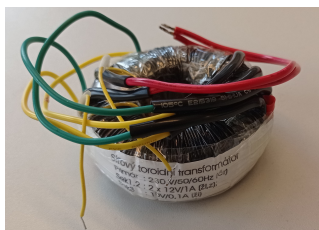
Toroidní transformátor je charakteristický nízkými rozptylovými toky, vysokou účinností (přes 99 %) a nízkým proudem naprázdno. Toroidní transformátory nemají vzduchovou mezeru, mají tudíž oproti transformátorům s EI plechy veliký zapínací proud. Toroidní transformátory pro běžné aplikace na síťové frekvenci mají jádro z klasických transformátorových plechů, které se při výrobě stříhají na jemné proužky. Pro vysoké frekvence se používají feritová jádra.

C-jádra se používají jak pro transformátory, tak pro tlumivky. C-jádro je charakteristické definovanou vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu.



Obrázek 1.1: Zleva: C-jádro, EI plechy kvalita 530-50, EI plechy kvalita 165-35

Na obrázku (1.1) je vyobrazeno kompletní C jádro, které je složeno jen ze dvou kusů, vedle něj jsou vyobrazeny EI plechy kvality 530-50 a EI plechy kvality 165-35. Je zde patrný rozdíl ve skladbě jádra, kde C- jádro je tvořeno pouze dvěma kusy, zatímco EI jádra jsou složena z několika desítek plechů, jak je vidět na obrázku (1.3)



Obrázek 1.2: Toroidní transformátor



Obrázek 1.3: Vzorový transformátor pohled z čelní strany

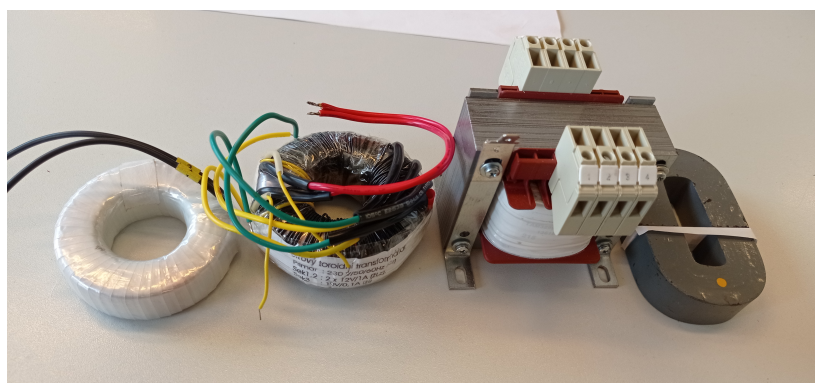


Obrázek 1.4: Zleva: feritový transformátor 5.1 kVA, vzorový transformátor 63 VA

Na obrázku (1.2) je vyobrazen příklad toroidního transformátoru, konkrétně o výkonu 100 VA. Na obrázku (1.4) je vyobrazeno porovnání transformátoru s feritovým jádrem o výkonu 5,1 KVA a vzorového transformátoru o výkonu 63 VA, zde je vidět, jak veliký je rozdíl v dodávaném výkonu při stejné velikosti jen při změně frekvence napájení. Na obrázku (1.5) jsou vyobrazeny dva toroidní transformátory, kde levý má navinuté pouze primární vinutí, dále pak vzorový transformátor a C-jádro.

Za zmínku stojí i planární transformátory. Planární transformátor je transformátor, který lze umístit přímo na desku plošného spoje, jelikož jeho vinutí je tvořeno přímo deskou plošného spoje. Magnetický obvod má tvar EE, popřípadě EI. Tím, že transformátor má miniaturní rozměry, tak má menší rozptylové toky[4].

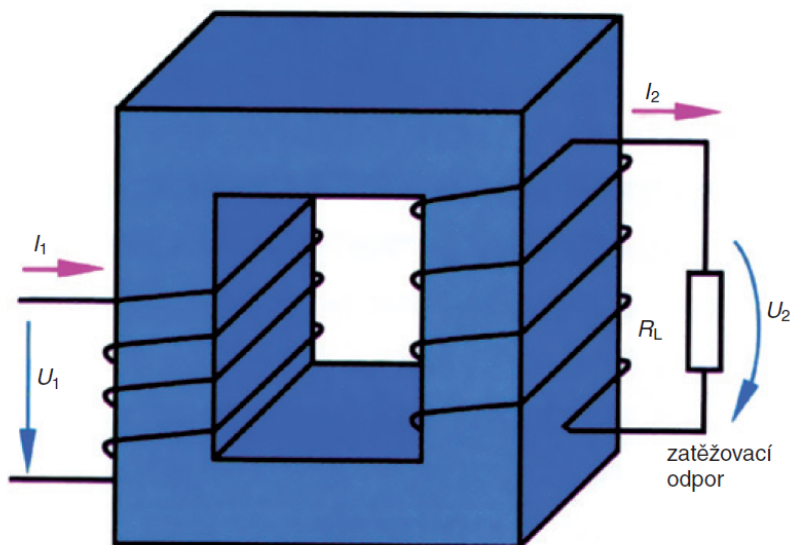
Tato práce se bude zabývat především malými transformátory s EI plechy orientovanými a neorientovanými.



Obrázek 1.5: Zleva: Toroidní jen s prim.vin., toroidní tr., tr. s EI plechy, C-jádro

1.1.2 Transformátorová rovnice

Budeme uvažovat jednofázový plášťový dvouvinutový transformátor (obdoba je použita pro praktickou část), jehož primární a sekundární vinutí jsou navinuta pravým směrem na společném magnetickém obvodu. Rovnice (1.2)-(1.5) popisují magnetické toky vytvořené v magnetickém obvodu. Pokud na sekundár připojíme zátěž, začne sekundárním vinutím protékat proud i_2 . Pak lze napsat napěťové rovnice pro obě vinutí [1][5][6]:



Obrázek 1.6: Znázornění magnetického obvodu 1f transformátoru převzato z [1]

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + u_{i1} \text{ [V]} \quad (1.6)$$

$$u_2 = -R_2 i_2 - L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + u_{i2} \text{ [V]} \quad (1.7)$$

1.1.3 Náhradní schéma transformátoru

Na obrázku (1.6) je vyobrazen základní princip složení jednofázového transformátoru. Dle rovnic (1.6) a (1.7) lze vytvořit náhradní schéma transformátoru. Je-li transformátor připojen na harmonické napětí, lze zobrazit v Gaussově rovině časový vektor otáčející se kruhovou frekvencí ω . Výsledné vzorce pro indukovaná napětí pak po úpravě můžeme psát ve tvaru

$$U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot B \cdot S_j, \text{ [V]} \quad (1.8)$$

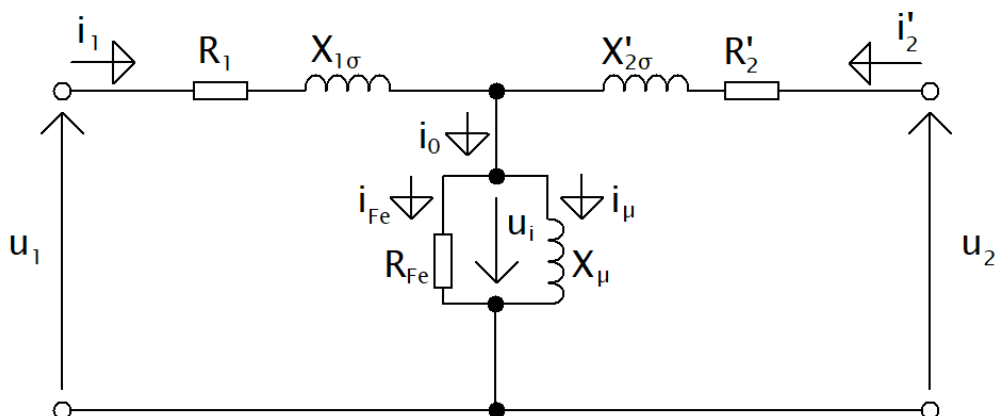
$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max}, \text{ [V]} \quad (1.9)$$

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_{max}, \text{ [V]} \quad (1.10)$$

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \Phi_{max}, \text{ [V]} \quad (1.11)$$

Kde konstanta 4,44 je dána užitím střední hodnoty napětí.

Náhradní schéma transformátoru je dle obr.(1.7) zapojeno jako T-článek. Zde je potřeba, aby se napětí U_{i1} rovnalo U_{i2} , což je popsáno dále v kapitole 1.1.3. Primární vinutí je napájeno harmonickým napětím u_1 a vinutím teče proud i_1 . Ve vinutí vznikají tepelné ztráty, které reprezentují odpory R_1 a R_2' . Reaktance $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}'$ vyjadřují rozptylové toky okolo vinutí.



Obrázek 1.7: Náhradní schéma transformátoru T-článek [3]

X_μ představuje ztráty magnetizační. Odpor R_{Fe} symbolizuje ztráty v železe. Pokud je k sekundárnímu vinutí připojena zátěž, protéká vinutím sekundární střídavý proud i_2 [1][5][6].

■ Přepočítání parametrů náhradního schématu

Protože transformátor nemá obvykle elektricky spojené primární a sekundární vinutí, ale v náhradním schématu jsou spojena, je třeba přepočítat sekundární veličiny na primární stranu [5][3]

Podmínky přepočtu:

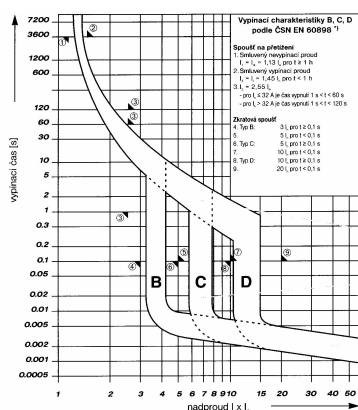
- Sekundární vinutí má $N'_2 = N_1$ závitů.
- Přepočítání neovlivní primární stranu.
- Nezmění se poměry vstupních a výstupních energetických veličin.
- Nezmění se úhly mezi fázory jednotlivých veličin.

Podmínky budou splněny v případě, že se zachová výsledný magnetický tok Φ_μ [3][5][6].

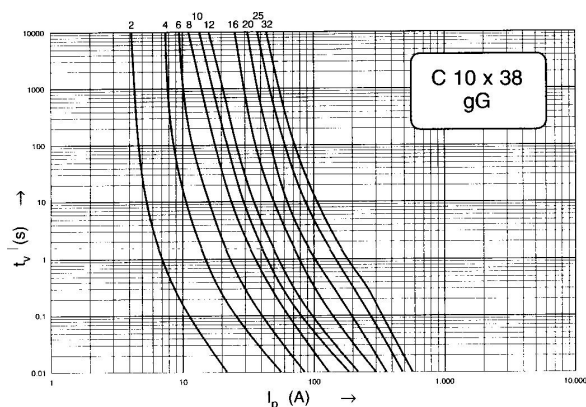
■ 1.2 Jističe

Jističe jsou prvky, které byly vyvinuty jako náhrada tavné pojistky. Pojistky jsou jednorázové a je potřeba je po vybavení vyměnit, zatímco jistič má vypínací děj opakovatelný. Jistič je složen ze spouště nadproudové a zkratové. Z konstrukce jističe jsou zřejmé jeho ampérsekundové charakteristiky uvedeny na obr.(1.8). Menší nadproudy jsou vypínány pomocí nadproudové části složené z bimetalové spouště. Zkratové proudy vypíná magnetická část, což je v podstatě cívka s jádrem. V momentě velkého nadproudu, který by bimetalová část vypínala velmi

dlouho, okamžitě vybaví zkratová část. Jističe mají obecně tři charakteristiky, a to B, C a D. Typ charakteristiky je odvíjen od spuštění zkratové části. Jističe typu D mají nejvyšší vybavovací proud (cca 10-20ti násobek jmenovitého proudu) [3][7].



Obrázek 1.8: Ampérsekundová charakteristika jističů jednotlivých typů [3]



Obrázek 1.9: Ampérsekundová charakteristika tavných pojistek na jmenovitý proud 2-32 A [3]

U dražších jističů jsme schopni nastavit celkovou charakteristiku jističe, tzn. nastavit tepelnou i zkratovou spoušť, a tím pádem jsme schopni jistit téměř libovolné elektrické obvody.

V minulém odstavci byly uvedeny hlavní výhody jističů. Nevýhodou jističe je obecně menší zkratová odolnost při porovnání se zkratovou odolností pojistky. Tento nedostatek je dnes odstraňován novými konstrukcemi jističů, ovšem i tak je třeba před jistič obvykle vložit ještě předřadnou pojistku. Zkratové proudy jsou u transformátoru většinou induktivního charakteru, takže při vypnutí vzniká oblouk, proto musí být jističe vybaveny účinným systémem pro zhášení elektrického oblouku. Pro střídavé proudy se používají kovové segmenty, které rozdělí elektrický oblouk na více krátkých oblouků, což má za důsledek snazší ochlazování a tím vytvoření příznivých podmínek pro uhašení elektrického oblouku [3][7].

Tavné pojistky jsou jednorázové elektrické přístroje, které mají za úkol chránit elektrický obvod před zkratem. Je to v podstatě uměle vytvořené nejslabší místo elektrické obvodu. Tavná pojistka v případě dlouho trvajícího zkratu či nadproudu přehoří a tím se přeruší elektrický obvod. Významnou vlastností tavných pojistek je schopnost vypínat i velké proudy. Na obrázku (1.9) je vyobrazena ampérsekundová charakteristika tavné pojistky typu gG [3][7].

Tavné pojistky se dělí do několika skupin dle normy IEC 60269. První písmeno kódování označuje, že se jedná o jištění proti nadproudu, tedy v případě písmena g jde o pojistku pro standardní jištění nadproudu, kde pojistka prohoří po jedné hodině v přetíženém stavu. Druhé písmeno označuje typ zařízení, které má být pojistkou chráněno. Jako příklad lze uvést písmena:

- G - pojistky pro obecné jištění kabelů atd.
- M - pojistky pro jištění motorů
- PV - pojistky pro jištění fotovoltaických článků
- Tr - pro jištění transformátorů

Tavné pojistky typu D mají obdobně jako jističe typu D zpomalenou spoušť, tudíž vydrží krátké proudové přetížení při přinutí zařízení (motor, transformátor, atd.) [3][7].

■ 1.2.1 Princip jištění

Princip jištění spočívá v odpojení obvodu od chráněného zařízení v momentě, kdy teče určitým chráněným obvodem proud větší, než přípustný. V této situaci je třeba zařízení odpojit od napájení, aby nedošlo k jeho poškození. Doba odpojení zařízení musí záviset na velikosti proudu v daném okamžiku, tedy čím větší je proud, tím kratší musí být doba vypnutí. Proto je třeba zvolit pro daný prvek správný jistič [7].

■ 1.2.2 Jištění strojních zařízení

Jištění strojů jako jsou motory a transformátory je problematické, jelikož zde dochází k velké proudové špičce při uvádění stroje do chodu. U motorů jde o záběrný proud, který dosahuje několikanásobku jmenovitého proudu. U transformátoru vzniká při připojení k napájení přechodový děj popsany v kapitole (2).

Obecně jištění primární strany transformátoru je problematické. Z obrázku (1.8) je patrné, že primární stranu transformátoru lze jistit pouze jističem typu D, který se používá také pro motory. Jistič typu D je schopen na krátký čas propustit až 20ti násobek jmenovitého proudu, což je běžná hodnota zapínacího proudu u transformátoru. Tedy pokud se správně nakonfigurují charakteristiky jističe typu D, jsme schopni celkem efektivně jistit transformátor i z primární strany.

Malé transformátory by se teoreticky daly jistit také tavnými pojistkami s vhodnou charakteristikou vypnutí.

■ 1.3 Vzorový měřený transformátor

Transformátor je koncepčně navržen tak, aby splňoval tato kritéria: Primární napětí $230\text{ V} \pm 5\%$, sekundární napětí $2 \times 12\text{ V}$; výkon 63 VA . Konstrukce musí umožnit vytvoření vzduchové mezery v jádru kvůli navrhovaným experimentům.

Podkapitola číslo 1.3 se zabývá konstrukčním návrhem transformátoru pro další účely této práce. Transformátor jsem spočítal, výsledky poté zkontroloval návrhovým programem firmy MDEXX, kde byly následně navinuty dvě cívky pro dva identické transformátory. Velikost transformátoru byla vybrána tak, aby bylo snadné s transformátory manipulovat a zároveň aby byly schopné napájet zdroje 24 V DC /cca $1,5\text{ A}$.

1.3.1 Základní parametry

Z řady transformátorových jader bylo zvoleno pro snadnou manipulaci jádro EI pro zdánlivý výkon 63 VA.

V tabulce 1.1 jsou uvedeny požadované parametry. Jmenovitě primární napětí U_1 , sekundární napětí U_2 , sekundární proud I_2 a jmenovitá indukce B_n . Průřez magnetického jádra S_j je hodnota z tabulek. Účinnost transformátoru byla předběžně odhadnuta a pro výpočet vzata z jiného transformátoru stejné katalogové skupiny.

| | |
|--------------------------|---------------|
| U_1 [V] | $230 \pm 5\%$ |
| U_2 [V] | 24 |
| I_2 [A] | 2,625 |
| B_n [T] | 1,45 |
| S_j [cm ²] | 8,4 |
| η [%] | 77,4 |

Tabulka 1.1: Vstupní hodnoty pro návrh transformátoru

Postup výpočtu transformátoru:

1. Vypočteme výkon P_2 na sekundární straně a příkon P_1 na primární straně.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 24 \cdot 2,625 = 63 \text{ [VA]} \quad (1.12)$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{63}{0,774} = 81,4 \text{ [VA]} \quad (1.13)$$

2. Výpočet počtu závitů na 1V.

$$\begin{aligned} \frac{U_i}{N} &= 4,44 \cdot f \cdot B \cdot N \cdot S = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,45 \cdot 8,4 \cdot 10^{-4} = \\ &= 0,277 \text{ [V/závit]} \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$0,277^{-1} = 3,745 \text{ [závitů/V]} \quad (1.15)$$

3. Výpočet počtu závitů pro primární a sekundární stranu.

$$\begin{aligned} 241,5 \text{ [V]} : \\ N_1 &= 3,745 \cdot 241,5 = 904 \text{ [závitů]} \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} 230,0 \text{ [V]} : \\ N_1 &= 3,745 \cdot 230 = 861 \text{ [závitů]} \end{aligned} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} 218,5 \text{ [V]} : \\ N_1 &= 3,745 \cdot 218,5 = 816 \text{ [závitů]} \end{aligned} \quad (1.18)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_2}{U_1} = \frac{861 \cdot 12}{230} = 45 \text{ [závitů]} \quad (1.19)$$

$$\text{korekce } 10\% = 50 \text{ [závitů]} \quad (1.20)$$

4. Výpočet jmenovitého primárního proudu:

$$241,5 \text{ [V]} : \\ I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{81,4}{241,5} = 0,337 \text{ [A]} \quad (1.21)$$

$$230,0 \text{ [V]} : \\ I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{81,4}{230} = 0,354 \text{ [A]} \quad (1.22)$$

$$218,5 \text{ [V]} : \\ I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{81,4}{218,5} = 0,373 \text{ [A]} \quad (1.23)$$

5. Stanovení průměru vodičů:

$$D_1 = 0,65 \cdot \sqrt{I_1} \doteq 0,4 \text{ [mm]} \quad (1.24)$$

$$D_2 = 0,65 \cdot \sqrt{I_2} \doteq 1 \text{ [mm]} \quad (1.25)$$

6. Kontrola výšky vinutí b (kontrola, zda se vinutí vejde do okénka).

$$c = 28,0 \text{ [cm]} \quad (1.26)$$

$$b_1 = \frac{N_1 \cdot D_1^2}{c} = \frac{904 \cdot 0,4^2}{28} = 5,17 \text{ [mm]} \quad (1.27)$$

$$b_2 = \frac{N_2 \cdot D_2^2}{c} = \frac{50 \cdot 1^2}{28} = 1,79 \text{ [mm]} \quad (1.28)$$

$$b_3 = \frac{N_2 \cdot D_2^2}{c} = \frac{50 \cdot 1^2}{28} = 1,79 \text{ [mm]} \quad (1.29)$$

$$b = 1,10 \cdot (b_1 + b_{izol} + b_2 + b_{izol} + b_3) = \\ = 1,10 \cdot (5,17 + 0,65 + 1,79 + 0,65 + 1,79) = \\ = 11,06 \text{ [mm]} \quad (1.30)$$

7. Výška okénka pro vinutí je dle výpočtu 11,06 mm, vinutí se vejde. Kvalita použitých transformátorových plechů: byly použity plechy M530 – 50A a M165 – 35A.

1.3.2 Ostatní parametry

V této části jsou spočítány odpory jednotlivých vinutí, impedance jednotlivých vinutí a ztráty v jednotlivých vinutích.

Primární vinutí

Nejprve se vypočte délka drátu, poté odpor vinutí, následně při známém odporu a proudu lze vypočítat Jouleovy ztráty ve vinutí, indukčnost a výslednou impedanci vinutí.

Střední délka vinutí je $l_{str} = 144$ mm, pak délka drátu

$$l = l_{str} \cdot N_1 = 130,4 \text{ [m]}. \quad (1.31)$$

Rezistivita mědi je $\rho = 0,0178 \cdot 10^{-6} \text{ [\Omega m]}$, pak odpor drátu při 20°C je

$$R_{20^\circ\text{C}} = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 130,4}{\pi \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2} = 18,47 \text{ [\Omega]}. \quad (1.32)$$

Vztah (1.32) lze použít pouze v ideálním případě, kdy se materiál neohřívá. V praktickém případě je potřeba uvážit změnu rezistivity mědi v závislosti na teplotě. Upravený vzorec pro výpočet odporu v závislosti na teplotě materiálu je

$$R_{^\circ\text{C}} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \cdot \frac{l}{S} \text{ [\Omega]} \quad (1.33)$$

$$R_{^\circ\text{C}} = 0,0178 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0068 \cdot 35) \cdot \frac{4 \cdot 130,4}{\pi \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2} = 22,86 \text{ [\Omega]} \quad (1.34)$$

Kde 0,0068 je teplotní koeficient odporu mědi a Δt je oteplení vinutí, které je odečteno z oteplovací charakteristiky uvedené na obr. (4.3).

Jouleovy ztráty se spočítají jako

$$P_J = R \cdot I^2 = 18,47 \cdot 0,337^2 = 2,09 \text{ [W]} \quad (1.35)$$

Při ohřevu vinutí se Jouleovy ztráty změní na:

$$P_{J^\circ\text{C}} = 22,86 \cdot 0,337^2 = 2,60 \text{ [W]} \quad (1.36)$$

Pro výpočet indukčnosti lze použít vztah pro cívku s jádrem o N závitech s daným průřezem jádra a danou střední délkou magnetického obvodu nebo jeho úseku:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot 10^{-9}}{\sum R_m} = \frac{4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot 10^{-9}}{\frac{l_j}{\mu \cdot S_j} + \frac{l_{vz}}{S_v}} \text{ [H; cm]} \quad (1.37)$$

kde R_m je reluktance jádra, která lze vyjádřit vztahem:

$$R_m = \frac{l_j}{\mu_0 \mu_r S_j} \text{ [\Omega]} \quad (1.38)$$

kde l_j je střední délka magnetického obvodu, $\mu_0 \cdot \mu_r$ je permeabilita a S_j je průřez jádra. U transformátorových plechů se relativní permeabilita pohybuje v širokém rozmezí od cca 300 do 10 000. Relativní permeabilitu je třeba si zvolit. Pro tento příklad zvolíme hodnotu 10 000. Vše je počítáno s 0,01 mm vzduchovou mezerou, proto jsem zvolil největší možnou hodnotu z daného rozsahu. Po dosazení dostaneme výsledný vztah:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 864^2 \cdot 10^{-9}}{\frac{18}{10000 \cdot 8,4} + \frac{0,05}{1,25 \cdot 8,4}} = 1,89 \text{ [H]} \quad (1.39)$$

Výsledná impedance je pak dána vztahem:

$$Z_{20^\circ\text{C}} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R_{20^\circ\text{C}}^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{18,47^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot 1,89^2} = 594 \text{ [\Omega]} \quad (1.40)$$

Impedance při zvýšeném odporu vinutí způsobeném ohřevem vinutí je dána vztahem:

$$Z_{\circ\text{C}} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R_{\circ\text{C}}^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{22,86^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot 1,89^2} = 594,2 \text{ [\Omega]} \quad (1.41)$$

■ Sekundární vinutí

Parametry obou sekundárních vinutí se spočítají principiálně stejně jako primární vinutí. Střední délka prvního sekundárního vinutí je $l_{str} = 164,8 \text{ mm}$. Celková délka vinutí je

$$l = 164,8 \cdot 50 = 8,24 \text{ [m]}. \quad (1.42)$$

Rezistivita pro počítání odporu vinutí je shodná s rezistivitou primárního vinutí. Odpor vinutí při 20°C je tedy číselně:

$$R_{20^\circ\text{C}} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 8,24}{\pi \cdot (10^{-3})^2} = 0,186 \text{ [\Omega]} \quad (1.43)$$

Pro reálný stav lze využít vzorce (1.33). Číselně je pak odpor roven:

$$R_{\circ\text{C}} = 0,0178 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0068 \cdot 35) \cdot \frac{4 \cdot 8,24}{\pi \cdot (10^{-3})^2} = 0,631 \text{ [\Omega]} \quad (1.44)$$

Jouleovy ztráty:

$$P_j = 0,186 \cdot 2,625^2 = 1,3 \text{ [W]} \quad (1.45)$$

Při ohřevu vinutí se Jouleovy ztráty změní na:

$$P_{J^\circ\text{C}} = 0,63 \cdot 2,625^2 = 4,34 \text{ [W]} \quad (1.46)$$

Indukčnost lze spočítat ze vztahu (1.37), po dosazení je výsledný vzorec:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 10^{-9}}{\frac{18}{10000 \cdot 8,4} + \frac{0,05}{1,25 \cdot 8,4}} = 6,3 \text{ [mH]} \quad (1.47)$$

Pak výsledná impedance je:

$$Z_{20^{\circ}C} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \quad (1.48)$$

$$= \sqrt{0,186^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3})^2} = 1,987 \text{ } [\Omega] \quad (1.49)$$

Impedance při ohřevu vinutí na maximální povolenou teplotu je:

$$Z_{^{\circ}C} = \sqrt{0,631^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3})^2} = 2,077 \text{ } [\Omega] \quad (1.50)$$

Druhé sekundární vinutí má střední délku vinutí $l_{str} = 180,5\text{mm}$. Celková délka vinutí je

$$l = 0,1805 \cdot 50 = 9,025 \text{ } [\text{m}]. \quad (1.51)$$

Rezistivita pro spočítání odporu vinutí je shodná s rezistivitou primárního vinutí. Odpor vinutí při 20°C je tedy číselně:

$$R_{20^{\circ}C} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 9,025}{\pi \cdot (10^{-3})^2} = 0,204 \text{ } [\Omega] \quad (1.52)$$

Odpor při ohřevu vinutí na maximální povolenou teplotu je:

$$R_{^{\circ}C} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,068 \cdot 35) \frac{4 \cdot 9,025}{\pi \cdot (10^{-3})^2} = 0,691 \text{ } [\Omega] \quad (1.53)$$

Jouleovy ztráty:

$$P_j = 0,204 \cdot 2,625^2 = 1,41 \text{ } [\text{W}] \quad (1.54)$$

Při ohřevu vinutí se Jouleovy ztráty změní na:

$$P_{J^{\circ}C} = 0,691 \cdot 2,625^2 = 4,76 \text{ } [\text{W}] \quad (1.55)$$

Indukčnost lze opět spočítat ze vztahu (1.37), po dosazení je výsledný vzorec:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 10^{-9}}{\frac{18}{10000 \cdot 8,4} + \frac{0,05}{1,25 \cdot 8,4}} = 6,3 \text{ } [\text{mH}] \quad (1.56)$$

Pak výsledná impedance při 20°C je:

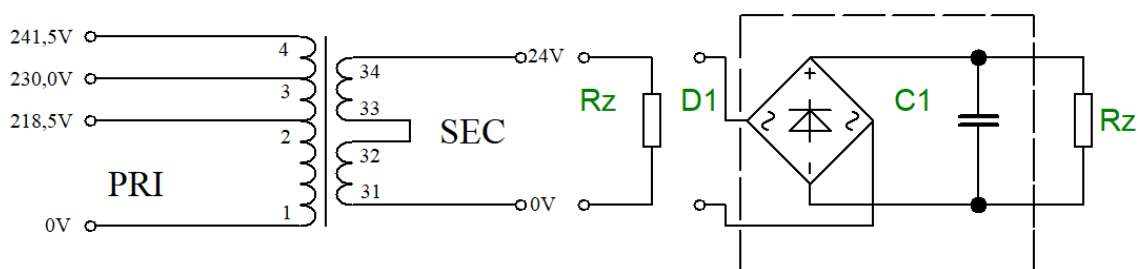
$$Z_{20^{\circ}C} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \quad (1.57)$$

$$= \sqrt{0,204^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3})^2} = 1,989 \text{ } [\Omega] \quad (1.58)$$

Výsledná impedance při ohřevu vinutí je:

$$Z_{^{\circ}C} = \sqrt{0,691^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3})^2} = 2,096 \text{ } [\Omega] \quad (1.59)$$

1.3.3 Schéma vzorového transformátoru



Obrázek 1.10: Schéma vzorového transformátoru s naznačenými možnostmi zátěží

Zvolený transformátor má na primární straně možnost volby tří napětí podle aktuální hodnoty sítě. Sekundární vinutí jsou dvě a to $2 \cdot 12$ V. Na obrázku (1.10) je vyobrazeno sériové zapojení sekundárních vinutí, aby výsledné výstupní napětí bylo 24 VAC.

■ 1.3.4 Odporová zátěž

Jmenovité zatížení sekundární strany transformátoru lze spočítat ze vztahu:

$$R_z = \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = \frac{24}{2,625} = 9,14 [\Omega] \quad (1.60)$$

Pokud bude transformátor zatížen jmenovitým odporem R_z , poteče sekundárním vinutím jmenovitý proud.

■ 1.3.5 Zdroj 24VDC jako zátěž transformátoru

■ Usměrňovače obecně

Usměrňovače jsou skupina elektrických zařízení užívaných k přeměně elektrických veličin střídavých na stejnosměrné. První selenový usměrňovač byl vyroben už okolo roku 1880. Poté byla na začátku minulého století objevena nelineární závislost elektrického oblouku ve rtuťových parách, což bylo považováno za veliký pokrok. Rtuťové usměrňovače byly pár let poté hojně využívány pro elektrické dráhy, které tímto zaznamenávaly veliký pokrok. V roce 1947 byly objeveny nelineární vlastnosti P-N přechodu prvků čtvrtého sloupce Mendělejevovy tabulky. Tyto prvky čtvrté skupiny se začaly hojně užívat ve slaboproudé elektronice. V druhé polovině dvacátého století se začal stále více využívat křemík. Postupně pak vznikly křemíkové výkonové diody a tyristory, vypínatelné tyristory, triaky a v devadesátých letech pak došlo k rychlému vývoji vypínatelných součástek GTO tyristorů a IGBT tranzistorů.[8]

Usměrňovače lze rozdělit:
-dle principu funkčnosti na:

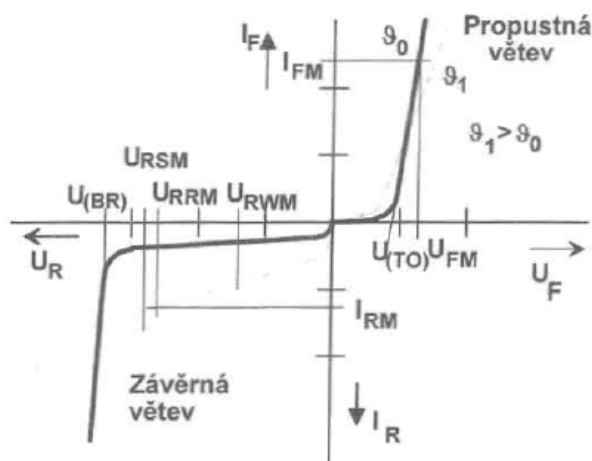
- neřízené usměrňovače (diodové),
- polořízené usměrňovače (tyristorové),
- plně říditelné usměrňovače (na bázi IGBT tranzistorů).

-dle způsobu připojení k napájecí síť:

- jednofázové (jednopulzní, dvoupulzní),
- třífázové (šestipulzní, dvanáctipulzní),
- vícefázové.

Diodové usměrňovače

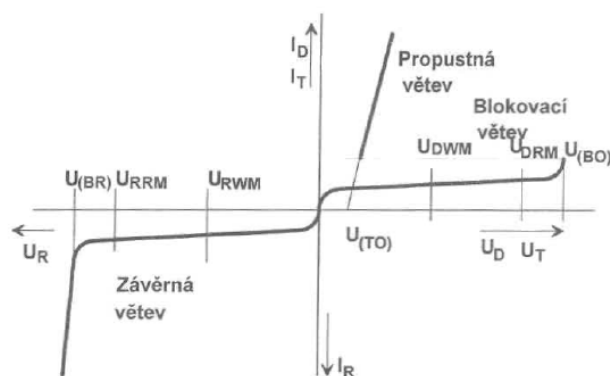
Dioda je neřiditelná součástka, která má pouze jeden PN přechod a její průmyslové využití je většinou na běžných síťových frekvencích, tzn. 50 a 60 Hz. Připojíme-li diodu v propustném směru, po překročení prahového napětí dojde k otevření proudové cesty a dioda začne propouštět proud. Říkáme, že dioda je ve vodivém stavu (v propustném směru). Maximální proud protéká diodou v momentě maximálního dovoleného napětí. Pokud tuto hodnotu překročíme, můžeme diodu zničit. Připojíme-li diodu v závěrném směru, dioda téměř nepropouští a říkáme, že je v nevodivém stavu (v závěrném směru). Pokud v závěrném směru překročíme hodnotu průrazného napětí, zničíme PN přechod a diodu prorazíme. Voltampérová charakteristika diody je vyobrazena na obr.(1.11) [8][9][10].



Obrázek 1.11: Voltampérová charakteristika diody [8].

Tyristory

Tyristor je polořiditelná součástka se třemi nebo více PN přechody a bistabilní regenerativní spínací charakteristikou. To znamená, že sepnutí (a ev. vypnutí) se provádí proudovým impulzem do řídicí části. Tyristory mají schopnost ovládat relativně velké výkony s tím, že k sepnutí je potřeba pouze relativně jednoduchý řídicí obvod. Mají největší výkonovou zatížitelnost při nejnižších ztrátách v sepnutém stavu ze všech součástek. Tyristor se skládá z anodového emitoru tvořeného vrstvami P* a P a z katodového emitoru - vrstva N⁺. Tyto vrstvy injektují nosiče do báze N a P při spínání a v sepnutém stavu. Dotovaná řídicí elektroda ve vrstvě N potřebuje průrazné napětí. Voltampérová charakteristika tyristoru je vyobrazena na obr.(1.12) [8][10].



Obrázek 1.12: Voltampérová charakteristika tyristoru [8].

1. Podmínky pro úspěšné zapnutí tyristoru:

- Na tyristor je přivedeno napětí v blokovacím směru,
- na řídicí elektrodu tyristoru je přiveden řídicí impuls,
- řídicí impuls je dostatečně velký a dostatečně dlouhý,
- strmost nárůstu proudu tyristorem nepřekročí kritickou hodnotu.

2. Podmínky pro úspěšné vypnutí tyristoru:

- Proud tyristorem musí klesnou k nule,
- na tyristor je přivedeno napětí v závěrném směru,
- napětí v závěrném směru je na tyristoru delší dobu, než je doba potřebná k vypnutí,
- strmost nárůstu blokovacího napětí nesmí překročit kritickou hodnotu.

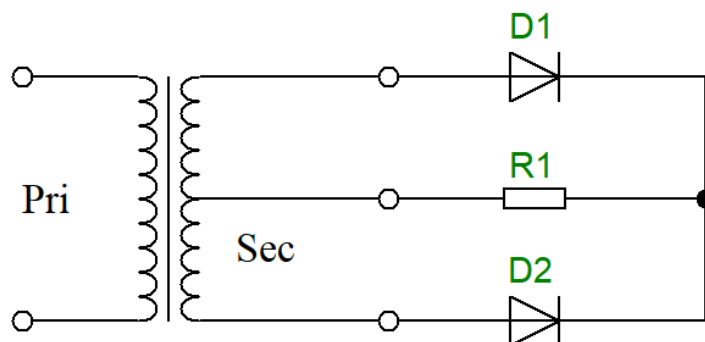
■ Dvoupulzní uzlový neřízený usměrňovač

Dvoupulzní uzlový usměrňovač (obrázek (1.13)) je složen ze dvou diod zapojených v propustném směru na společný uzel tak, aby obě propouštěly do uzlu. Diody jsou zapojeny na sekundární vinutí jednofázového transformátoru. Z uzlu je vyvedena zátěž, která je současně připojena na odbočku uprostřed sekundárního vinutí transformátoru. Díky tomuto zapojení je vždy jedna dioda v závěrném směru a jedna ve směru propustném. Oproti jednopulznímu neřízenému usměrňovači zde máme usměrněný průběh napětí se dvěma kladnými půlvlnami během každé periody, protože usměrňujeme i zápornou půlvlnu, zatímco v jednopulzním neřízeném usměrňovači byla záporná půlvlna potlačena [8][9]. Definujeme

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \text{ [V]}, \quad (1.61)$$

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \pi) \text{ [V]}, \quad (1.62)$$

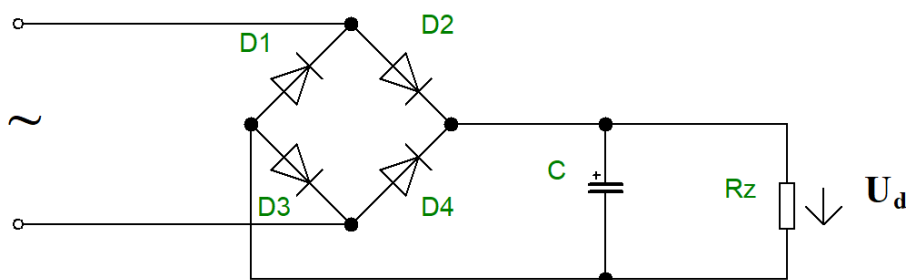
kde U je poloviční efektivní hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru.



Obrázek 1.13: Schéma jednofázového neřízeného dvoupulzního uzlového usměrňovače

■ Jednofázový můstkový usměrňovač

Jednofázový můstkový usměrňovač, neboli Graetzův můstek (obr.(1.14)), je upravené dvoucestné zapojení diod. Díky tomuto zapojení není třeba dvojitě symetrické sekundární vinutí transformátoru, jako tomu bylo u neřízeného dvoupulzního usměrňovače.



Obrázek 1.14: Zapojení jednofázového můstkového usměrňovače

Jeho použitím získáme dvoucestné usměrnění bez zvýšeného nároku na vinutí transformátoru. V případě, že chceme vyhladit průběh výstupního napětí, připojíme do obvodu paralelně k zátěži např. vhodný kondenzátor, nebo sériově k zátěži vhodnou cívku, popř. jejich vhodnou kombinaci.

■ Graetzův můstek s nárazovou kapacitou jako zátěž na sekundárním vinutí

V podkapitole (1.1.2) je popsána reakce magnetického toku primárního vinutí (Φ_{1h}) a magnetického toku sekundárního vinutí (Φ_{2h}). Magnetický tok je ve fázi s proudem protékajícím vinutím. Tím, že vinutí je induktivního charakteru, dochází k posuvu fázoru proudu o 90° oproti fázoru napětí. V momentě, kdy je na sekundární vinutí připojen obvod s kapacitním charakterem, což je situace s připojeným Graetzovým můstkem s nárazovou kapacitou, tak se v obvodu kompenzuje imaginární složka fázoru proudu a tím lze rovněž trochu snížit maximální amplitudu zapínacího proudu.

■ Kapacita filtračního kondenzátoru

Nárazovou kapacitou se rozumí filtrační kondenzátor přidaný za usměrňovací obvod. Grafické postupy pro výpočet filtračního kondenzátoru ukazoval již v 50. letech profesor Miroslav Pacák na univerzitě FEL ČVUT. Pro síťovou frekvenci 50 Hz jsou uváděny dva empirické vztahy, které počítají s 10% zvlněním při usměrňování proudu a to: Jednocestné usměrnění:

$$C = \frac{75000}{R_z} \text{ [F]} \quad (1.63)$$

Dvoucestné usměrnění:

$$C = \frac{25000}{R_z} \text{ [F]} \quad (1.64)$$

Tato metoda výpočtu je podrobně popsána v Amatérském rádiu 4/96 [11], kde ji popsal Jiří Litschmann.

Podrobnější metoda výpočtu je popsána v Amatérském rádiu A9/95 [12], kde nárazovou kapacitu lze vypočítat ze vzorce:

$$C \geq \frac{I \cdot \arccos\left(-\frac{U_{min}}{U_{max}}\right)}{2\pi \cdot f(U_{max} - U_{min})} \text{ [F]} \quad (1.65)$$

Jako třetí vzorec pro výpočet kapacity filtračního kondenzátoru lze uvést vzorec pana Ing. Pavla Hrziny, Ph.D., který popsal výpočet vhodné kapacity ve své disertační práci (str.37-39), který podrobněji popisuje výpočet v závislosti na typu zátěže [4].

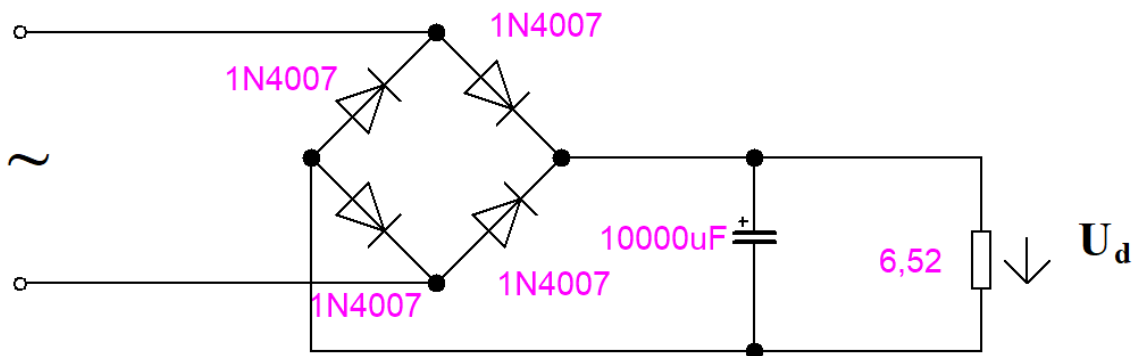
$$C = \frac{t_{vyb} \cdot I}{U_{max} - U_{min}} \text{ [F]} \quad (1.66)$$

kde t_{vyb} je doba vybíjení kondenzátoru:

$$t_{vyb} = \frac{T}{2} - t_{nab} \text{ [s]} \quad (1.67)$$

kde t_{nab} je doba nabíjení kondenzátoru:

$$t_{nab} = \frac{1}{4f} - \frac{\arcsin\left(\frac{U_{Cmin}}{U_{Cmax}}\right)}{2\pi f} \text{ [s]} \quad (1.68)$$

Schéma vybraného zapojení zdroje s můstkem, nárazovou kapacitou a zatěžovacím odporem zdroje**Obrázek 1.15:** Schéma vybraného usměrňovače s nárazovou kapacitou a zatěžovacím odporem

Vybraný zdroj se principiálně skládá z Graetzova můstku a nárazové kapacity. Schéma je vyobrazeno na obrázku (1.15). V praxi je na desce ještě přidána tavná pojistka na 7,5 A a ke kondenzátoru je do série s kondenzátorem ještě zapojena LED dioda s předřadným odporem pro světelnou indikaci nabitého kondenzátoru.

Kapitola 2

Možná řešení snížení zapínacích proudů

2.1 Přejchodový děj v transformátoru

Při připojení obvodu k napájení vzniká přechodový děj, čímž rozumíme děj probíhající mezi dvěma ustálenými stavy ve sledovaném obvodu. Na počátku přechodového děje jsou obvodové veličiny nulové a po jeho odeznění odpovídají hodnotám při ustáleném stavu [13][14].

Transformátor můžeme považovat za indukční obvod s uzavřeným magnetickým obvodem. Při přechodovém ději zde tedy dochází ke změně některých fyzikálních vlastností prvků v obvodu, zpravidla k prudkému krátkodobému nárůstu zapínacího proudu, kde hodnoty mohou dosáhnout až k mnohonásobku proudu v ustáleném stavu. Tímto se dostáváme k problematice jištění primární strany transformátoru, protože takto vysoký krátkodobý proud velmi komplikuje možnost jištění primáru transformátoru běžnými jističi a navíc zkracuje životnost součástek v obvodu [14].

2.1.1 Zapínací proud

Překmit hodnoty primárního proudu je při zapnutí ovlivněn saturací magnetického obvodu jádra transformátoru. Saturace je způsobena rozdílem magnetického indukčního toku v okamžiku připojení transformátoru a magnetického indukčního toku Φ , který by procházel jádrem v daném okamžiku v ustáleném provozním stavu. Při připojení transformátoru k napájení může dojít ke špičkovému nárůstu magnetického toku teoreticky až na trojnásobek jeho jmenovité hodnoty [13][14].

2.1.2 Metody výpočtu zapínacího proudu

Děj při připojování transformátoru k napájecímu zdroji je silně nelineární záležitostí. Model, na kterém je výpočet realizován, musí být tedy velmi detailní, aby správně reprezentoval nelineární chování průběhu magnetizace, ztrát a saturace jádra [13].

Velikost zapínacího proudu je významně ovlivněna impedancí primárního vinutí. Při zjednodušeném řešení můžeme zanedbat rozptylovou indukčnost a uvažovat pouze sériový odpor RL členu tvořeného odporem vinutí a hlavní indukčností transformátoru. Dále budeme pro začátek považovat odpor R a indukčnost L za konstanty. Pro toto zjednodušení pak můžeme napsat rovnici

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} = \sqrt{2} U_0 \sin(\omega t + \psi), \quad (2.1)$$

kde úhel ψ udává okamžik připnutí transformátoru k napájení. Počáteční podmínku úlohy nastavíme na $i(0) = 0$. Vyřešením diferenciální rovnice (1.6) dostaneme vyjádření proudu při přechodovém ději pro tento zjednodušený obvod:

$$i = \frac{\sqrt{2}U}{Z} [\sin(\omega t + \psi - \phi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \phi)] \quad (2.2)$$

Odtud vyplývá, že přechodový děj nenastane, pokud $\psi = \phi$ a největší bude v případě, kdy $\psi = \frac{\pi}{2} - \phi$ [5][14][15].

Je zřejmé, že ve skutečnosti není indukčnost u transformátoru konstantní, klesá při přesycení jádra, což se děje právě při přechodovém ději. Zavedeme si tedy funkci $L_1 = L_1(i)$. Tím se diferenciální rovnice (2.1) lehce zkomplikuje, protože zde nebudeme mít konstantní koeficienty. Zároveň nám tato funkce říká, že indukčnost musí sledovat průběh napětí, takže se tedy mění v čase. Celkový magnetický tok (Φ_{1h}) se uzavírá dvěma paralelními cestami a dělí se do dvou složek. První složka protéká magnetickým jádrem transformátoru a druhá složka vzduchovou mezerou mezi primárním vinutím a magnetickým jádrem. Platí tedy, že

$$\Phi_1 = \Phi_p + \Phi_j, \quad (2.3)$$

kde Φ_j je magnetický tok uzavírající se průřezem jádra S_j a Φ_p je magnetický tok uzavírající se plochou mezery mezi průměrným průřezem vinutí a vnějším průměrem jádra S_p .

Pro maximální magnetický tok pak platí:

$$\Phi_{max} = B_{jmax} \cdot S_j + B_{pmax} \cdot S_p, \quad (2.4)$$

kde B_{jmax} je maximální hodnota indukce v jádru a B_{pmax} je maximální hodnota indukce v průměrném průřezu vinutí.

Velikost B_{jmax} je ovlivněna saturační indukcí B_{sat} a maximální hodnotou intenzity magnetického pole H_{max} . Čím větší saturační indukce bude, tím větší bude i B_{jmax} . Velikost B_{pmax} je dána pouze maximální velikostí intenzity magnetického pole. Platí tedy:

$$B_{jmax} = B_{sat} \cdot \mu_0 \cdot H_{max}, \quad (2.5)$$

$$B_{pmax} = \mu_0 \cdot H_{max}. \quad (2.6)$$

Dosazením rovnic (2.5) a (2.6) do (2.4) dostaneme tvar

$$\Phi_{max} = B_{sat} \cdot S_j + \mu_0 \cdot H_{max} \cdot (S_j + S_p) = B_{sat} \cdot S_j + \mu_0 \cdot H_{max} \cdot S. \quad (2.7)$$

Z této rovnice lze potom určit H_{max} a poté odhadnout maximální špičkový zapínací proud.

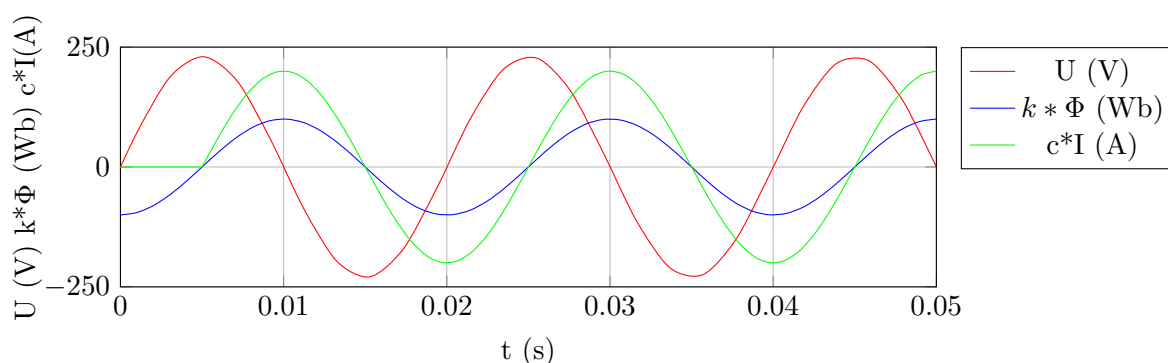
$$I_{max} = \frac{H_{max} \cdot l_s}{N_1} \quad (2.8)$$

Přesnost této metody závisí na odhadu délky siločáry l_s , na níž je H_{max} konstantní [5][14].

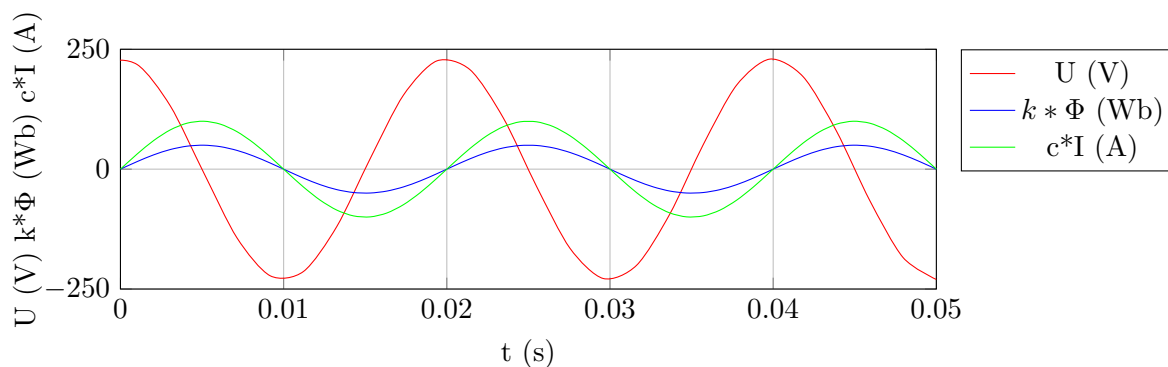
2.2 Metody pro omezení zapínacího proudu

2.2.1 Připnutí ve vhodné fázi

Z rovnice (2.2) lze vyčíst, že minimální zapínací proud bude v okamžiku průchodu napětí maximem, protože obvod je induktivního charakteru a proud tedy prochází nulou. Tím pádem zde utvoříme nulovou stejnosměrnou složku magnetického toku. Při této metodě se zachovávají parametry transformátoru, takže je ze všech metod nejúčinnější. Ovšem je potřeba k tomu mít speciální přístroje, které jsou schopny zajistit správné přifázování. Tato metoda se v praxi využívá jen zřídka, kvůli neekonomickému řešení v podobě nákupu těchto speciálních přístrojů [14].



Obrázek 2.1: Průběh indukčního toku a proudu v nejhorším stavu připnutí transformátoru bez přechodového děje



Obrázek 2.2: Průběh indukčního toku a proudu v nejlepší stavu připnutí transformátoru bez přechodového děje

Na obrázku (2.1) je vyobrazen průběh indukčního toku a proudu v nejhorším stavu připnutí transformátoru a na obrázku (2.2) je vyobrazen průběh indukčního toku a proudu v nejlepším stavu připnutí transformátoru. Velikost toku je rozšířena o konstantu k a velikost proudu o konstantu c , aby bylo možné zanechat napětí i tok do jedné škály grafu. Obrázky jsou nakresleny zjednodušeně pro znázornění situace při připnutí.

| Výhody | Nevýhody |
|--|-----------------------------|
| Podstatné snížení velikosti zap. impulsu | Nákup speciálního přístroje |

Tabulka 2.1: Tabulka výhod a nevýhod metody připnutí ve vhodné fázi

2.2.2 Snížení pracovní indukce

Metodou snížení pracovní indukce rozumíme zvýšení rezervy mezi maximálním tokem a saturací jádra, čímž se sníží maximální velikost zapínacího proudu. Tohoto lze docílit zvýšením počtu závitů primáru, nebo zvětšením průřezu jádra. Zvýšení počtu závitů primárního vinutí má za důsledek zvýšení impedance, čímž se zvyšují ztráty naprázdno a rostou materiálové náklady a klesají ztráty nakrátko, jež se snižují s pracovní indukcí.

| Výhody | Nevýhody |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Snížení velikosti zap. impulsu | Zvýšení impedance |
| - | Zvýšení ztrát naprázdno |
| - | Zvýšení ceny transformátoru |

Tabulka 2.2: Tabulka výhod a nevýhod metody snížení pracovní indukce

2.2.3 Metoda virtuální mezery

Při této metodě se navine pomocné vinutí na jádro, tím se vytvoří hluboce saturační část magnetického obvodu, což má za důsledek demagnetování jádra. Toto je velmi nepraktické, jelikož to vyžaduje přímý veliký zásah do konstrukce transformátoru, protože vinutí se vkládá přímo do jádra. Pomocným vinutím protéká stejnosměrný proud. Metodu virtuální mezery popsali Molcret a kol. v článku z roku 1998. Zapínací proud je touto metodou snížen až o 40 %, ale je to velmi technologicky náročné, takže v praxi téměř neuplatnitelné.[14][16]

| Výhody | Nevýhody |
|--|------------------------------------|
| Snížení velikosti zap. impulsu až téměř o polovinu | Zásah do konstrukce transformátoru |

Tabulka 2.3: Tabulka výhod a nevýhod metody virtuální mezery

2.2.4 Snížení remanentní indukce

Nenulová remanentní indukce B_r má za následek vznik stejnosměrné složky magnetického indukčního toku při přechodovém ději, která způsobí přesycení magnetického obvodu, tím se zvýší zapínací proud. Snížení remanentní indukce však nevede k úplnému odstranění špičky zapínacího proudu, pouze k jejímu snížení, protože remanentní indukce se rovná pouze 1/3 celkového toku. Teoreticky lze říci, že vliv remanentní indukce na velikost maxima zapínacího proudu nemůže překročit vliv úhlu připnutí k napájení. Tato metoda tedy není dost účinná z důvodu výše vypsanych. Vzhledem k tomu, že hodnotu maxima zapínacího proudu můžeme takto snížit jen o maximálně cca 30 %, tak nelze splnit normy pro jištění standardním jističem a v praxi je tuto metodu velmi obtížné použít [14].

Remanentní indukce B_r je ovlivněna konstrukcí magnetického obvodu, hlavně velikostí vzduchové mezery. Při výrobě lze velikost vzduchové mezery eliminovat střídavým skládáním EI plechů. Pokud je transformátor již vyroben a je třeba využít i tuto metodu, je nezbytné demagnetovat materiál přes externí obvod. Zde může nastat problém, protože v některých případech se nemusí podařit jádro demagnetovat úplně.

| Výhody | Nevýhody |
|--|--|
| Snížení velikosti zap. impulsu o cca 30% | Demagnetování jádra pomocí ext. obvodu |
| - | Zvýšení R_m při použití vzduchové mezery |

Tabulka 2.4: Tabulka výhod a nevýhod metody snížení remanentní indukce

2.2.5 Připnutí transformátoru v optimální fázi napájecího napětí

V podkapitole (2.2.1) je již zmíněna minimalizace zapínacího proudu pomocí připnutí transformátoru k napájení při průchodu napájecího napětí maximem. Tento postup je možno ještě vylepšit a teoreticky dokonce úplně potlačit přechodový děj. Toho lze docílit splněním podmínky připojení transformátoru k napájení v optimálním úhlu Φ tak, že

$$\cos(\Phi) = \frac{B_r}{B}. \quad (2.9)$$

Remanentní magnetická indukce B_r je u odpojeného transformátoru konstantní. Vytvoříme-li tedy sinusový průběh pracovní magnetické indukce B , bude splněna podmínka vycházející z rovnice (2.9) hned dvakrát. Bohužel tato metoda v praxi opět nenajde širší uplatnění, neboť změřit remanentní magnetickou indukci v jádře transformátoru není snadnou záležitostí, protože je potřeba měřit průběhy na primárních i sekundárních vinutích, s tím, že je potřeba vzít v úvahu rovněž parametry zátěže, jež nemusí být vždy známa [5][14].

V praxi je proto mnohem účinnější kombinovat dohromady více metod, které společně využívají podmínku (2.9) v kombinaci se snížením napětí, popřípadě zvýšením impedance primárního obvodu. V podstatě stačí vytvořit takový průběh napětí, aby se magnetický obvod při rozběhu zmagnetoval z jakéhokoliv předchozího stavu do stavu námi definovaného. Jako nejlepší stav hodnoty magnetické indukce se jeví počátek saturace. K tomuto účelu může například posloužit polovodičové relé [5][6][14].

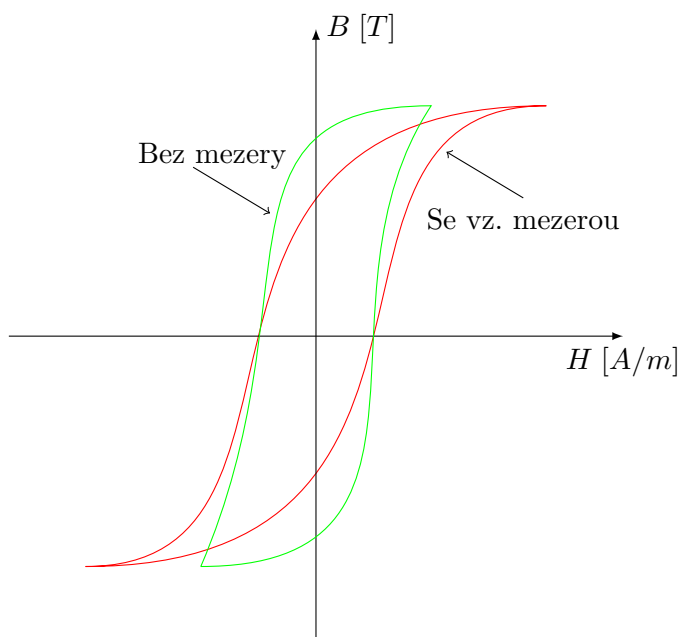
| Výhody | Nevýhody |
|--|--|
| Podstatné snížení velikosti zap. impulsu | Komplikované měření remanentní mg. indukce B_r |

Tabulka 2.5: Tabulka připnutí transformátoru v optimální fázi napájecího napětí

2.2.6 Změna reluktance magnetického obvodu vložení vzduchové mezery

Vložení vzduchové mezery do mg. obvodu transformátoru lze změnit jeho reluktanci R_m . Toho lze docílit např. vložení vzduchové tenké izolační vložky mezi svazek E a svazek I plechů jádra (složeného natupo). Zavedením vzduchové mezery vzroste reluktance mg. obvodu, což ovlivní hlavní mg. tok v jádru a dojde ke snížení hodnoty zapínacího proudu. Transformátor bude sice o trochu „měkčí“, což však v praktickém provozu tolik nevádí. Vložka může mít například tloušťku 0,5 mm i více. Vzduchová mezera má za následek změnu tvaru magnetizační křivky a to tak, že snižuje remanentní indukci při zachování indukce nasycení, přičemž celková plocha magnetizační smyčky zůstane stejná. Tato plocha vyjadřuje ztráty magnetického obvodu [5].

Tím, že transformátor bude vykazovat měkčí charakteristiku, tak se i pasivně docílí kompenzace účinníku a v zapojení s můstkem dojde k potlačování vyšších harmonických, dle principu pasivního PFC.



Obrázek 2.3: Vliv vzduchové mezery na tvar magnetizační smyčky [5]

| Výhody | Nevýhody |
|--|---------------------------------|
| Podstatné snížení velikosti zap. impulsu | Změna tvaru magnetizační křivky |
| Pasivní kompenzace účinníku | Zvýšení reluktance mg. obvodu |
| Zapojení s můstkem - pasivní PFC | Zvýšení ztrát |

Tabulka 2.6: Tabulka výhod a nevýhod metody změny reluktance mg.obvodu vložení vz. mezery

2.2.7 Vliv provedení svaru plechu

V sériové výrobě je efektivní způsob svazky plechů typu E a I k sobě svařit, protože tento úkon je časově méně náročný, než jednotlivé sety skládat a sešroubovávat. Svařením plechů se však opět zmenší vzduchová mezera, čímž se sice zmenší ztráty naprázdno, ale zmenší se částečně i reluktance magnetického obvodu a následně se zvýší zapínací proud. Svary proto musí být jen povrchové a velmi kvalitní [2].

| Výhody | Nevýhody |
|--------------------------|-------------------------------|
| Zrychlení sériové výroby | Zmenšení vzduchové mezery |
| - | Zmenšení relukange mg. obvodu |

Tabulka 2.7: Tabulka výhod a nevýhod svaření plechů

2.2.8 Polovodičové relé

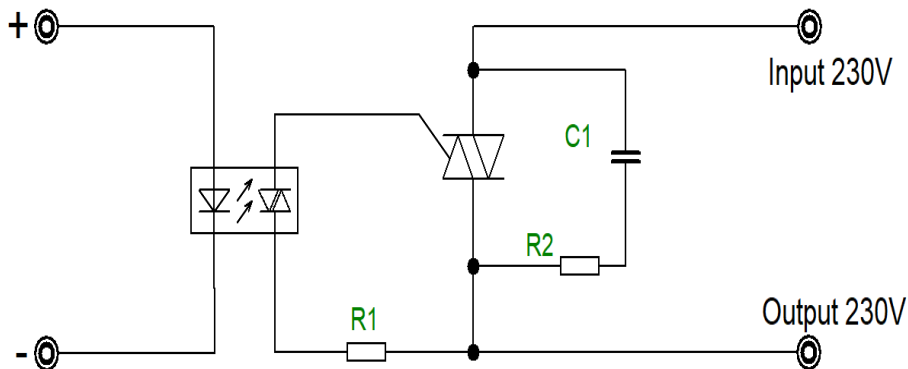
Polovodičové relé je elektrický prvek, u něhož silový obvod není spínán mechanickým kontaktem jako u klasického relé, nýbrž ke spínání zde dochází pomocí polovodičového prvku. Oproti klasickému relé má určité výhody, ale i nevýhody. Mezi hlavní výhody patří delší životnost, rychlejší spínání a zvýšená spolehlivost. Nevýhodou je zvýšený odpor v sepnutém stavu a o několik řádů nižší odpor v rozepnutém stavu. Díky polovodičovému relé lze však například definovat úhel sepnutí přívodu napájecího signálu k transformátoru. Tímto prvkem tedy dostáváme do ruky cenově celkem dostupný nástroj pro připínání transformátoru k napájení. Díky polovodičovému relé jsme schopni snížit velikost zapínacího proudu až o 70 % s tím, že nemůžeme zapínací proud odstranit úplně. Jednofázové polovodičové relé obvykle obsahuje dvě svorky spínaného obvodu a dvě ovládací svorky. Tento počet se může měnit v závislosti na počtu spínaných fází. Solid state relay (SSR) je tedy složeno z řídicího obvodu a ze spínacího obvodu, které jsou od sebe odděleny optočlenem [17].

Spínací obvod obsahuje triak, což je obousměrně triodový tyristor, který umožňuje sepnout v obou polaritách střídavého napětí. Struktura triaku jsou dva antiparalelně zapojené tyristory, které mají vyvedené řídicí elektrody na jeden výstup, tím pádem spínají oba najednou a lze docílit výše zmíněného sepnutí v obou polaritách [18].

Řídicí obvod je složen ze vstupního obvodu a z LED diody, která je součástí optočlenu. Optočlen se skládá z LED diody a fotopravku a slouží ke galvanickému oddělení řídicího a spínacího obvodu, kde rozdíl napětí může dosahovat až stovek voltů. Spínací obvod tedy

obvykle obsahuje fototranzistor nebo fototriak, dále pak výkonový triak, rezistor a tepelný člen. V momentě, kdy přivedeme spínací impuls na řídicí vstup, vyzáří LED dioda infračervené světlo, které sepne fotoprvek ve spínacím obvodu, ten se stane zdrojem pro sepnutí výkonového triaku, díky kterému proteče proud přes výstupní svorky. Velmi často se do spínacího obvodu také zařazuje ochranný RL, RC, nebo RLC kvůli tlumení přechodových jevů při různých druzích zátěží.

V praktické části této práce je polovodičové relé použito jako výstup k řídicímu obvodu, kterým je zapínán transformátor při otevírání předpokladu dle teoretické části (2.2.1). Principiální schéma polovodičového relé (SSR) je vyobrazeno na obr. (2.4).



Obrázek 2.4: Principiální schéma polovodičového relé (SSR)

| Výhody | Nevýhody |
|---|----------------------------------|
| Definované sepnutí - snížení amplitudy zap. impulsu | Zvýšený odpor relé spínané cesty |
| - | Zvýšení celkové ceny |
| - | Není galvanicky odděleno |

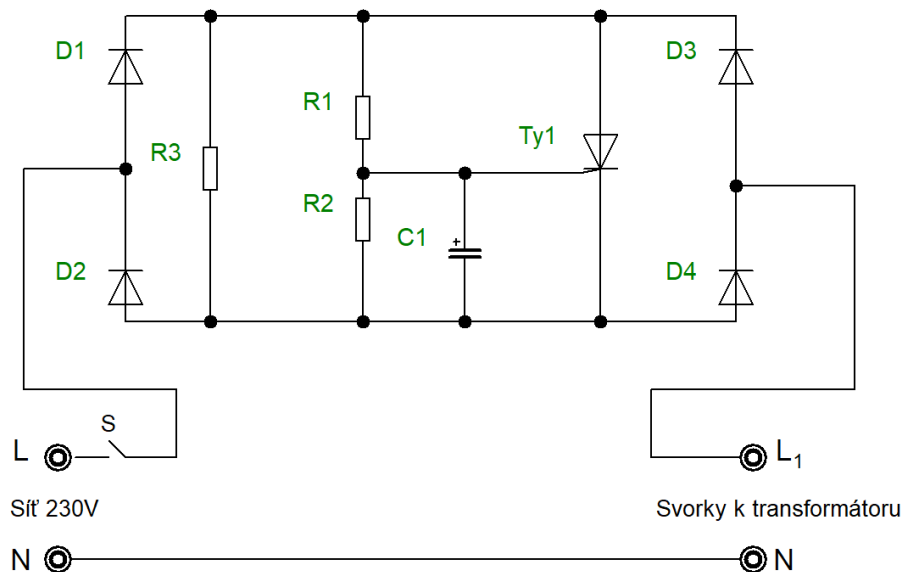
Tabulka 2.8: Tabulka výhod a nevýhod použití polovodičového relé

2.2.9 Vliv impedance primární strany na velikost zapínacího proudu

Z rovnice (2.2) je vidět, že velikost zapínacího proudu je nepřímo úměrná velikosti impedance primární strany transformátoru a vnitřní impedance sítě. Impedance primární strany transformátoru je dána konstrukcí, zatímco impedance sítě je dána vzdáleností od trafostanice, tedy čím menší je impedance sítě, tím je větší zapínací proud.

2.2.10 Zapojení s předřadníkem

Impedanční poměry při zapínání lze upravit u již vyrobených transformátorů také pomocí předřadníku, jehož schéma je vyobrazeno na obr.(2.5).



Obrázek 2.5: Schéma obvodu pro eliminaci zap. proudu předřadníkem

Předřadník je obecně obvod pro snížení zapínacího proudu u elektrického spotřebiče. Jako předřadník zde na přechodnou dobu slouží jen odpor R_3 . V okamžiku připnutí síťového napětí spínačem S ke svorkám L, N začíná téct proud v první půlvlně přes D_1 , R_3 a D_4 do spotřebiče. Tyristor je napájen mezi elektrodami A-K z úbytku napětí na R_3 . Gate pro otevření tyristoru je napájen z napěťového děliče R_1 a R_2 . Celý děj je zpožděn vlivem nabíjení kondenzátoru C_1 . Jakmile je kondenzátor dostatečně nabit, sepne tyristor TY_1 , který přemostí předřadník a spotřebič dále pracuje na plný výkon.

Pokud tuto teorii použijeme pro připnutí transformátoru, tak ze začátku je na primární vinutí přiveden pouze omezený výkon. V momentě, kdy se dostatečně nabije kondenzátor, který otevře tyristor, dojde k přivedení plného výkonu na primární vinutí připojeného transformátoru. Tím, že je transformátor připojen, ale maximální výkon, který omezuje předřadník, je z části utlumen, tak dochází k postupnému předmagnetování jádra, čímž při následném sepnutí tyristoru a připnutí transformátoru na plný výkon síť nedojde k proudové špičce. Tento obvod tedy nabízí zajímavé řešení pro jištění malých transformátorů, jelikož díky odstranění proudové špičky jsme schopni jistit také primární stranu transformátoru.

Metoda je v praxi vhodným řešením především pro použití s toroidními transformátory, u kterých nelze provádět jednoduše konstrukční úpravy vzduchové mezery v jádře. Metoda má ovšem nevýhody, a to pořizování dalších součástek k transformátoru a tedy i navýšení ceny, což začne hrát významnou roli při větších výkonech.

2.2.11 Zdroj pro spínání v optimálním bodu síťového napětí

V podkapitole (2.2.5) je zmíněno snížení velikosti amplitudy zapínacího proudu sepnutím v napěťovém maximu. Toto může být realizováno několika způsoby, například vhodným spínacím obvodem. V podstatě stačí vytvořit spínací obvod dimenzovaný na parametry transformátoru a pomocí něj transformátor spínat. Jedno z mnoha možných řešení takového zdroje je v

příloze (B). Výhodou tohoto zdroje je, že jsme schopni pomocí programu nastavit jakýkoliv úhel sepnutí, tudíž jediné, co je potřeba řešit u spínání určitých typů zátěží, je kód řídicího mikroprocesoru. Toto se jeví jako velká výhoda této metody. Naopak jako nevýhodu lze uvést nutnost pořízení takového zdroje a potřebu jeho obsluhy při provozu transformátoru.

2.3 Shrnutí metod pro omezení zapínacího proudu

Metoda připnutí ve vhodné fázi (2.2.1) nabízí celkem zajímavou možnost omezení zapínacího impulsu. Je ze všech metod nejúčinnější, avšak k použití této metody je potřeba pořízení speciálního přístroje, což zvyšuje celkovou cenu transformátoru.

Metoda snížení pracovní indukce (2.2.2) je pro praxi nepoužitelná, protože je třeba pokaždé vypočítat o kolik je nutné zvýšit počet závitů na primárním vinutí, což zvyšuje časovou náročnost návrhu transformátoru. Současně rostou materiálové náklady, což se projeví na celkové ceně transformátoru.

Metoda virtuální mezery (2.2.3) je v praxi také nepoužitelná, protože vyžaduje přímý zásah do konstrukce transformátoru, což znatelně zvedne celkovou cenu a náročnost konstrukce. Postup nemá veliký vliv na snížení amplitudy zapínacího proudu, takže není výhodné tuto metodu použít.

Metoda snížení remanentní indukce (2.2.4) se v praxi přímo uplatňuje v kombinaci s metodou (2.2.6), v případě složení trafoplechů natupo. V případě složení magnetického obvodu střídavě je metoda nevýhodná, kvůli nutnosti použití speciálního přístroje pro demagnetování materiálu, což zvyšuje celkové náklady a výsledek není vždy zaručen.

Metodu připnutí transformátoru v optimální fázi napájecího napětí (2.2.5) lze použít v kombinaci se snížením napětí, popřípadě zvýšením impedance primárního vinutí. Pro použití této metody je třeba řídicího obvodu, který je schopen transformátor připnout v optimální fázi. To opět zvyšuje celkové náklady.

Jako nejvýhodnější řešení pro praxi se jeví možnost drobné úpravy provedení konstrukce jádra při výrobě transformátoru. Změny reluktance magnetického obvodu lze dosáhnout vytvořením definované vzduchové mezery při skládání trafoplechů magnetického obvodu natupo a poté následně obě části spojit kvalitním svarem. Pro ještě efektivnější snížení maximální amplitudy zapínacího impulsu by bylo vhodné zařadit před transformátor spínaný obvod, který je schopen sepnout v optimálním bodu napájecího napětí.

Složení trafoplechů natupo s definovanou vzduchovou mezerou sice dojde k razantnímu snížení maximální amplitudy zapínacího impulsu, avšak současně se zvýší ztráty naprázdno a „změkčí“ se transformátor, což může být v některých aplikacích nežádoucí.

V kapitole (4) je provedena optimalizace praktické analýzy kombinace změny reluktance magnetického obvodu pomocí různě velké vzduchové mezery a připnutí transformátoru při různé fázi napájecího napětí.

Kapitola 3

Vliv zátěže transformátoru na velikost zapínacího proudu

3.1 Stav nakrátko

Transformátor se může při připojení primárního vinutí k napájení nacházet ve třech stavech a to ve stavu naprázdno, nakrátko a se zatíženým sekundárním vinutím. Stav nakrátko (udává se obvykle jako napětí U_k [V], nebo u_k [%]) se zjišťuje z důvodu stanovení vnitřní impedance transformátoru, především pak při nutnosti spojování transformátorů paralelně.

Napětí U_k se obvykle zjišťuje při zkratovaných svorkách sekundárního vinutí tak, že se postupně na primárních svorkách zvyšuje napětí od 0 V do jmenovité hodnoty primárního proudu. Přitom se odečte hodnota u_k [V]. Tento způsob zjišťování u_k je nejčastější.

V praxi se zkrat na sekundárním vinutí ovšem dlouhodobě vyskytovat nesmí, proto jsou transformátory jištěny vhodným jističem, které je odpojí včas od sítě.

Z hlediska zapínacího impulsu jsou důležité především stavy naprázdno a se jmenovitým zatížením sekundárního vinutí. Tyto stavy budou rozebrány v této kapitole.

3.2 Stav naprázdno

Stavem naprázdno se rozumí u transformátoru stav, kdy je na primární svorky připojeno jmenovité napětí a sekundární svorky jsou rozpojeny. Vyjdeme z obrázku (1.7), kde je nakresleno náhradní schéma transformátoru. Ve stavu naprázdno je tedy rozpojeno sekundární vinutí. Tím pádem veškerý potřebný odebíraný výkon se přenáší pouze do magnetického obvodu, neboli proud primárním vinutím je při zanedbání odporu a impedance primárního vinutí roven magnetizačnímu proudu a říká se mu proud naprázdno. Proud naprázdno je asi 5 – 10 % jmenovitého proudu pro transformátory větších výkonů. Pro transformátory malých výkonů velikostně cca jako vzorový transformátor je proud naprázdno větší, typicky dosahuje až 40 % jmenovitého proudu.

V momentě připojení transformátoru ve stavu naprázdno ke zdroji dojde k přechodovému ději popsanému v kapitole (2.1.1). Z pohledu zdroje (např. sítě) vypadá transformátor pouze jako zátěž indukčního charakteru. Fázor proudu je tedy zpožděn o téměř 90° za fázorem napětí. Z hlediska velikosti zapínacího impulsu lze říct, že velikost tohoto impulsu je omezena pouze

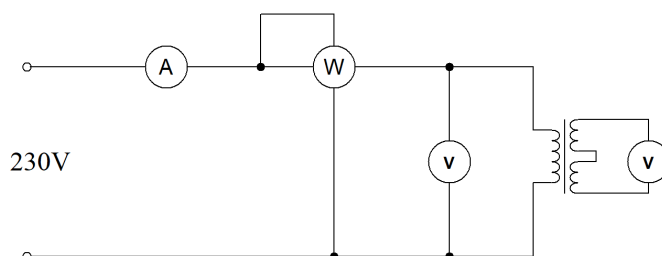
Kapitola 4

Praktická část

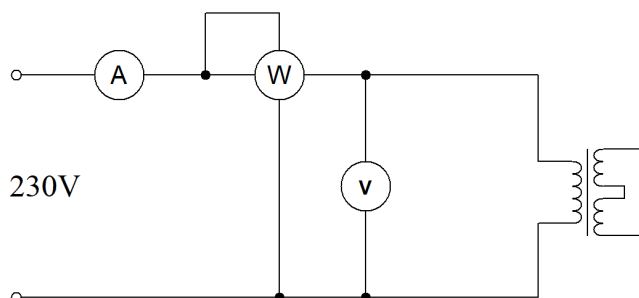
Měření byla provedena dvě a to ve firmě Mdexx a na Fakultě elektrotechnické z důvodů porovnání vlivu použití různých měřících přístrojů a impedance sítě, protože Fakulta elektrotechnická je velmi blízko trafostanice, tudíž je zde impedance velmi malá. Firma Mdexx je naopak od trafostanice vzdálena několik set metrů. V tabulkách (4.5) a (4.6) jsou uvedeny maximální naměřené hodnoty, protože v měření šlo o nalezení toho nejhoršího stavu sepnutí a tedy největší možné amplitudy zapínacího impulsu.

4.1 Měření vzorového transformátoru 63 VA

V této podkapitole jsou sepsány naměřené hodnoty na vzorovém transformátoru. V tabulce (4.1) jsou zapsány hodnoty měření naprázdno a v tabulce (4.2) jsou zapsány hodnoty měření nakrátko. Na obrázku (4.3) je vykreslen průběh oteplovací charakteristiky.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení pro měření naprázdno



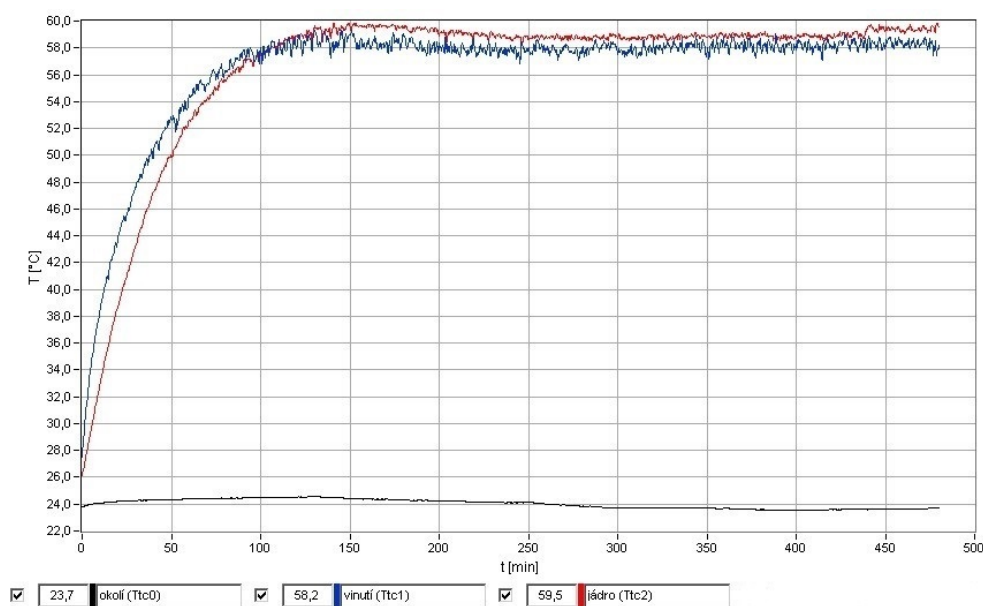
Obrázek 4.2: Schéma zapojení pro měření nakrátko

| Veličina | Primární vinutí | Sekundár vinutí 1 | Sekundární vinutí 2 |
|----------|-----------------|-------------------|---------------------|
| U [V] | 230,1 | 13,339 | 13,348 |
| I [A] | 0,148 | 0 | 0 |
| P [W] | 2,93 | 0 | 0 |
| S [VA] | 34,03 | 0 | 0 |

Tabulka 4.1: Měření naprázdno

| Veličina | Primární vinutí | Sekundární vinutí 1 | Sekundární vinutí 2 |
|----------|-----------------|---------------------|---------------------|
| U [V] | 14,51 | 0 | 0 |
| I [A] | 0,306 | 2,64 | 2,63 |
| P [W] | 4,41 | 0 | 0 |
| S [VA] | 4,44 | 0 | 0 |

Tabulka 4.2: Měření nakrátko



Obrázek 4.3: Oteplovací charakteristika vzorového transformátoru

4.2 Měření zapínacího proudu transformátoru 63 VA

V následujících tabulkách (4.5) a (4.6) jsou zapsány maximální hodnoty amplitudy zapínacího impulsu. Pro daný úhel sepnutí a danou sestavu bylo provedeno vždy 10 měření. v tabulce (4.7) je uveden rozptyl jednotlivých měření.

4.2.1 Použité přístroje

Mdexx

Pro měření ve firmě Mdexx byly použity následující přístroje:

| | |
|----------------|--------------------|
| Osciloskop | Lecroy Wave Surfer |
| Napěťová sonda | Lecroy ADP305 |
| Proudová sonda | Fluke i400s |

Tabulka 4.3: Tabulka použitých přístrojů pro měření - Mdexx



Obrázek 4.4: Osciloskop



Obrázek 4.5: Napěťová sonda



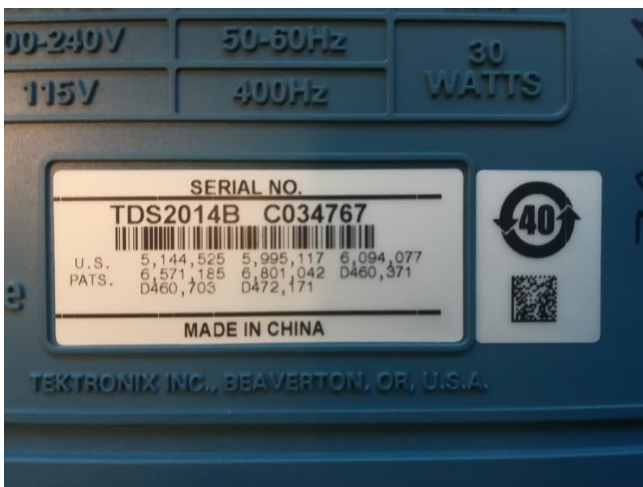
Obrázek 4.6: Proudové kleště

FEL

Pro měření na Fakultě elektrotechnické byly použity následující přístroje:

| | |
|----------------|-----------|
| Osciloskop | Tektronix |
| Proudová sonda | E3N |
| Napěťová sonda | Tectra |

Tabulka 4.4: Tabulka použitých přístrojů pro měření - FEL



Obrázek 4.7: Štítek osciloskopu



Obrázek 4.8: Štítek napěťové sondy



Obrázek 4.9: Štítek proudové sondy

| Maximální amplituda impulsu [A] | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------------------------|
| Kvalita tr.plechů | Úhel[°] | Mdexx | | | FEL | | | Zátěž sekundáru |
| | | Vzduchová mezera [mm] | | | Vzduchová mezera [mm] | | | |
| | | 0 | 0,05 | 0,1 | 0 | 0,05 | 0,1 | |
| 530-50 | 0 | 13,04 | 8,12 | 7,38 | 15,00 | 11,20 | 11,00 | Naprázdno |
| | 30 | 12,71 | 7,60 | 6,92 | 15,00 | 11,20 | 11,0 | |
| | 60 | 10,08 | 3,58 | 2,89 | 13,50 | 5,80 | 5,60 | |
| | 90 | 6,83 | 0,96 | 0,86 | 5,10 | 0,60 | 0,80 | |
| 165-35 | 0 | 11,82 | 9,30 | 8,66 | 14,20 | 11,60 | 11,60 | |
| | 30 | 11,58 | 8,89 | 8,25 | 13,80 | 11,20 | 11,00 | |
| | 60 | 8,16 | 4,91 | 4,79 | 10,00 | 6,40 | 6,40 | |
| | 90 | 3,13 | 0,85 | 0,70 | 4,90 | 0,60 | 0,80 | |
| 530-50 | 0 | 9,60 | 3,88 | 3,72 | 9,60 | 6,80 | 6,80 | Usměrňovač + R_{jm} |
| | 30 | 8,88 | 4,03 | 3,80 | 9,10 | 6,00 | 5,60 | |
| | 60 | 5,42 | 4,96 | 4,75 | 5,40 | 5,00 | 5,20 | |
| | 90 | 4,99 | 5,12 | 4,92 | 5,50 | 5,20 | 5,40 | |
| 165-35 | 0 | 6,95 | 5,02 | 5,13 | 10,00 | 10,00 | 7,40 | |
| | 30 | 6,67 | 4,36 | 3,80 | 9,40 | 9,90 | 6,80 | |
| | 60 | 4,55 | 4,73 | 4,75 | 5,40 | 5,20 | 5,20 | |
| | 90 | 4,75 | 4,84 | 4,97 | 5,50 | 5,20 | 5,40 | |
| 530-50 | 0 | 12,06 | 6,85 | 7,17 | 14,00 | 10,60 | 10,80 | $R_{jm}(9,18\Omega)$ |
| | 30 | 11,79 | 6,50 | 6,75 | 13,90 | 10,20 | 10,20 | |
| | 60 | 9,27 | 2,54 | 2,43 | 12,90 | 5,00 | 5,00 | |
| | 90 | 6,17 | 0,709 | 0,718 | 4,90 | 0,80 | 1,00 | |
| 165-35 | 0 | 11,51 | 8,85 | 9,13 | 13,30 | 11,20 | 11,20 | |
| | 30 | 11,17 | 8,46 | 8,75 | 12,90 | 10,60 | 10,60 | |
| | 60 | 8,39 | 4,51 | 4,45 | 8,70 | 6,20 | 5,60 | |
| | 90 | 4,90 | 0,802 | 0,976 | 3,65 | 0,80 | 1,00 | |

Tabulka 4.5: Tabulka maximálních zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž

| Maximální poměrná amplituda impulsu $[I/I_N]$ | | | | | | | | |
|---|----------------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------------------------|
| Kvalita tr.plechů | Úhel $[\circ]$ | Mdexx | | | FEL | | | Zátěž sekundáru |
| | | Vzduchová mezera [mm] | | | Vzduchová mezera [mm] | | | |
| | | 0 | 0,05 | 0,1 | 0 | 0,05 | 0,1 | |
| 530-50 | 0 | 36,22 | 22,56 | 20,50 | 41,67 | 31,11 | 30,56 | Naprázdno |
| | 30 | 35,31 | 21,11 | 19,22 | 41,67 | 30,00 | 28,89 | |
| | 60 | 28,00 | 9,94 | 8,03 | 37,50 | 16,11 | 15,56 | |
| | 90 | 18,97 | 2,66 | 2,40 | 14,17 | 1,67 | 2,22 | |
| 165-35 | 0 | 32,83 | 25,83 | 24,06 | 39,44 | 32,22 | 32,22 | |
| | 30 | 32,17 | 24,69 | 22,92 | 38,33 | 31,11 | 30,56 | |
| | 60 | 22,67 | 13,64 | 13,31 | 27,78 | 17,78 | 17,78 | |
| | 90 | 8,69 | 2,37 | 1,95 | 13,61 | 1,67 | 2,22 | |
| 530-50 | 0 | 26,67 | 10,78 | 10,33 | 26,67 | 18,89 | 18,89 | Usměrňovač + R_{jm} |
| | 30 | 24,67 | 11,19 | 10,56 | 25,28 | 16,67 | 15,56 | |
| | 60 | 15,06 | 13,78 | 13,19 | 15,00 | 13,89 | 14,44 | |
| | 90 | 13,86 | 14,22 | 13,67 | 15,28 | 14,44 | 15,00 | |
| 165-35 | 0 | 19,31 | 13,94 | 14,25 | 27,78 | 27,78 | 20,56 | |
| | 30 | 18,53 | 12,11 | 10,56 | 26,11 | 27,50 | 18,89 | |
| | 60 | 12,64 | 13,14 | 13,19 | 15,00 | 14,44 | 14,44 | |
| | 90 | 13,19 | 13,44 | 13,81 | 15,28 | 14,44 | 15,00 | |
| 530-50 | 0 | 33,50 | 19,03 | 19,92 | 38,89 | 29,44 | 30,00 | $R_{jm}(9,18\Omega)$ |
| | 30 | 32,75 | 18,06 | 18,75 | 38,61 | 28,33 | 28,33 | |
| | 60 | 25,75 | 7,06 | 6,75 | 35,83 | 13,89 | 13,89 | |
| | 90 | 17,14 | 1,97 | 1,99 | 13,61 | 2,22 | 2,78 | |
| 165-35 | 0 | 31,97 | 24,58 | 25,36 | 36,94 | 31,11 | 31,11 | |
| | 30 | 31,03 | 23,50 | 24,31 | 35,83 | 29,44 | 29,44 | |
| | 60 | 23,31 | 12,53 | 12,36 | 24,17 | 17,22 | 15,56 | |
| | 90 | 13,61 | 2,23 | 2,71 | 10,14 | 2,22 | 2,78 | |

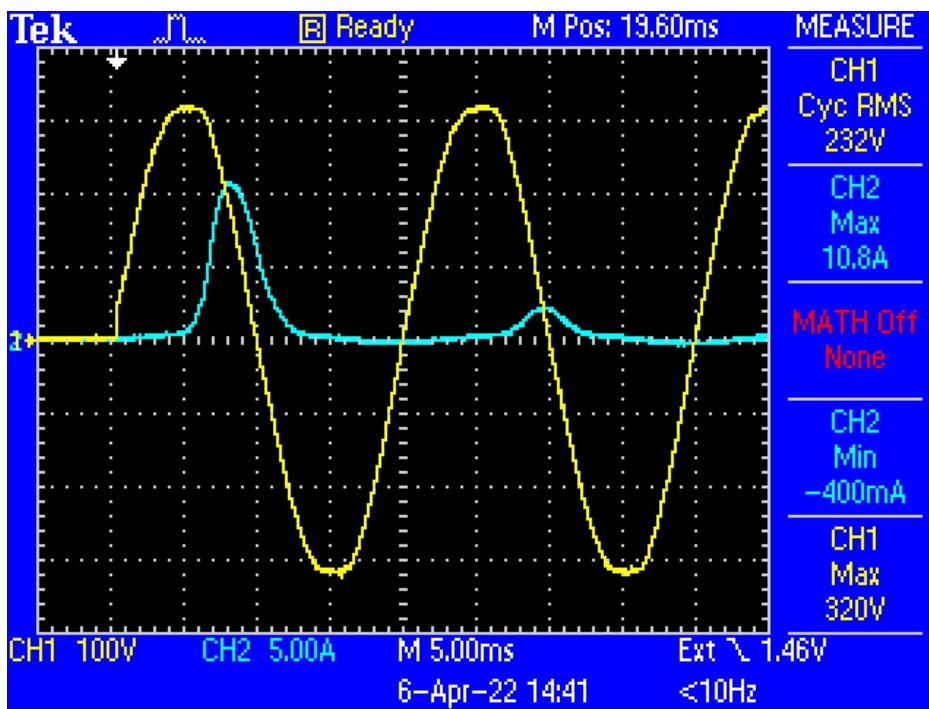
Tabulka 4.6: Tabulka maximálních poměrných zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž vztažených vzhledem k I_N

| Rozptyl naměřených hodnot maximální amplitudy impulsu [A] | | | | | | | | |
|---|---------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|--------------------------|
| Kvalita tr.plechů | Úhel[°] | Mdexx | | | FEL | | | Zátěž sekundáru |
| | | Vzduchová mezera [mm] | | | Vzduchová mezera [mm] | | | |
| | | 0 | 0,05 | 0,1 | 0 | 0,05 | 0,1 | |
| 530-50 | 0 | 0,0009 | 0,0854 | 0,0270 | 1,6416 | 0,2384 | 0,0096 | Naprázdno |
| | 30 | 0,0185 | 0,304 | 0,0810 | 0,1184 | 0,0480 | 0,0544 | |
| | 60 | 0,0027 | 0,0271 | 0,0968 | 0,0680 | 0,0416 | 0,2560 | |
| | 90 | 0,0426 | 0,0027 | 0,01 | 0,0176 | 0,013 | 0,064 | |
| 165-35 | 0 | 0,0003 | 0,0037 | 0,0057 | 0,1864 | 0,0480 | 0,0480 | |
| | 30 | 0,0149 | 0,0453 | 0,0162 | 0,0104 | 0,0256 | 0,0544 | |
| | 60 | 0,0123 | 0,0168 | 0,0239 | 0,0327 | 0,1856 | 0,2016 | |
| | 90 | 0,0098 | 0,0002 | 0,0006 | 0,0176 | 0,0016 | 0,032 | |
| 530-50 | 0 | 0,0016 | 0,0014 | 0,0054 | 0,0024 | 0,0064 | 0,0864 | Usměrňovač + R_{jm} |
| | 30 | 0,0011 | 0,0019 | 0,0043 | 0,0040 | 0,0544 | 0,0544 | |
| | 60 | 0,0030 | 0,0020 | 0,0023 | 0,0224 | 0,0178 | 0,0096 | |
| | 90 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0005 | 0,0136 | 0,0064 | 0,0096 | |
| 165-35 | 0 | 0,0023 | 0,0024 | 0,0317 | 0,150 | 1,0976 | 0,0256 | |
| | 30 | 0,0031 | 0,0179 | 0,0601 | 0,184 | 0,102 | 0,0864 | |
| | 60 | 0,0019 | 0,0038 | 0,0027 | 0,0096 | 0,0096 | 0,0096 | |
| | 90 | 0,0018 | 0,0007 | 0,0013 | 0,0224 | 0,0064 | 0,0096 | |
| 530-50 | 0,005 | 0,0052 | 0,0092 | 1,535 | 0,1600 | 0,3040 | 0,2464 | $R_{jm}(9,18\Omega)$ |
| | 30 | 0,0081 | 0,0574 | 0,0229 | 0,0024 | 0,0256 | 0,0416 | |
| | 60 | 0,0385 | 0,0198 | 0,0396 | 0,0824 | 0,2144 | 0,608 | |
| | 90 | 0,0612 | 0,0002 | 0,003 | 0,0016 | 0,0054 | 0,0064 | |
| 165-35 | 0 | 0,0048 | 0,0226 | 0,0416 | 0,0136 | 0,055 | 0,102 | |
| | 30 | 0,011 | 0,013 | 0,036 | 0,026 | 0,022 | 0,026 | |
| | 60 | 0,0572 | 1,518 | 0,051 | 0,0824 | 0,182 | 0,07 | |
| | 90 | 0,0263 | 0,0008 | 0,0033 | 0,058 | 0,0010 | 0,0064 | |

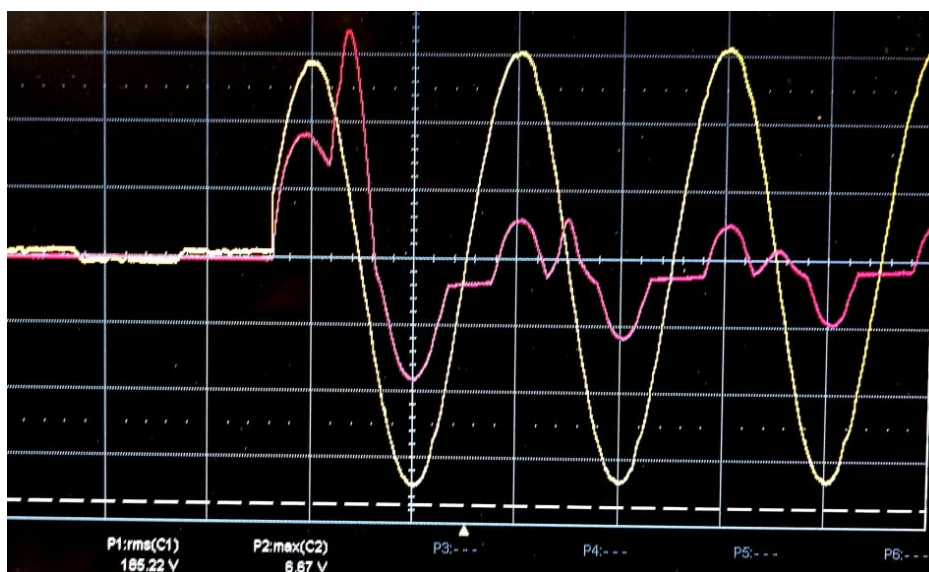
Tabulka 4.7: Tabulka maximálních zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž

4.3 Průběhy

4.3.1 Oscilogramy



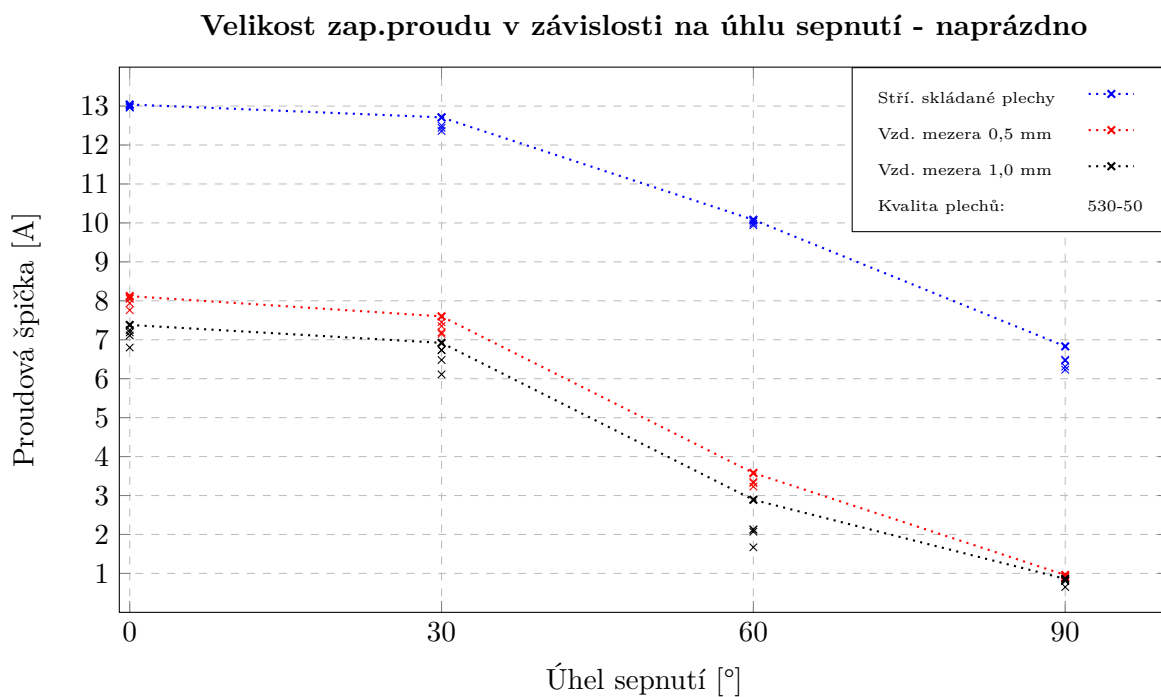
Obrázek 4.10: Průběh zapínacího proudu se sekundárem naprázdno při sepnutí v nule - kvalita plechů 530-50 natupo s 0,1 mm vzduchovou mezerou - FEL



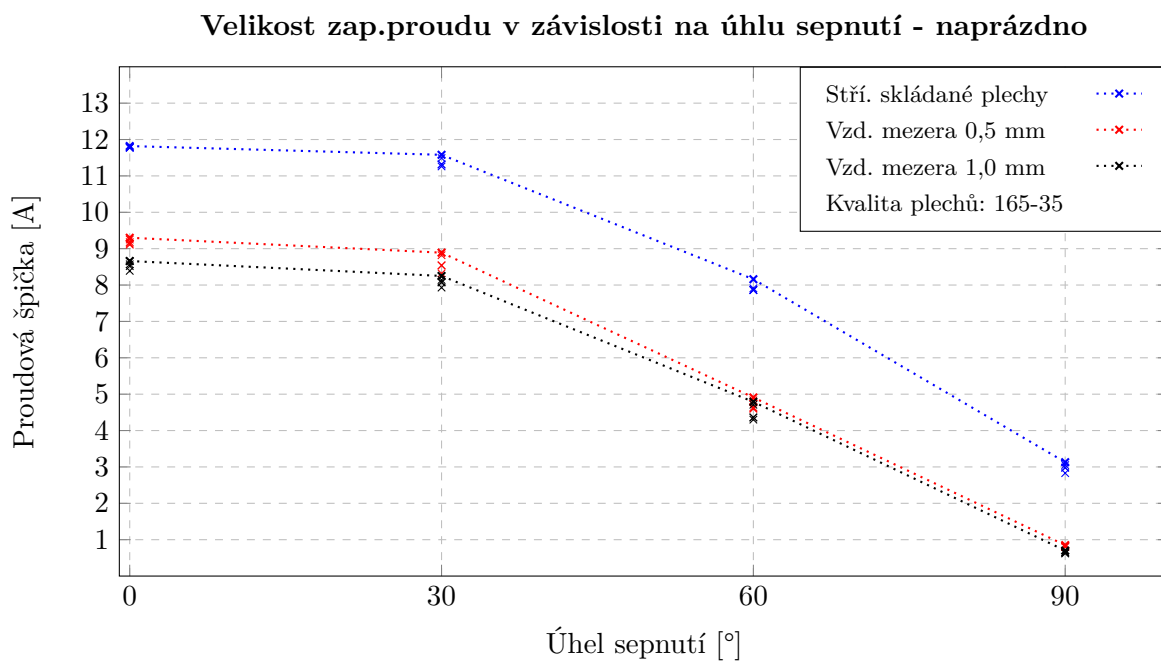
Obrázek 4.11: Průběh zapínacího proudu s připojeným usměrňovačem a vyhlazovací kapacitou při sepnutí v 30 - kvalita plechů 165-35 natupo s 0,1 mm vzduchovou mezerou - Mdexx

4.3.2 Grafy

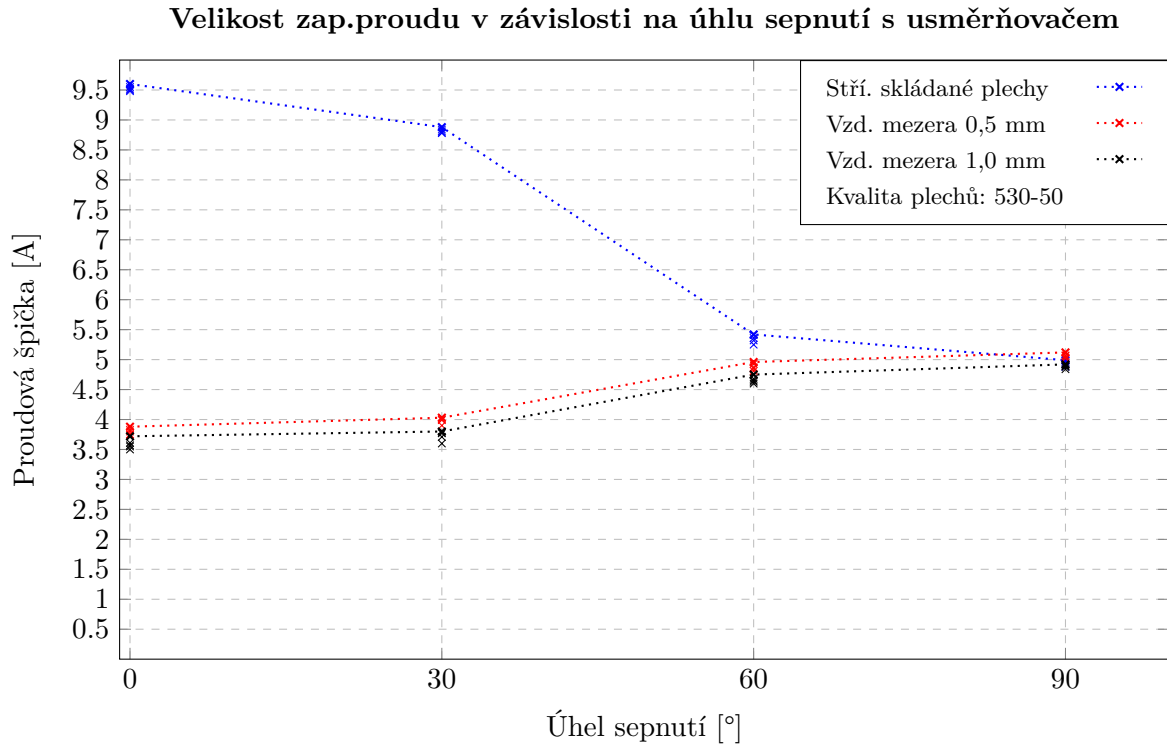
Měření v Mdexxu



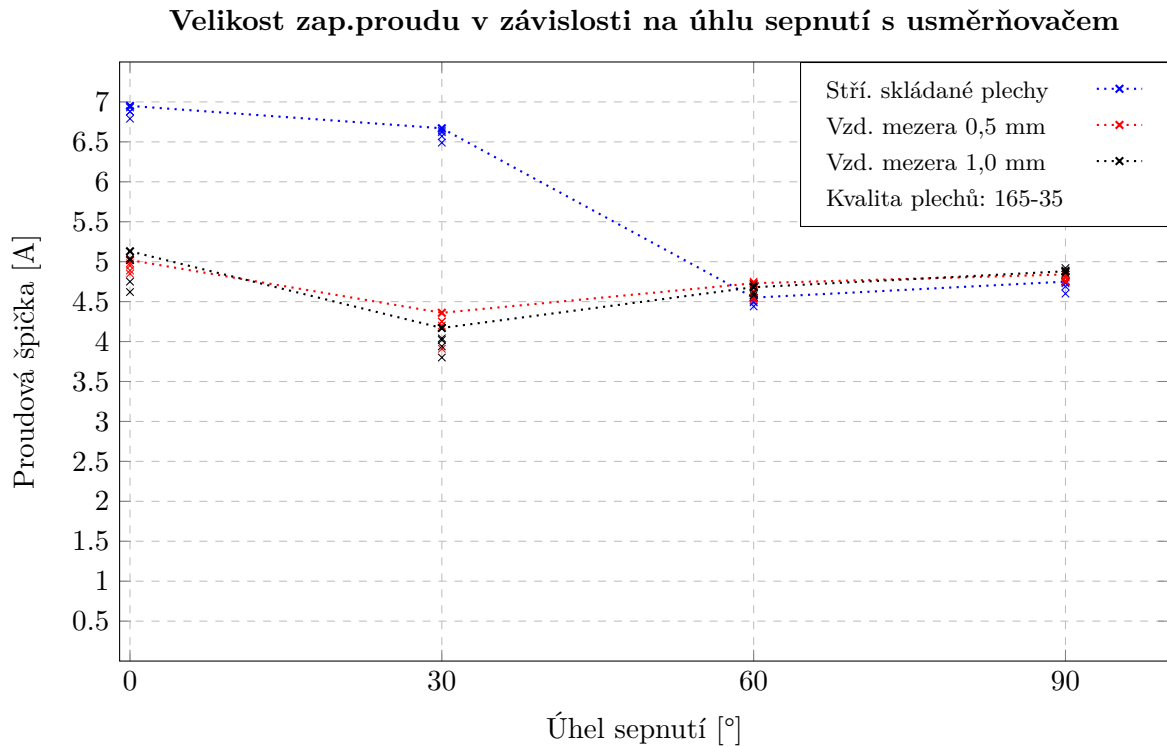
Obrázek 4.12: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 530-50



Obrázek 4.13: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 165-35

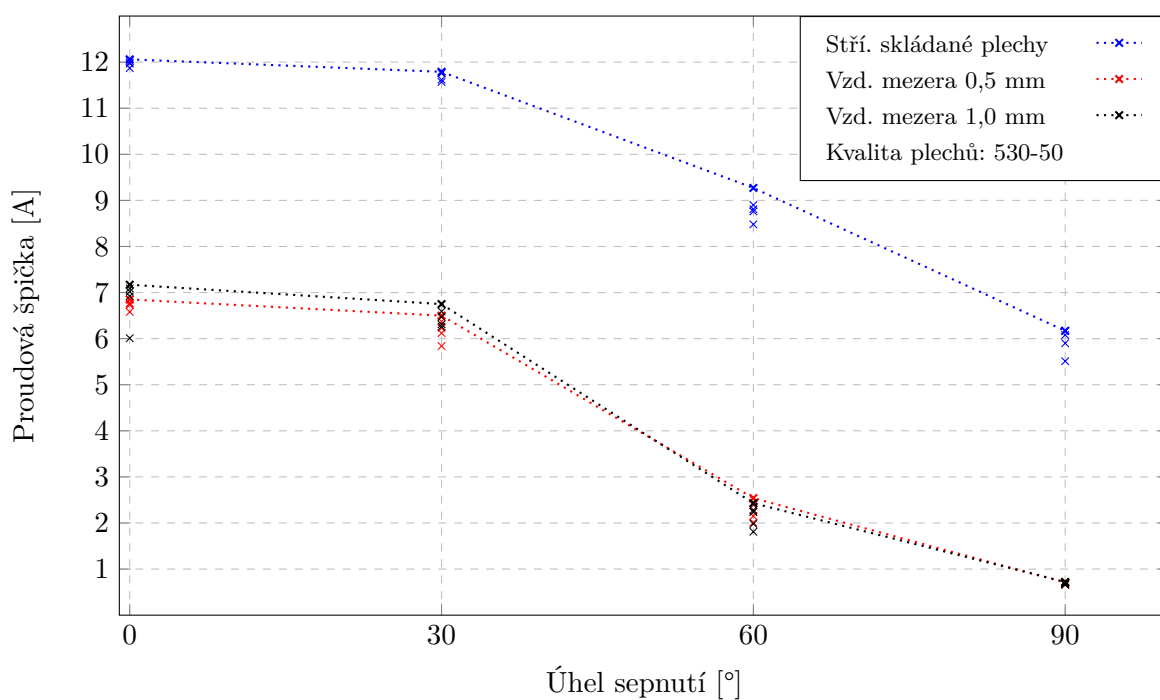


Obrázek 4.14: Velikost zap. proudu v závislosti na úhlu sepnutí s ohmicky zatíženým usměrňovačem s nárazovou kapacitou - plechy 530-50



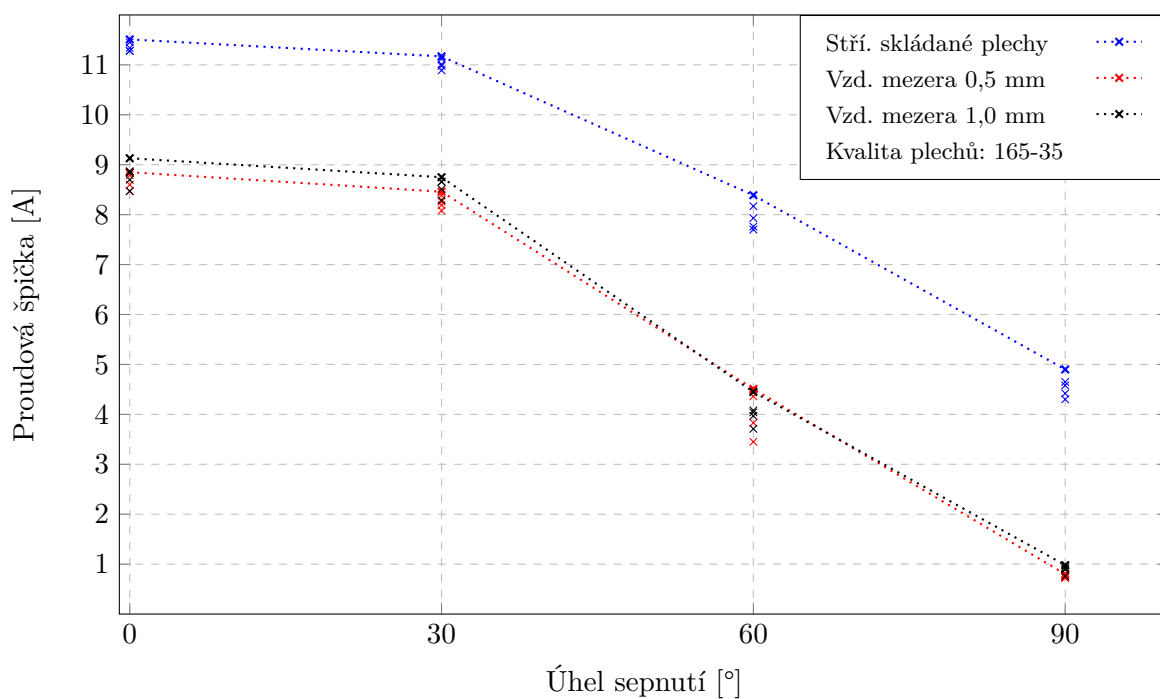
Obrázek 4.15: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár s usměrňovačem, nárazovou kapacitou a jmenovitou zátěží - plechy 165-35

Velikost zap.proudu v závislosti na úhlu sepnutí se jmenovitou zátěží



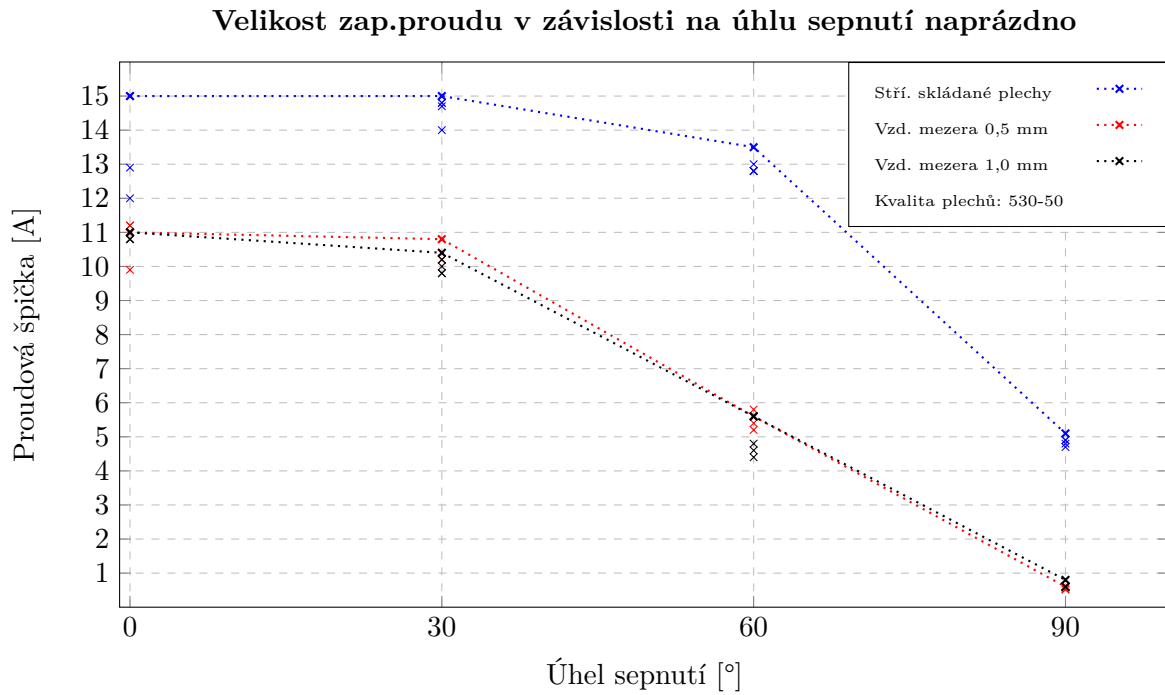
Obrázek 4.16: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50

Velikost zap.proudu v závislosti na úhlu sepnutí se jmenovitou zátěží

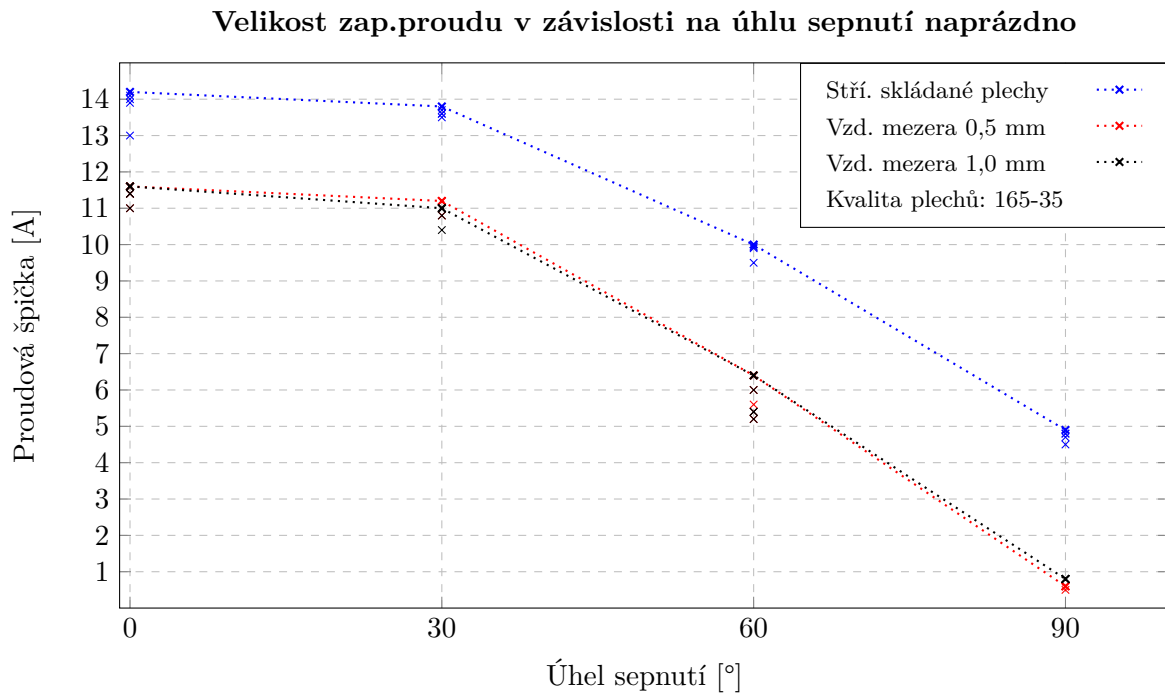


Obrázek 4.17: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 165-35

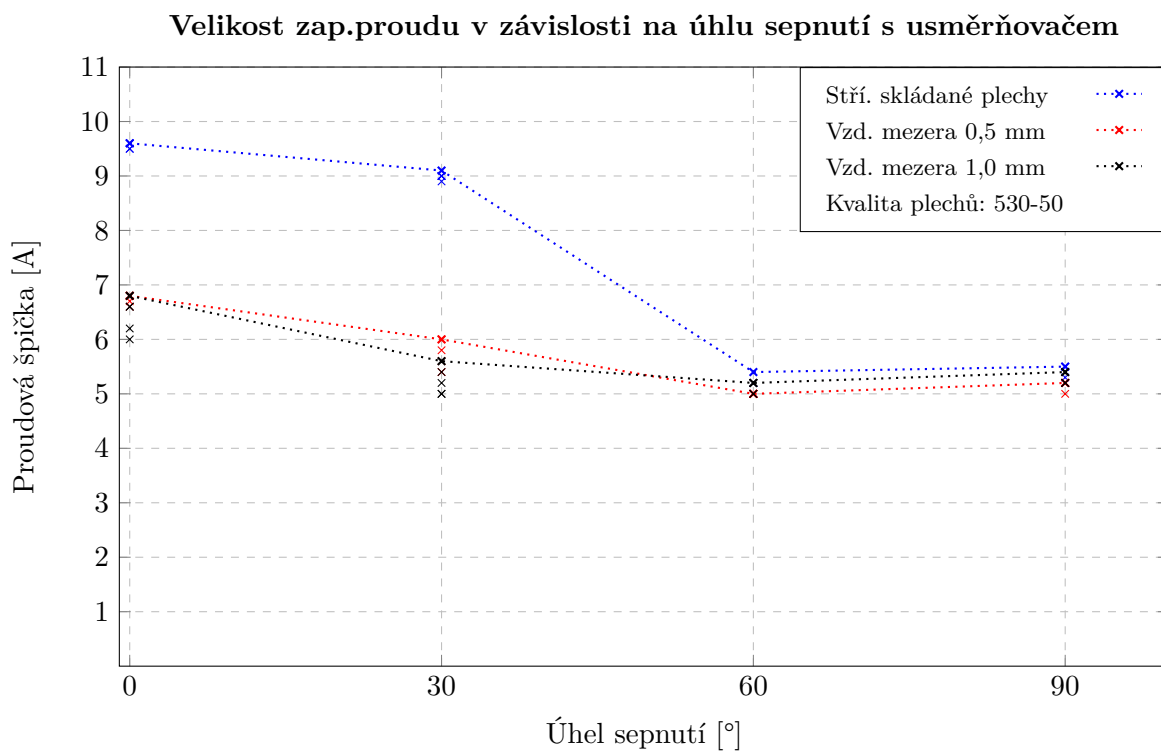
■ Měření na FELu



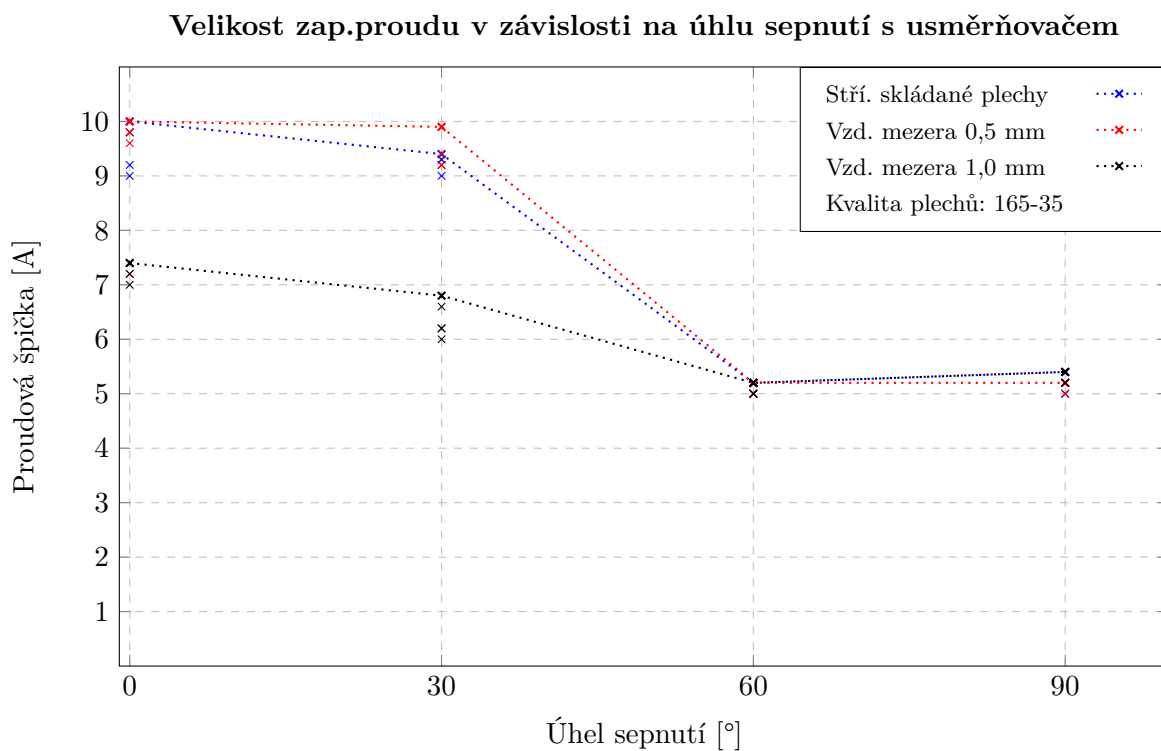
Obrázek 4.18: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 530-50



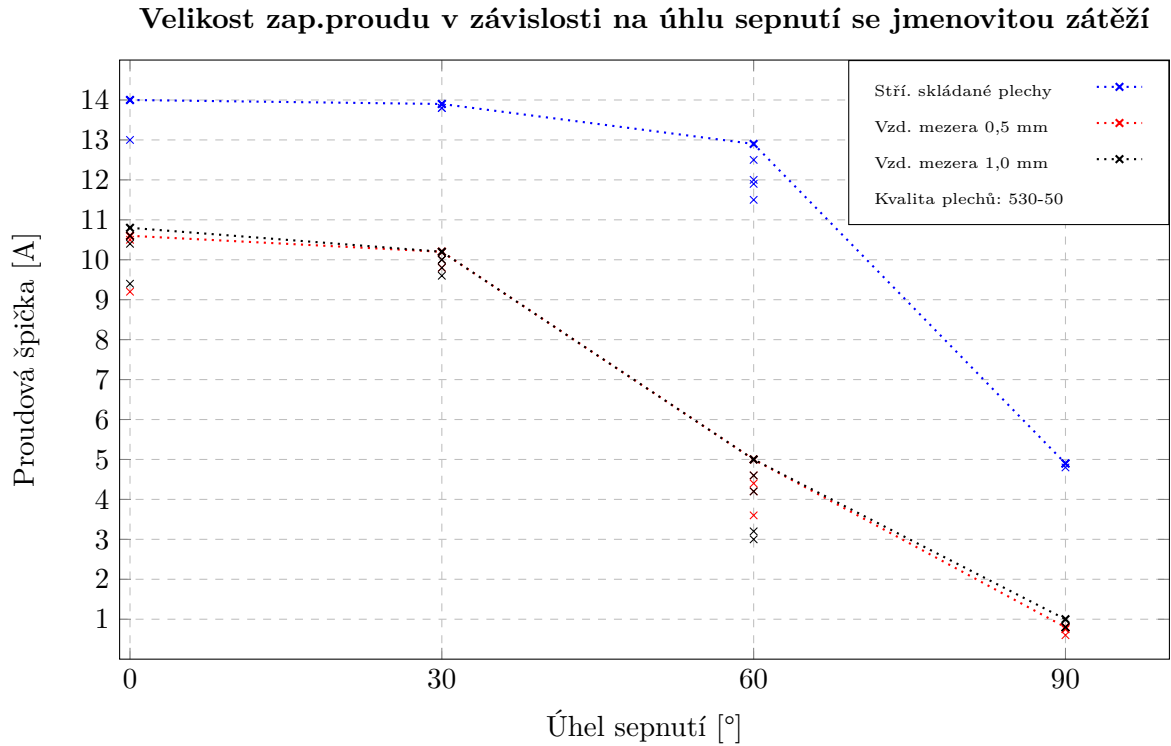
Obrázek 4.19: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 165-35



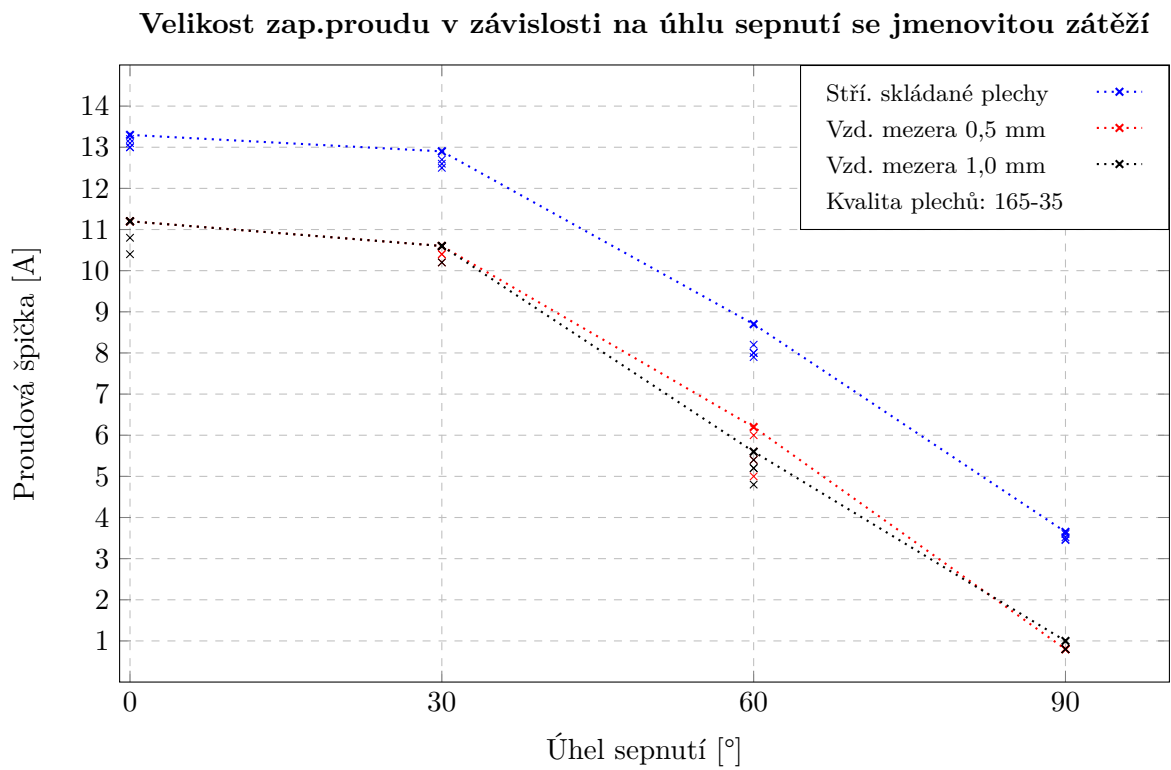
Obrázek 4.20: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50



Obrázek 4.21: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár s usměrňovačem, nárazovou kapacitou a jmenovitou zátěží - plechy 165-35



Obrázek 4.22: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50



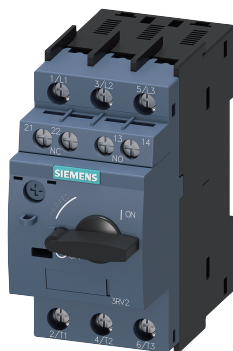
Obrázek 4.23: Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 165-35

4.3.3 Doporučení jištění

Na základě výsledků měření vzorového transformátoru 63 VA lze doporučit pro transformátory úpravu konstrukce magnetického obvodu přidáním vložky (tj. vzduchové mezery) tloušťky alespoň 0,05 mm. Tím se upraví reluktance magnetického obvodu a potlačí se maximální amplituda zapínacího proudu. K jištění primární strany vzorového transformátoru s vložkou alespoň 0,05 mm jističem lze proto doporučit následující jistič např. firmy SIEMENS vyobrazen na obr. (4.24). V tabulce (4.8) jsou uvedeny technické parametry vybraného jističe.

| Obecné údaje | |
|--|----------------------------|
| Název produktu | 3RV2411-0GA15 |
| název značky produktu | SIRIUS |
| označení produktu | výkonový jistič |
| provedení produktu | pro ochranu transformátorů |
| označení typu produktu | 3RV2 |
| Obecné technické údaje | |
| konstrukční velikost výkonového jističe | S00 |
| rozšíření produktu o pomocný spínač | Ano |
| Ztrátový výkon [W] při I_N u AC | 5,5 |
| izolační napětí při stupni znečištění 3 při U_N [V] | 680 |
| rázová pevnost jmenovitá hodnota [kV] | 6 |
| maximální přípustné napětí pro bezpečné oddělení [V] | 400 |
| rázová pevnost podle IEC 60068-2-27 | 25 g /11 ms |
| mechanická životnost hlavních spínačů (počet sp. cyklů) | 100 000 |
| mechanická životnost pomocných spínačů (počet sp. cyklů) | 100 000 |
| elektrická životnost (počet sp. cyklů) | 100 000 |
| Podmínky okolního prostředí | |
| max. možná nadmořská výška montáže [m] | 2000 |
| okolní teplota | [°C] |
| během provozu | -20...+60 |
| při skladování | -50...+80 |
| během přepravy | -50...+80 |
| teplotní kompenzace | -20...+60 |
| Hlavní proudový okruh | |
| počet pólů pro hlavní proudový okruh | 3 |
| nastavitelná hodnota odezvy spouště na přetížení závislé na proudu [A] | 0,45... 0,63 |

Tabulka 4.8: Tabulka technických údajů doporučeného jističe - Převzato ze SIEMENS katalogu



Obrázek 4.24: Doporučený jistič pro vzorový transformátor - převzato ze SIEMENS katalogu

Jistič splňuje vhodné parametry pro jištění primární strany vzorového transformátoru. Zvolený jistič je třífázový, z čehož plyne několik nevýhod. Velikost je srovnatelná se vzorovým transformátorem, dále cena daného jističe, která se pohybuje okolo ceny transformátoru. Nákup transformátoru se tímto znatelně prodraží. Zvolený jistič je pouze možnost výběru a u takto malých transformátorů nemá podstatné využití z důvodů výše zmíněných. Pro transformátory větších výkonů lze využít tabulku (C.1). Jako levnější variantu lze zvolit použití tavné pojistky typu gG 8x32 mm 0,5 A s charakteristikou D.

Kapitola 5

Shrnutí

5.1 Shrnutí konstrukce vzorkového transformátoru

Pro realizaci analýzy zapínacích proudů bylo třeba navrhnout a zkonstruovat transformátor. Transformátor byl navržen tak, aby s ním bylo možné lehce manipulovat a zároveň se dala lehce měnit konfigurace magnetického obvodu. Návrh transformátoru jsem uskutečnil pomocí znalostí nabytých při studiu na fakultě obohacených o téměř dvouletou praxi ve firmě Mdexx. Kontrola mého výpočtu proběhla ve výpočetním programu užívaném pro návrh transformátorů. Magnetický obvod vzorového transformátoru byl sešroubován kvůli potřebné manipulaci s magnetickým obvodem, ačkoli v praxi se obvod vzhledem k časové náročnosti obvykle svařuje.

Na vzorovém transformátoru byly po zhotovení provedeny standardní výstupní zkoušky. Zkouška vysokého napětí ukázala, že transformátor splňuje předepsané izolační vlastnosti. Sériově vyráběný transformátor se při výrobě noří do impregnačního laku, aby se zvýšila napěťová izolace. Vzorový transformátor není naimpregnován, protože by bylo nemožné přeskládat magnetický obvod, tudíž lehce „vrnit“. Dále byla provedena oteplovací zkouška, která je vyobrazena na obrázku (4.3), kde transformátor byl po dobu osmi hodin připojen na tester provádějící zatěžování. Teploty vinutí a jádra se dostaly na necelých 60° C, což potvrzuje správnost zařazení do teplotní skupiny B.

Z měření naprázdno v podkapitole (4.1) vyplývá, že transformátor má celkem vysoký proud naprázdno, konkrétně 41 % jmenovitého proudu. Měření nakrátko bylo provedeno při nastavení jmenovitého proudu na sekundárním vinutí a sníženém napětí na primárních svorkách. Z tabulky (4.2) vyplývá, že při jmenovitém zatížení obou sekundárních vinutí spojených nakrátko dosahuje primární proud 81 % jmenovité hodnoty, zatímco napětí nakrátko u_k dosahuje pouze 6,3 % jmenovité hodnoty, což opět potvrzuje teoretické předpoklady.

5.2 Shrnutí řídicího obvodu

Pro analýzu zapínacích proudů transformátorů jsem navrhl řídicí obvod s výkonovým spínačem, který je založen na principu snímání sinusového průběhu sítě a následném vyhodnocení a vhodném připnutí transformátoru na síť. Jako výkonový snímač jsem použil solid state-relay, které je popsán v části (2.2.8). Výhodou tohoto obvodu je cenová dostupnost a celkem jednoduchá konstrukce. Jako hlavní nevýhodu shledávám v nesymetrii triaku užitého uvnitř SSR. Při měření zde došlo k problému při spínání v rozmezí mezi 73° až 105° napětí, kde docházelo ke zpoždění propuštění proudu a proto nebylo možné správně určit maximální

amplitudu zapínacího impulsu okolo těchto úhlů (konkrétně v 90°). Tento problém jsem vyřešil změnou kódu, konkrétně posunutím okamžiku sepnutí až do záporné půlvlny. Další problém pak vznikl nesprávným dimenzováním měřicího odporu R_1 , který se při delším měření přehříval. Toto jsem vyřešil zvětšením tepelného výkonu odporu z 5 W na 10 W.

Vhodnější variantou se jeví využití Graetzova můstku s vloženým MOSFET přes diagonálu můstku, který tvoří spínací prvek. Vhodnou konfigurací jsme schopni se dostat na zpoždění sepnutí cca desítek až stovek nanosekund, zatímco SSR má zpoždění sepnutí v řádu jednotek milisekund. To má za následek nutnost posunutí spínacích konstant zahrnutých v programu. Mnou navržený řídicí obvod pro potřeby této práce stačil, protože nebyla potřeba exaktní přesnost v sepnutí zvoleného úhlu. Úhel sepnutí měl rozmezí $\pm 4^\circ$ od zadané hodnoty.

5.3 Shrnutí měření

V podkapitole (2.2) byly popsány metody pro omezení zapínacího proudu. V závěru kapitoly (2) je vybrána kombinace vhodných metod omezujících zapínací proud pro využití v praxi. Následně byly tyto vybrané metody otestovány při měření. Naměřené maximální hodnoty jsou uvedeny v tabulce (4.5) a v tabulce (4.6) jsou uvedeny poměrné hodnoty maximální amplitudy vztahované k jmenovitému primárnímu proudu transformátoru.

Z naměřených maximálních hodnot amplitud maximálního impulsu vychází tabulka (4.7), kde jsou uvedeny rozptyly jednotlivých měření. Zvolená metoda pro měření má v určitých ohledech nedostatky, jelikož nelze ovlivnit konečný stav magnetického obvodu, tedy natočení domén, a tím pádem mají některé výsledky relativně veliký rozptyl. Maximální amplitudu zapínacího impulsu jsem naměřil při sepnutí napětí v průchodu 0° , s plechy 530-50 skládanými střídavě a s nezatíženým sekundárním vinutím. Toto je pravděpodobně způsobeno aktualizací některých částí řídicího programu. Tím, že jsem aktualizoval program, bylo docíleno spínání ve směru válcování orientovaných plechů a maximální amplituda impulsu byla zřetelně menší, než při spínání proti směru válcování.

Při měření se zatíženým sekundárním vinutím pomocí usměrňovače s nárazovou kapacitou je značný rozdíl mezi naměřenými hodnotami v Mdexxu a na Fakultě elektrotechnické. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben verzí programu, která byla v danou chvíli v řídicím mikroprocesoru. Tím, že program byl správně doladěn až pro měření na Fakultě elektrotechnické, tak považuji výsledky z tohoto měření za relevantní. Při měření v Mdexxu se mi povedlo částečně potlačit druhou proudovou špičku, která vzniká při tomto zapojení a je pravděpodobně způsobena současným sycením magnetického obvodu, nabíjením kondenzátoru a nelinearitou diod v Graetzově můstku. Tato dvoušpička je vyobrazena na obr. (4.11).

Použití kombinace řídicího obvodu v kombinaci s definovanou vzduchovou mezerou je v praxi nevhodné, protože většina transformátorů je připojena přímo na napájení bez manipulace s úhlem sepnutí pomocí jakéhokoliv řídicího obvodu.

5.4 Shrnutí možných řešení v praxi

Jako ideální omezení maximální amplitudy zapínacího proudu se jeví použít řídicí obvod v kombinaci s definovanou vzduchovou mezerou alespoň 0,05 mm a spínat transformátor pouze při průchodu napětí maximem. Z naměřených hodnot je patrné, že maximální hodnota amplitudy zapínacího impulsu klesne při této konfiguraci o 43 % oproti sepnutí v 0° s plechy složenými střídavě. Toto řešení je ale nepraktické z důvodu nutnosti pořízení externího spínače. Jako praktické řešení se tedy nabízí při konstrukci složit plechy magnetického obvodu natupo s definovanou vzduchovou mezerou alespoň 0,05 mm a užitím neorientovaných plechů, čímž sice vzrostou celkové ztráty, ale dosáhne se velkého snížení maximální amplitudy zapínacího proudu, což považuji za rozumný kompromis, díky kterému vzniká možnost jištění primární strany transformátoru jističi typu D, nebo tavnými pojistkami.

Návrh pro jištění primární strany vybraných katalogových transformátorů TAM firmy Mdexx jsem uvedl v příloze (C) do tabulek (C.1) a (C.2), ve kterých jsou zapsány typové jističe firmy Siemens pro typové velikosti malých transformátorů TAM dle jejich výkonu a velikosti primárního napětí. Tato tabulka je pouze návrh vytvořený na základě hodnot naměřených na vzorovém transformátoru (viz tabulka (4.5)). Pro potvrzení mého návrhu by bylo třeba všechny transformátory poměřit ve stejných konfiguracích jako byl měřený vzorový transformátor.

Jako levná možnost užití externího obvodu pro snížení maximální amplitudy se jeví užití předřadníku popsaného v části (2.2.10). Tato varianta se dá aplikovat pro transformátory malých výkonů v řádu stovek VA a spíše pro osobní využití.

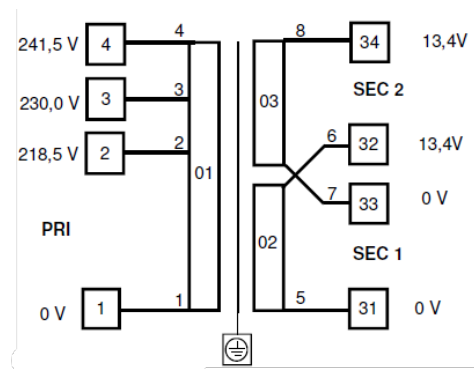
Příloha A

Vzorový transformátor

Vzorový transformátor byl spočítán v podkapitole (1.3). Změřené parametry vzorového transformátoru jsou v podkapitole (4.1). Vzorový transformátor je navržen s jedním primárním vinutím se dvěma dalšími odbočkami. Sekundární vinutí jsou dvě, aby byla možnost výběru buď 24 V a sekundárního proudu 2,625 A nebo 12 V a 5,25 A. V tabulce (1.1) jsou uvedeny základní parametry vzorového transformátoru. V tabulce (A.1) jsou uvedeny výstupní vysokonapěťové testy izolace vzorového transformátoru. V tabulce (A.2) jsou uvedeny další elektrické a mechanické parametry transformátoru. Na obrázku (A.1) je schéma vyvedení koncovek transformátoru a jejich označení. Na obrázku (A.2) a (A.3) jsou vyobrazeny štítky pro vzorový transformátor.

| Vinutí | U [kV] |
|--------------|--------|
| PRI-SEC1,2 | 5,0 |
| Pri-jádro | 3,5 |
| SEC1,2-jádro | 0,5 |
| SEC1-SEC2 | 0,5 |

Tabulka A.1: Vysokonapěťová zkouška izolace vinutí pro vzorový transformátor



Obrázek A.1: Schéma zapojení transformátoru

TAM3299-4TE61-0EA0

63 VA / 190 VA PRI 1-4 241,5V / 1,25 A
 1-3 230,0V / 1,25 A
 ta 40°C / B li0 1-2 218,5V / 1,25 A
 50...60 Hz SEC1 31-34 31-32 24V / 1,25 A
 SEC2 31-34 31-32 ; 33-34 12V / 3,75 A
 EN 61558 ♀ ♀ ♂

CE Made by J.Kasper

Obrázek A.2: Štítek na přední straně vzorového transformátoru

TAM3299-4TE61-0EA0

PRI 218,5V 818 závitů
 218,5V 861 závitů
 218,5V 904 závitů
 SEC1 12,0V 50 závitů
 SEC2 12,0V 50 závitů



Made by J.Kasper

Obrázek A.3: Štítek na zadní straně vzorového transformátoru

| | | | |
|--|-----------------------|-----------|-----------|
| Vinutí číslo | 01 | 02 | 03 |
| Směr navíjení | R | R | R |
| Třída izolace | LV155 | LV155 | LV155 |
| Průměr Cu [mm] | 0,400 | 1,00 | 1,00 |
| Hmotnost vinutí [kg] | 0,148 | 0,064 | 0,071 |
| Délka Cu [m] | 132,18 | 9,12 | 10,18 |
| Druh vinutí | B | B | B |
| Závitů na vrstvu | 65-70 | 26-28 | 26-28 |
| Počet vrstev | 14,8 | 1,9 | 1,9 |
| Výška vinutí [cm] | 5,8 | 2,6 | 2,6 |
| Délka vinutí [cm] | 37,4 | 37,4 | 37,4 |
| Izolace před vinutím | —FD | G72ED | G21E- |
| Izolace po vinutí | — | — | S1— |
| Označení vývodů/poč.závitů | 1-začátek | 5-začátek | 7-začátek |
| | 2 / 818. | 6 / 50 | 8 / 50 |
| | 3 / 861. | - | - |
| | 4 / 904. | - | - |
| Izol.vložka | NT73904-35 | | |
| Cívkové tělísko | NT73901-33 | | |
| Základní izol. F | NT73904-80 | | |
| Společná izolační vložka pro cívku 02 a 03 | | | |
| proudová hustota [A/mm ²] | 3,02 | 3,34 | 3,34 |
| Ztráty [W] | 2,7 | 1,6 | 1,7 |
| Jádro | Skládáno-sešroubováno | | |
| Kvalita plechů | 530-50 | | 165,35 |
| Rozměrový náčrtek | MTZAM218-53 | | |
| Jádro | NT56260-34 | | |
| Vložka transf. | NT73709-87 | | |
| Stranová izolace | NT73904-87 | | |
| Zem.svorka jádra | Viz.Sestava | | |
| L-Uhelník | NT73708-05 | | |
| Svorkovnice 1 a 2 | 4x8WA9200 | | |

Tabulka A.2: Tabulka parametrů transformátoru



Obrázek A.4: Vzorový transformátor pohled z primární strany



Obrázek A.5: Vzorový transformátor pohled ze sekundární strany

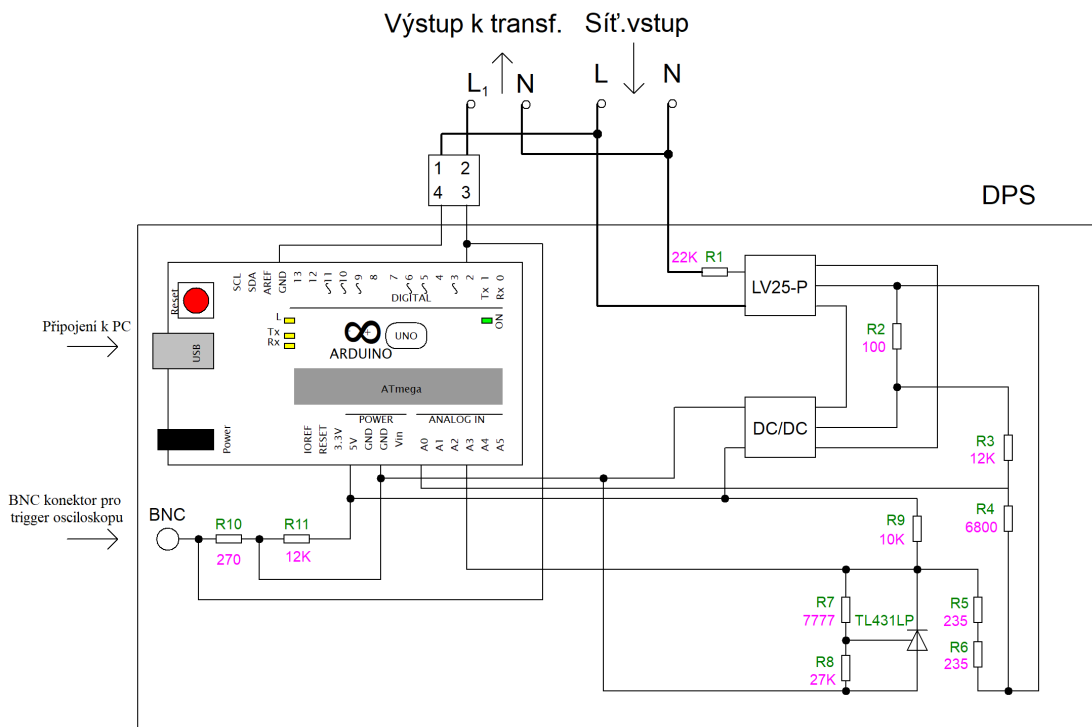
Příloha B

Řídicí obvod s výkonovým spínačem

Pro uskutečnění měření bylo nutné navrhnout a vytvořit řízený spínací obvod, který by byl schopen připnout napájení transformátoru při definovaném zpožďovacím úhlu sinusového průběhu sítě. Základem tohoto obvodu je solid state relé (dále SSR), řízené mikroprocesorem. Jako mikroprocesor bylo použito Arduino nano.

Myšlenka byla udělat z Arduino snímač sinusového signálu ze sítě, následně vyhodnotit signál a dle požadavku sepnout SSR. Pro snímání průběhu sítě se jevilo jako nejlepší varianta využít LEM LV 25-p, což je převodník napětí.

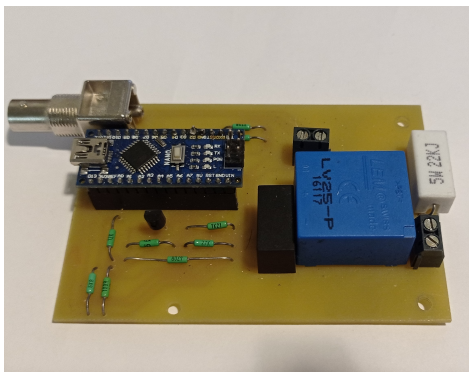
Průběh sinusového napětí je snímán na rezistoru R_2 . Sejmuté zmenšené sinusové napětí je ještě posunuto o referenční napětí z rozsahu $-2,5\text{ V} \dots +2,5\text{ V}$ do rozsahu $0 \dots 5\text{ V}$. To proto, že AD převodník na Arduino má tento rozsah. Napěťová reference je vytvořena pomocí TL431LP. V momentě, kdy napětí v síti prochází nulou, tak se referenční napětí a napětí snímané na rezistoru R_2 sobě rovnají, tudíž lze sepnout SSR s definovaným zpožděním.



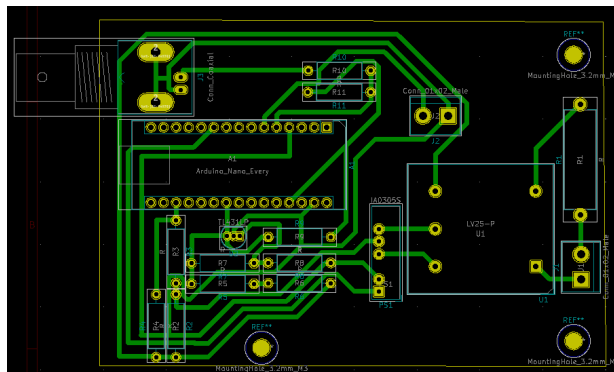
Obrázek B.1: Obvodové schéma řídicího obvodu

Zadávání požadovaného úhlu sepnutí je prováděno z PC, z něhož je přes USB vstup napájen řídicí obvod (Arduino). Za účelem programového ovládání byl vytvořen program pro zpracování

snímaného signálu a na základě zadání požadovaného úhlu sepnutí Arduino sepne SSR a tím přepne primární stranu transformátoru k síti.



Obrázek B.2: Řídicí obvod



Obrázek B.3: DPS řídicího obvodu

Rozpiska:

| | | |
|----------------------------------|---|--|
| Arduino nano V3.0 ATmega328 klon | 5V | www.dratek.cz |
| LEM LV25-P | 230V / 10mA | www.tme.eu |
| DC/DC převodník - IE515D | 5/15V | www.tme.eu |
| SSR | 4 – 32V _{DC} / 415 V _{AC} | www.tme.eu |
| TL431LP | +2,5V | www.tme.eu |
| R ₁ | 22kΩ / 10 W | www.tme.eu |
| R ₂ | 100Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₃ | 12000Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₄ | 6800Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₅ | 235Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₆ | 235Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₇ | 7777Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₈ | 27000Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₉ | 10000Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₁₀ | 270Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| R ₁₁ | 12000Ω / 0,5 W | www.tme.eu |
| 2x Svorcky | JCON 01x02 Male | www.tme.eu |

Tabulka B.1: Rozpiska řídicího obvodu

SSR je s DPS řídicího obvodu propojeno dvěma vodiči (svorky 3,4).

Kód pro řízení spínání:

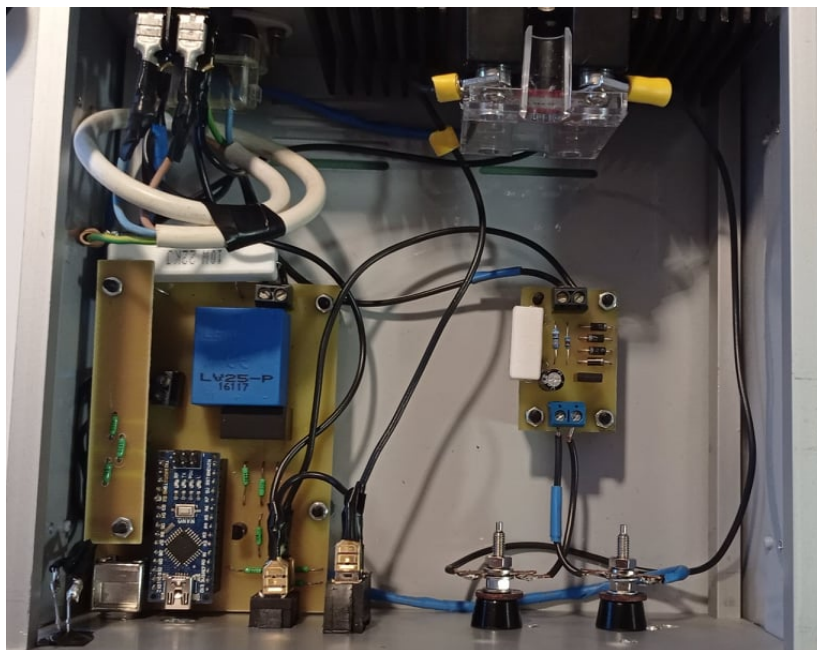
```

void turnOnPin(double _delay, int degree) { //Funkce pro spravne sepnuti
    int value;
    int A=0; //Promenna pro urceni smeru
    int B=0; //Promenna pro urceni smeru
    Serial.print("Zadali jste ");
    Serial.print(degree);
    Serial.println(" stupnu.");
    int reference = analogRead(A3); //Nacitani referencniho signalu
    A=analogRead(A0); //Nacitani sinusoveho prubehu napajeni do
        promenne A
    while(true){
        B=A;
        value = analogRead(A0); //Snimani sinusoveho prubehu
        A = value;
        if(value== reference){ //IF pro porovnaní
            if((A-B)<0){ //IF pro preklopeni zaporneho smeru do kladneho
                delay(_delay+10); //Zpozdujici funkce
                digitalWrite(3, HIGH); //Sepnuti pinu pro ovladani SSR
                digitalWrite(2,LOW); //Vypnuti pinu pro ovladani triggeru
                delay(10);
                digitalWrite(2,HIGH); //Sepnuti pinu pro ovladani triggeru
            }
            if((A-B)>0){
                delay(_delay);
                digitalWrite(3, HIGH);
                digitalWrite(2,LOW);
                delay(10);
                digitalWrite(2,HIGH);
            }
            break;
        }
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600); //Seriova komunikace s klavesnici
    pinMode(3, OUTPUT); //Nastaveni pinu 3 na OUTPUT
    pinMode(2, OUTPUT); //Nastaveni pinu 2 na OUTPUT
}

void loop(){
    double delays=0;
    double uhly = 0;
    char val[] = {' ',' ',' ',' ',' ',' '}; //Pole pro nacteni pozadavku z klavesnice
    int number = 0;
    while(Serial.available()!=0);
        Serial.readBytesUntil('\n',val,4); //Nacteni pozadavku z klavesnice
        number = atoi(val); //Pretypovani pozadavku z klavesnice
        uhly = number;
        delays = 20*(uhly/360); //Nastaveni zpozdeni pro pozadovany uhel sepnuti
        turnOnPin(delays, uhly); //Nacteni hodnot do funkce pro sepnuti
        delay(500);
        digitalWrite(3,LOW);
    }
}

```



Obrázek B.4: Foto řídicího obvodu

Na obrázku (B.4) je foto řídicího obvodu spolu s předřadníkem.

Řídicí obvod s výkonovým spínačem byl v laboratoři testován s využitím externích laboratorních jisticích prvků. Samotný obvod jištění neobsahuje. Při měření bylo zjištěno, že měřicí rezistor R_1 není dost výkonný a přehřívá se. Odpor byl vyměněn za drátový 10 W se stejnou hodnotou odporu.

Příloha C

Jištění transformátorů řady AM dle skupin

V následujících tabulkách jsou uvedeny navrhované jističe pro katalogové transformátory firmy Mdexx řazené dle velikosti jádra a výkonu při určitém jmenovitém napětí. Z důvodu velikostí tabulek jsou jističe zapsány pomocí posledních tří číslic jejich typového označení. Celý jistič je označován 3RV2411-xxx10, kde xxx jsou kódy uvedené v tabulkách (C.1) a (C.2).

| typ | P[kVA] | U[V] | | | | | | |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 690 | 660 | 600 | 575 | 550 | 525 | 500 |
| TAM23 | 0,025 | - | - | - | - | - | - | - |
| I[A] | | - | - | - | - | - | - | - |
| TAM26 | 0,040 | - | 0AA | 0AA | 0AA | 0AA | 0AA | 0AA |
| I[A] | | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 |
| TAM32 | 0,063 | 0AA | 0BA | 0BA | 0BA | 0BA | 0BA | 0BA |
| I[A] | | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,18 |
| TAM34 | 0,100 | 0CA | 0DA | 0DA | 0DA | 0DA | 0DA | 0FA |
| I[A] | | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,27 | 0,28 |
| TAM38 | 0,160 | 0EA | 0FA | 0FA | 0FA | 0FA | 0FA | 0FA |
| I[A] | | 0,32 | 0,35 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,42 | 0,44 |
| TAM40 | 0,250 | 0GA | 0GA | 0GA | 0GA | 0HA | 0HA | 0HA |
| I[A] | | 0,50 | 0,52 | 0,54 | 0,56 | 0,59 | 0,62 | 0,65 |
| TAM43 | 0,315 | 0HA | 0HA | 0HA | 0HA | 0JA | 0JA | 0JA |
| I[A] | | 0,60 | 0,65 | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,77 | 0,81 |
| TAM46 | 0,400 | 0HA | 0JA | 0JA | 0JA | 0KA | 0KA | 0KA |
| I[A] | | 0,75 | 0,81 | 0,84 | 0,88 | 0,92 | 0,96 | 1,0 |
| TAM48 | 0,500 | 0KA | 0KA | 0KA | 0KA | 1AA | 1AA | 1AA |
| I[A] | | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
| TAM52 | 0,630 | 1AA | 1AA | 1AA | 1AA | 1BA | 1BA | 1BA |
| I[A] | | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| TAM55 | 0,800 | 1BA | 1BA | 1BA | 1BA | 1CA | 1CA | 1CA |
| I[A] | | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 |
| TAM57 | 1,0 | 1BA | 1CA | 1CA | 1CA | 1DA | 1DA | 1DA |
| I[A] | | 1,8 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| TAM61 | 1,6 | 1DA | 1EA | 1EA | 1EA | 1FA | 1FA | 1FA |
| I[A] | | 2,8 | 2,9 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,9 |
| TAM64 | 2,1 | 1EA | 1FA | 1FA | 1FA | 1GA | 1GA | 1GA |
| I[A] | | 3,5 | 3,6 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,8 |
| TAM65 | 2,5 | 1FA | 1GA | 1GA | 1GA | 1HA | 1HA | 1HA |
| I[A] | | 4,3 | 4,5 | 5,0 | 5,2 | 5,5 | 5,8 | 6,1 |
| TAM99 | 2,5 | 1FA | 1GA | 1GA | 1GA | 1HA | 1HA | 1HA |
| I[A] | | 4,3 | 4,5 | 5,0 | 5,2 | 5,5 | 5,8 | 6,1 |

Tabulka C.1: Tabulka navržených jistění pro primární stranu katalogových transformátorů AM 690 .. 500 V

| typ | P[kVA] | U[V] | | | | | | | |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 480 | 460 | 440 | 415 | 400 | 380 | 240 | 230 |
| TAM23 | 0,025 | - | - | - | 0AA | 0AA | 0AA | 0BA | 0BA |
| I[A] | | - | - | - | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,16 | 0,17 |
| TAM26 | 0,040 | 0BA | 0AA | 0BA | 0BA | 0BA | 0BA | 0DA | 0DA |
| I[A] | | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,25 | 0,26 | 0,26 |
| TAM32 | 0,063 | 0CA | 0CA | 0CA | 0CA | 0CA | 0CA | 0FA | 0GA |
| I[A] | | 0,19 | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,24 | 0,38 | 0,40 |
| TAM34 | 0,100 | 0EA | 0EA | 0EA | 0EA | 0EA | 0EA | 0HA | 0HA |
| I[A] | | 0,30 | 0,31 | 0,32 | 0,34 | 0,35 | 0,37 | 0,59 | 0,62 |
| TAM38 | 0,160 | 0GA | 0GA | 0GA | 0GA | 0GA | 0GA | 0KA | 0KA |
| I[A] | | 0,46 | 0,48 | 0,50 | 0,53 | 0,55 | 0,58 | 0,96 | 1,0 |
| TAM40 | 0,250 | 0HA | 0HA | 0HA | 0JA | 0JA | 0JA | 1AA | 1AA |
| I[A] | | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,77 | 0,81 | 0,85 | 1,4 | 1,4 |
| TAM43 | 0,315 | 0JA | 0JA | 0JA | 0KA | 0KA | 0KA | 1BA | 1BA |
| I[A] | | 0,84 | 0,88 | 0,92 | 0,96 | 1,0 | 1,1 | 1,7 | 1,8 |
| TAM46 | 0,400 | 0KA | 0KA | 0KA | 1AA | 1AA | 1AA | 1CA | 1CA |
| I[A] | | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 2,1 | 2,2 |
| TAM48 | 0,500 | 1AA | 1AA | 1AA | 1BA | 1BA | 1BA | 1DA | 1DA |
| I[A] | | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 2,7 | 2,8 |
| TAM52 | 0,630 | 1BA | 1BA | 1BA | 1CA | 1CA | 1CA | 1EA | 1EA |
| I[A] | | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 3,3 | 3,4 |
| TAM55 | 0,800 | 1CA | 1CA | 1CA | 1DA | 1DA | 1DA | 1FA | 1FA |
| I[A] | | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 4,1 | 4,3 |
| TAM57 | 1,0 | 1DA | 1DA | 1DA | 1EA | 1EA | 1EA | 1GA | 1GA |
| I[A] | | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 5,3 | 5,5 |
| TAM61 | 1,6 | 1FA | 1FA | 1FA | 1GA | 1GA | 1GA | 1JA | 1JA |
| I[A] | | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 5,1 | 8,1 | 8,4 |
| TAM64 | 2,1 | 1GA | 1GA | 1GA | 1HA | 1HA | 1HA | 1KA | 1KA |
| I[A] | | 5,1 | 5,3 | 5,5 | 5,8 | 6,0 | 6,3 | 10 | 10,5 |
| TAM65 | 2,5 | 1HA | 1HA | 1HA | 1JA | 1JA | 1JA | 4AA | 4AA |
| I[A] | | 6,3 | 6,6 | 6,9 | 7,2 | 7,5 | 7,9 | 12,5 | 13,0 |
| TAM99 | 2,5 | 1HA | 1HA | 1HA | 1JA | 1JA | 1JA | 4AA | 4AA |
| I[A] | | 6,3 | 6,6 | 6,9 | 7,2 | 7,5 | 7,9 | 12,5 | 13,0 |

Tabulka C.2: Tabulka navržených jištění pro primární stranu katalogových transformátorů AM 480 ... 230 V

Příloha D

Seznam použitých symbolů

α [K^{-1}] - teplotní koeficient odporu

B_{jmax} [T] - maximální hodnota indukce v jádru

B_n [T] - jmenovitá indukce

B_{pmax} [T] - maximální hodnota indukce v průměrném průřezu vinutí

B_r [T] - remanentní magnetická indukce

B_{sat} [T] - maximální hodnota sycení materiálu

b [cm] - výška vinutí

b_{izol} [cm] - výška izolace mezi vinutími

b_1 [cm] - výška primárního vinutí

b_2 [cm] - výška prvního sekundárního vinutí

b_3 [cm] - výška druhého sekundárního vinutí

C [F] - kapacita

c [cm] - délka okénka cívkového tělíska

D_1 [mm^2] - Průřez vodiče primárního vinutí

D_2 [mm^2] - Průřez vodiče sekundárního vinutí

f_1 [A] - frekvence napájení

H_{max} [A/m] - maximální hodnota magnetické intenzity

η [%] - účinnost transformátoru

I_F [V] - propustný proud stejnosměrný

I_{FM} [V] - propustný proud špičkový

I_R [V] - závěrný proud stejnosměrný

I_{RM} [V] - závěrný proud špičkový

i_1 [A] - primární proud

i_2 [A] - sekundární proud

- L [H] - indukčnost vinutí
- $L_{1\sigma}$ [H] - rozptylová indukčnost primárního vinutí
- $L_{2\sigma}$ [H] - rozptylová indukčnost sekundárního vinutí
- l_j [m] - střední délka magnetického obvodu nebo jeho části
- l_s [m] - délka siločáry
- l_{str} [m] - střední délka vinutí
- l_{vz} [m] - střední délka magnetického toku ve vzduchové mezeře
- μ_r [-] - relativní permeabilita
- μ_0 [H/m] - permeabilita vakua
- P_j [W] - Jouleovy ztráty ve vinutí
- P_1 [W] - příkon transformátoru
- P_2 [W] - výkon transformátoru
- R_{Fe} [Ω] - Odpor symbolizující ztráty v železe
- R_{jm} [Ω] - jmenovitý odpor
- R_m [Ω] - reluktance jádra
- R_1 [Ω] - odpor primárního vinutí
- R_2 [Ω] - odpor sekundárního vinutí
- $R_{20^\circ C}$ - odpor vinutí při 20°C
- $R_{^\circ C}$ - odpor vinutí závislý na teplotě
- ρ [$\Omega \cdot m$] - rezistivita materiálu
- ρ_0 [$\Omega \cdot m$] - rezistivita materiálu při 20° C
- S_j [m²] - průřez jádra
- S_p [m²] - vnější průřez jádra
- S_v [m²] - efektivní průřez vzduchové mezery
- Φ [Wb] - magnetický tok
- Φ_j [Wb] - magnetický tok uzavírající se průřezem jádra S_j
- Φ_h [Wb] - celkový hlavní magnetický tok
- Φ_{max} [Wb] - maximální magnetický tok
- Φ_{mu} [Wb] - magnetizační tok
- Φ_p [Wb] - magnetický tok uzavírající se vzduchovou mezerou mezi vinutím a jádrem

- Φ_{1h} [Wb] - magnetický tok vyvolaný primárním vinutím
 Φ_{2h} [Wb] - magnetický tok vyvolaný sekundárním vinutím
 T [s] - Perioda sinusového průběhu
 t_{nab} [s] - doba nabíjení kondenzátoru
 t_{vyb} [s] - doba vybíjení kondenzátoru
 U [V] - efektivní hodnota napětí
 U_{BO} [V] - spínací napětí v propustném směru
 $U_{(BR)}$ [V] - průrazné napětí v závěrném směru
 U_D [V] - blokovací napětí stejnosměrné u tyristorů
 U_{DRM} [V] - blokovací napětí špičkové opakovatelné
 U_{DWM} [V] - maximální pracovní napětí v závěrném směru
 U_F [V] - napětí na diodě v propustném směru
 U_{FM} [V] - maximální napětí v propustném směru
 u_i [V] - indukované napětí
 u_{i1} [V] - indukované napětí primárním vinutím
 u_{i2} [V] - indukované napětí sekundárním vinutím
 U_k [V] - napětí nakrátko
 u_k [%] - poměrné napětí nakrátko
 U_{max} [V] - maximální hodnota usměrněného napětí
 U_{min} [V] - minimální hodnota usměrněného napětí
 U_R [V] - napětí v závěrném směru
 U_{RSM} [V] - závěrné napětí špičkové neopakovatelné
 U_{RRM} [V] - závěrné napětí špičkové opakovatelné
 U_{RWM} [V] - špičkové pracovní závěrné napětí
 U_T [V] - úbytek napětí na tyristoru
 $U_{(TO)}$ [V] - Prahové napětí
 U_0 [V] - amplituda napájecího napětí
 u_1 [V] - napětí na primární straně transformátoru
 u_2 [V] - napětí na sekundární straně transformátoru
 X [Ω] - reaktance

X_μ [Ω] - reaktance reprezentující magnetizační ztráty

$X_{1\sigma}$ [Ω] - rozptylová reaktance primárního vinutí

$X'_{2\sigma}$ [Ω] - rozptylová reaktance sekundárního vinutí

Ψ [$^\circ$] - okamžitý úhel připnutí transformátoru k napájení

ψ [$^\circ$] - spřažený magnetický tok

ω [rad/s] - úhlová rychlost pole

$Z_{20^\circ C}$ - impedance vinutí při teplotě 20°C

$Z_{^\circ C}$ - impedance vinutí závislá na teplotě vinutí

Příloha E

Literatura

- [1] V. Burlak, “Jak se dělá transformátor,” pp. 60–63, 2011. <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43693.pdf>.
- [2] J. Myslivec, *Vliv provedení svaru plechu jádra transformátoru na velikost proudu na-prázdko*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2795/26, 301 00 Plzeň, 2018.
- [3] P. Voženílek, V. Novotný, and P. Mindl, *Elektromechanické měniče*. Thákurova 1,160 41 Praha 6: Nakladatelství ČVUT, 2011.
- [4] P. Hrzina, “Technologické aspekty konstrukce spínaných zdrojů,” 2009.
- [5] Z. Faktor, *Transformátory a cívky*. Praha: BEN-Technická literatura, 1. ed., 1999.
- [6] L. Cigánek and M. Bauer, *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 2. ed., 1957.
- [7] M. Kříž, *Dimenzování a jištění elektrických zařízení - tabulky a příklady*. Pardubice: IN-EL.sro, 5. ed., 2019.
- [8] J. Pavelka and Z. Čerovský, *Výkonová elektronika*. 2000.
- [9] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics*. New York: John Wiley & Sons, 2. ed., 1995.
- [10] J. Vobecký and V. Záhlava, *Elektronika*. Praha: Grada, 3 ed., 2015.
- [11] J. Litschmann, “Napájecí zdroje,” *Amatérské Rádio*, vol. 44, no. 4, pp. 24–24, 96.
- [12] I. R. Láníček, “Kapacita filtračního kondenzátoru ve stabilizovaném zdroji,” *Praktická elektronika: Amatérské rádio*, vol. 43, no. 9, p. 48, 1995.
- [13] N. Chiesa, *Power Transformer modelling for Inrush Current calculation*. Disertační práce, Norwegian University of Science and Technology, Norsko, 2010.
- [14] M. Novák, *Přechodový děj při zapnutí transformátoru*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 461 17 Liberec 1, 2003.
- [15] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar-Gholamian, “Calculation and analysis of transformer inrush current based on parameters of transformer and operating conditions,” *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 109, pp. 17–20, Mar. 2011.
- [16] V. Molcrette, J.-L. Kotny, J.-P. Swan, and J.-F. Brudny, “Reduction of inrush current in single-phase transformer using virtual air gap technique,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 1192–1194, 1998.

- [17] A. Barkana, G. Cook, and E. S. McVey, "A solid-state relay," *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-20, no. 2, pp. 97–99, 1973.
- [18] V. Benda, *Výkonové polovodičové součástky a integrované struktury*. Praha: ČVUT, 1. ed., 1993.
- [19] P. Koblík and J. Pavelka, *Elektrické pohony a jejich řízení*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 3. ed., 2019.

Příloha F

Obrázky

| | |
|--|----|
| 1.1 Zleva: C-jádro, EI plechy kvalita 530-50, EI plechy kvalita 165-35 | 4 |
| 1.2 Toroidní transformátor | 5 |
| 1.3 Vzorový transformátor pohled z čelní strany | 5 |
| 1.4 Zleva: feritový transformátor 5.1 kVA, vzorový transformátor 63 VA | 5 |
| 1.5 Zleva: Toroidní jen s prim.vin., toroidní tr., tr. s EI plechy, C-jádro | 5 |
| 1.6 Znázornění magnetického obvodu 1f transformátoru převzato z [1] | 6 |
| 1.7 Náhradní schéma transformátoru T-článek [3] | 7 |
| 1.8 Ampérsekundová charakteristika jističů jednotlivých typů [3] | 8 |
| 1.9 Ampérsekundová charakteristika tavných pojistek na jmenovitý proud 2-32 A [3] ... | 8 |
| 1.10 Schéma vzorového transformátoru s naznačenými možnostmi zátěží | 14 |
| 1.11 Voltampérová charakteristika diody [8]..... | 16 |
| 1.12 Voltampérová charakteristika tyristoru [8]. | 17 |
| 1.13 Schéma jednofázového neřízeného dvoupulzního uzlového usměrňovače | 18 |
| 1.14 Zapojení jednofázového můstkového usměrňovače | 18 |
| 1.15 Schéma vybraného usměrňovače s nárazovou kapacitou a zatěžovacím odporem .. | 20 |
| 2.1 Průběh indukčního toku a proudu v nejhorším stavu připnutí transformátoru bez přechodového děje | 23 |
| 2.2 Průběh indukčního toku a proudu v nejlepším stavu připnutí transformátoru bez přechodového děje | 23 |
| 2.3 Vliv vzduchové mezery na tvar magnetizační smyčky [5] | 26 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Principiální schéma polovodičového relé (SSR) | 28 |
| 2.5 Schéma obvodu pro eliminaci zap. proudu předřadníkem | 29 |
| 4.1 Schéma zapojení pro měření naprázdno | 33 |
| 4.2 Schéma zapojení pro měření nakrátko | 33 |
| 4.3 Oteplovací charakteristika vzorového transformátoru | 34 |
| 4.4 Osciloskop | 35 |
| 4.5 Napěťová sonda | 35 |
| 4.6 Proudové kleště | 35 |
| 4.7 Štítek osciloskopu | 36 |
| 4.8 Štítek napěťové sondy | 36 |
| 4.9 Štítek proudové sondy | 36 |
| 4.10 Průběh zapínacího proudu se sekundárem naprázdno při sepnutí v nule - kvalita plechů 530-50 natupo s 0,1 mm vzduchovou mezerou - FEL | 40 |
| 4.11 Průběh zapínacího proudu s připojeným usměrňovačem a vyhlazovací kapacitou při sepnutí v 30 - kvalita plechů 165-35 natupo s 0,1 mm vzduchovou mezerou - Mdexx .. | 40 |
| 4.12 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 530-50 | 41 |
| 4.13 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 165-35 | 41 |
| 4.14 Velikost zap. proudu v závislosti na úhlu sepnutí s ohmicky zatíženým usměrňovačem s nárazovou kapacitou - plechy 530-50 | 42 |
| 4.15 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár s usměrňovačem, nárazovou kapacitou a jmenovitou zátěží - plechy 165-35 | 42 |
| 4.16 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50 | 43 |
| 4.17 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 165-35 | 43 |
| 4.18 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 530-50 | 44 |

| | |
|---|----|
| 4.19 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár naprázdno - plechy 165-35 | 44 |
| 4.20 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50 | 45 |
| 4.21 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár s usměrňovačem, nárazovou kapacitou a jmenovitou zátěží - plechy 165-35 | 45 |
| 4.22 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 530-50 | 46 |
| 4.23 Velikost zapínacího proudu v závislosti na úhlu sepnutí - sekundár se jmenovitou zátěží - plechy 165-35 | 46 |
| 4.24 Doporučený jistič pro vzorový transformátor - převzato ze SIEMENS katalogu ... | 48 |
| | |
| A.1 Schéma zapojení transformátoru | 53 |
| A.2 Štítek na přední straně vzorového transformátoru | 53 |
| A.3 Štítek na zadní straně vzorového transformátoru | 53 |
| A.4 Vzorový transformátor pohled z primární strany | 54 |
| A.5 Vzorový transformátor pohled ze sekundární strany | 54 |
| | |
| B.1 Obvodové schéma řídicího obvodu | 55 |
| B.2 Řídicí obvod | 56 |
| B.3 DPS řídicího obvodu | 56 |
| B.4 Foto řídicího obvodu | 58 |

Příloha G

Tabulky

| | |
|---|----|
| 1.1 Vstupní hodnoty pro návrh transformátoru | 10 |
| 2.1 Tabulka výhod a nevýhod metody připnutí ve vhodné fázi | 24 |
| 2.2 Tabulka výhod a nevýhod metody snížení pracovní indukce | 24 |
| 2.3 Tabulka výhod a nevýhod metody virtuální mezery | 24 |
| 2.4 Tabulka výhod a nevýhod metody snížení remanentní indukce | 25 |
| 2.5 Tabulka připnutí transformátoru v optimální fázi napájecího napětí | 26 |
| 2.6 Tabulka výhod a nevýhod metody změny reluktance mg.obvodu vložení vz. mezery | 27 |
| 2.7 Tabulka výhod a nevýhod svaření plechů | 27 |
| 2.8 Tabulka výhod a nevýhod použití polovodičového relé | 28 |
| 4.1 Měření naprázdno | 34 |
| 4.2 Měření nakrátko | 34 |
| 4.3 Tabulka použitých přístrojů pro měření - Mdexx | 35 |
| 4.4 Tabulka použitých přístrojů pro měření - FEL | 36 |
| 4.5 Tabulka maximálních zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž | 37 |
| 4.6 Tabulka maximálních poměrných zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž vztahených vzhledem k I_N | 38 |
| 4.7 Tabulka maximálních zapínacích proudů pro dané plechy, úhel sepnutí a zátěž | 39 |
| 4.8 Tabulka technických údajů doporučeného jističe - Převzato ze SIEMENS katalogu . | 47 |
| A.1 Vysokonapěťová zkouška izolace vinutí pro vzorový transformátor | 53 |

