

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Marek Zoufalý



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SNÍŽENÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU TRANSFORMÁTORU

REDUCING TRANSFORMER INRUSH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Zoufalý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Marek Zoufalý

ID: 125718

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Snížení zapínacího proudu transformátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s funkcí a návrhem transformátoru navrženého na ferromagnetickém jádře
- 2) Provedte rozbor a vysvětlete princip vzniku nárazového zapínacího proudu transformátoru
- 3) Navrhněte zařízení, které dokáže snížit zapínací proud transformátoru a prakticky jej vyzkoušejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
- [2] Měřička J., Zoubek Z. : Elektrické stroje, skriptum ČVUT 1990
- [3] Patočka, Miroslav: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTIUM 2011

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. David Šimek

Konzultant diplomové práce:

Ing. Ondřej Vitek, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

V této diplomové práci je popsána funkce a návrh transformátoru navrženého na feromagnetickém jádře, složeného z transformátorových plechů. Je vysvětlen přechodový děj a zapínací proud transformátoru. Do práce jsou vloženy průběhy napětí a proudu a je navrženo řešení plošného spoje sloužícího k snížení zapínacího proudu.

Abstract

In this thesis is described the function and design of the transformer designed on ferromagnetic core, composed of transformer sheets. It is explained a transient inrush current of the transformer. In this work is inserted voltage and current waveforms, designed printed circuit board, serving to reduce the inrush current.

Klíčová slova

Transformátor; magnetický obvod; vinutí; jednofázový transformátor; třífázový transformátor; transformátorové plechy; přechodový děj; zapínací proud; plošný spoj; vývojový diagram;

Keywords

Transformer; magnetic circuit; coil; single-phase transformer; three phase transformer; transformer sheets; transient; inrush current; printed circuit board; flowchart;

Bibliografická citace

ZOUFALÝ, M. *Snížení zapínacího proudu transformátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Šimek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Snížení zapínacího proudu transformátoru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

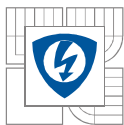
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

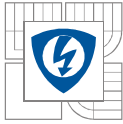
Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Šimkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne.....Podpis autora



OBSAH

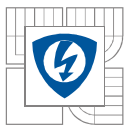
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
1.1 TRANSFORMÁTOR	16
1.1.1 DEFINICE, POJMY A OZNAČENÍ TRANSFORMÁTORU	16
1.1.2 PRINCIP FUNKCE TRANSFORMÁTORU	17
1.2 JEDNOFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR	17
1.3 TŘÍFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR	18
2 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU	20
2.1 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH OBVODŮ	20
2.1.1 LINEÁRNÍ MAGNETICKÝ OBVOD	20
2.1.1.1 LINEÁRNÍ DISKRÉTNÍ MAGNETICKÝ OBVOD – HOPKINSONŮV ZÁKON	21
2.1.1.2 INDUKČNOST LINEÁRNÍHO DISKRÉTNÍHO MAGNETICKÉHO OBVODU	22
2.1.1.3 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH LINEÁRNÍHO DISKRÉTNÍHO MAGNETICKÉHO OBVODU	23
2.1.1.4 HOPKINSONOVY ČINITELE ROZPTYLU	23
2.1.1.5 VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ V LINEÁRNÍM MAGNETICKÉM OBVODU	24
2.1.2 NELINEÁRNÍ MAGNETICKÝ OBVOD	25
2.1.2.1 VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ V NELINEÁRNÍM MAGNETICKÉM OBVODU ..	25
2.1.2.2 ENERGIE NELINEÁRNÍHO MAGNETICKÉHO OBVODU	26
2.1.2.3 HYSTEREZNÍ ZTRÁTY	28
2.2 MAGNETICKÝ OBVOD TŘÍFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	29
2.2.1 URČENÍ POČTU PRIMÁRNÍCH ZÁVITŮ	30
2.2.2 VÝPOČET MAGNETIZAČNÍHO PROUDU.....	30
3 MATERIÁLY – ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY	32
3.1 ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY ET	33
3.2 ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY Eo	33
3.3 ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY Ei	34
3.4 AMORFNÍ MAGNETICKÉ MATERIÁLY	35
4 MODEL TRANSFORMÁTORU	36
5 ZAPÍNACÍ PROUD TRANSFORMÁTORU	38
5.1 PŘÍPÍNÁNÍ TRANSFORMÁTORU.....	38
5.2 VELIKOST ZAPÍNACÍHO PROUDU	41
6 NÁVRH ZAŘÍZENÍ	44
6.1 VÝVOJOVÉ DIAGRAMY	44
6.2 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE	49



6.3 MĚŘENÍ NA ZAŘÍZENÍ.....	52
6.4 ZAPÍNÁNÍ TRANSFORMÁTORU.....	56
7 ZÁVĚR	58
LITERATURA	60
PŘÍLOHY.....	61

Seznam obrázků

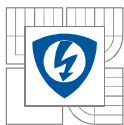
Obrázek 1: Transformátor se zvednutou nádobou [1].....	16
Obrázek 2: Princip působení transformátoru [8].....	17
Obrázek 3: Schéma plášťového provedení jednofázového transformátoru [1].....	18
Obrázek 4: Schéma jádrového provedení jednofázového transformátoru [1].....	18
Obrázek 5: Schéma provedení třífázového transformátoru [1].....	19
Obrázek 6: Rozdělení magnetických obvodů: a) lineární, b) nelineární, c) nelineární s hysterezi, d) lineární parametrický, e) nelineární parametrický [4].	20
Obrázek 7: Linearizovaný magnetický obvod, mezi body $+B_{\max}$, $-B_{\max}$ [4].	21
Obrázek 8: Lineární diskrétní magnetický obvod [4].	21
Obrázek 9: K definici Hopkinsonova činitele rozptylu [4].	23
Obrázek 10: Pro výpočet indukovaného napětí v lineárním magnetickém obvodu. Indukčnost má význam derivace toku podle proudu [4].	24
Obrázek 11: Pro výpočet indukovaného napětí v nelineárním magnetickém obvodu [4].	26
Obrázek 12: Výpočet energie nelineárního magnetického obvodu [4].	26
Obrázek 13: Ztrátová energie hysterezní smyčky [4].	28
Obrázek 14: Třífázové jádro vznikne vynecháním tří centrálních sloupků mezi uzly 1 a 2. Zbývající části tří jader lze uspořádat do rovinného útvaru b) [4].	30
Obrázek 15: Model transformátoru [7].	36
Obrázek 16: Průběh indukčního toku, po připojení transformátoru a) v nejvhodnější okamžik splňující podmínku, b) v nejhorším případě [6].	41
Obrázek 17: Průběh proudu při přechodovém jevu ve zjednodušeném náhradním obvodu [6].	43
Obrázek 18: Základní diagram.....	45
Obrázek 19: Diagram zjištění plochy napětí S_u	46
Obrázek 20: Diagram, metoda 1	47
Obrázek 21: Diagram, metoda 2	48
Obrázek 22: Podklad pro tvorbu plošného spoje, verze 1	49
Obrázek 23: Plošný spoj, přední strana	50
Obrázek 24: Plošný spoj, zadní strana	50
Obrázek 25: Osazený plošný spoj, přední strana	51
Obrázek 26: Osazený plošný spoj, zadní strana	51
Obrázek 27: Měření indukční zátěže	52
Obrázek 28: Měření na transformátoru	53
Obrázek 29: BH křivka	54
Obrázek 30: Zapojení měřicího pracoviště	54
Obrázek 31: Transformátor TT2	55
Obrázek 32: Zapnutí transformátoru TT2, bez demagnetizace.....	56
Obrázek 33: Zapnutí transformátoru TT2, s demagnetizací	57
Obrázek 34: Schéma zapojení, silová část, verze 1.....	61
Obrázek 35: Schéma zapojení, procesor, verze 1.....	62
Obrázek 36: Schéma zapojení, měřicí část, verze 1	63
Obrázek 37: Schéma zapojení, budič HIP4082IBZ, verze 1.....	64



Obrázek 38: Schéma zapojení, komunikace, verze 1	65
Obrázek 39: Schéma zapojení, USB komunikace, verze 1	66
Obrázek 40: Schéma zapojení, ovládání stykačů pomocí relé, verze 1	67
Obrázek 41: Podklad pro tvorbu plošného spoje, verze 2	68
Obrázek 42: Schéma zapojení, ovládání pomocí relé, verze 2	69
Obrázek 43: Schéma zapojení, silová část, verze 2	70
Obrázek 44: Schéma zapojení, měřicí část, verze 2	71
Obrázek 45: Schéma zapojení, procesor, verze 2	72
Obrázek 46: Schéma zapojení, komunikace USB, verze 2	73
Obrázek 47: Schéma zapojení, tlačítka, verze 2	74
Obrázek 48: Schéma zapojení, připojení transformátoru, verze 2	75

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I	primární vinutí
II	sekundární vinutí
III	terciární vinutí
X, x	označení svorky třífázového transformátoru
Y, y	označení svorky třífázového transformátoru
Z, z	označení svorky třífázového transformátoru
A, a	označení svorky třífázového transformátoru
B, b	označení svorky třífázového transformátoru
C, c	označení svorky třífázového transformátoru
0	označení svorky pro uzel třífázového transformátoru
N, n	označení svorky pro uzel třífázového transformátoru
D, d	označení zapojení do trojúhelníku
Y, y	označení zapojení do hvězdy
Z, z	označení zapojení do lomené hvězdy
Ψ	spřažený magnetický tok
I, i	proud
U, u	napětí
p	fyzikální parametr
L	indukčnost
T	čas
Φ	magnetický tok
U_m	magnetické napětí
N	počet závitů
I_m	magnetický tok (proud)
λ_m	magnetická vodivost
B	magnetická indukce
H	intenzita magnetického pole
S	plocha
l	délka
μ	magnetická permeabilita
μ_r	relativní magnetické permeabilita
μ_0	permeabilita vakua
A_L	konstanta jádra
L_d	diferenciální indukčnost
W	energie
W_H	hysterezní energie
S_H	plocha hysterezní smyčky
P_H	ztrátový hysterezní činný výkon
V_{Fe}	objem feromagnetika
γ_{Fe}	měrná hmotnost
m_{Fe}	hmotnost feromagnetika
Z	ztrátové číslo



l_{Fe}	délka magnetického obvodu
$I_{\mu ef}$	magnetizační proud
F	frekvence
Et	elektrotechnické plechy
Ei	elektrotechnické plechy
Eo	elektrotechnické plechy
A_p	činitel stárnutí
P_v	celkové ztráty v jádru
S_j	chladičí povrch jádra
c_j	ochlazovací konstanta
$\Delta\vartheta$	oteplení
M	vzájemná indukčnost
L_1	indukčnost primárního vinutí
L_2	indukčnost sekundárního vinutí
k	činitel vazby
Φ_m	magnetický tok
Φ_r	remanentní magnetický tok
J	magnetická polarizace
$L_{l\sigma}$	rozptylová indukčnost
R	odpor
K	integrační konstanta
S_u	plocha napětí
S_{um}	plocha demagnetovaného napětí
n	počet kroků
n_{Max}	maximální počet kroků
L_μ	příčná indukčnost
DPS	deska plošných spojů
SMT	surface-mount technology
SMD	surface-mount device

1 ÚVOD

Práce pojednává o snížení nárazového zapínacího proudu transformátoru pomocí kybernetického zařízení. Popisuje teorii transformátoru, definice, pojmy a označení, také princip jeho činnosti, konstrukce jednofázových a třífázových transformátorů. Následně rozebírá teorii magnetického obvodu transformátoru a rozdělení magnetických obvodů dle tvaru magnetizační charakteristiky na lineární a nelineární magnetický obvod. Zohledněn je i magnetický obvod jednofázového a trojfázového transformátoru. Dalším bodem práce je obecná charakteristika materiálů, použitých na výrobu transformátorů, a to elektrotechnických plechů Et, Eo, Ei a jejich vlastností.

V následující části práce je zpracován matematický model transformátoru a také princip vzniku zapínacího proudu transformátoru.

Stěžejním bodem práce je návrh a realizace zařízení sloužící k demagnetizaci transformátoru, pro náš případ měření se jedná o třífázový transformátor TT2 s parametry 16 MVA. Tento transformátor se nachází ve vědecko-technickém parku profesora Lista v laboratoři spínacích přístrojů. Práce také popisuje vyrobené kybernetické zařízení, sloužící k demagnetizaci transformátoru. Jedná se o osazenou desku plošného spoje, která umožňuje řízení pomocí mikroprocesoru. Pro pochopení činnosti zařízení je zobrazen vývojový diagram, kde jsou uvedeny kroky k vlastní demagnetizaci. Prvním krokem je zjištění plochy napětí. Ve druhém kroku máme dvě metody, které nám umožní demagnetizaci. První metodou je princip rozpůlení známé plochy napětí. V druhé metodě postupně snižujeme velikost plochy napětí.

Kybernetické zařízení bylo vyzkoušeno měřením na zátěži. Při prvním měření byla zátěží cívka, při druhém měření byl zátěží již skutečný transformátor TT2. V práci jsou zobrazeny skutečné průběhy při zapínání třífázového transformátoru TT2 bez demagnetizace a s demagnetizací.

1.1 Transformátor

Transformátor, elektrický netočivý stroj. Jeho účelem je přeměňovat velikosti některých elektrických veličin na jiné velikosti. Mezi nejvýznamnější z nich patří napětí, proud a impedance. Transformátory také mohou sloužit jako oddělovací prvek. [1]



Obrázek 1: Transformátor se zvednutou nádobou [1].

1.1.1 Definice, pojmy a označení transformátoru

Transformátor, elektromagnetický netočivý stroj, převádějící elektromagnetickou indukci bez pohybu nebo přerušované proudy přiváděné do jedné obvodu nebo přerušované proudy odebírané z druhé obvodu. Mezi účinné části transformátoru patří magnetický obvod a alespoň dvě vinutí.

Magnetický obvod, složený z jader a spojek. Jádru je rovnoběžné s osou vinutí a téměř vždy nese vinutí. Jádru bez vinutí označujeme jako pomocná, sloužící k vedení magnetického toku. Spojka je část magnetického obvodu, kolmá k osám cívek a bez vinutí.

Vinutí, přijímající elektrickou energii se nazývá vstupní neboli *primární* (I.). Vinutí vydávající elektrickou energii je výstupní neboli *sekundární* (II.). Avšak u transformátoru se může vyskytovat více vstupních i výstupních vinutí. Jako pomocné vinutí označujeme vinutí *terciární* (III.), vinutí je uzavřené do sebe. Tomuto vinutí se energie nedodává a ani se z něho neodebírání. Zjednodušeně se dá mluvit o transformátoru jako o elektromagnetickém netočivém stroji s dvojím vinutím, kde I. vinutí je připojeno na stálé napětí sítě, tudíž amplituda magnetického pole se prakticky nemění. Vinutí jsou od sebe izolována a galvanicky oddělena (neplatí pro auto-transformátor, kde jsou vinutí spojena).

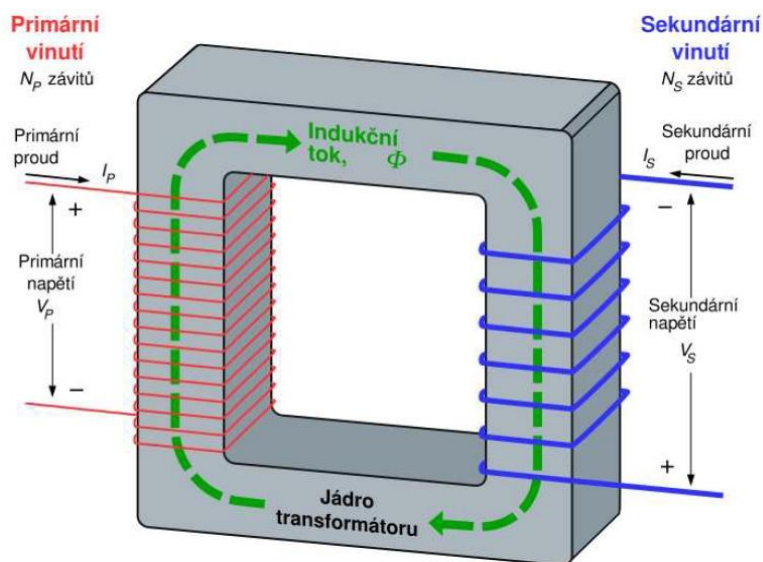
Označení svorek, dřívější označování svorek pro trojfázové transformátory byla písmena X, Y, Z, respektive x , y , z pro fáze a 0 pro uzel. Následně byla zavedena norma pro znaky mezinárodní, a to: A, B, C, (a , b , c) pro fáze a N (n) pro uzel. Při větším počtu vinutí se užívá malých písmen pro vinutí, kde je nejnižší napětí. Pro vinutí s nejvyšším napětím se používá

velkých písmen. Začátek vinutí se označuje indexem, např.: A_0 , b_0 . U jednofázových transformátorů se svorky vyššího napětí označují M , N a svorky nižšího napětí m , n . [1]

1.1.2 Princip funkce transformátoru

Střídavý proud protéká I. vinutím, vyvolá v jeho okolí střídavé elektromagnetické pole, jehož okamžitá velikost je úměrná okamžité hodnotě předcházejícího proudu. Když do obvodu přidáme II. vinutí, indukuje se v něm vlivem magnetického pole napětí, úměrné intenzitě pole a počtu závitů vinutí. Pokud vložíme toto vinutí do silnějšího pole, napětí vzniklé ve vinutí bude vyšší. Zvyšovat napětí můžeme i přidáváním počtu závitů podle Faradayova indukčního zákona:

$$u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1.2)$$

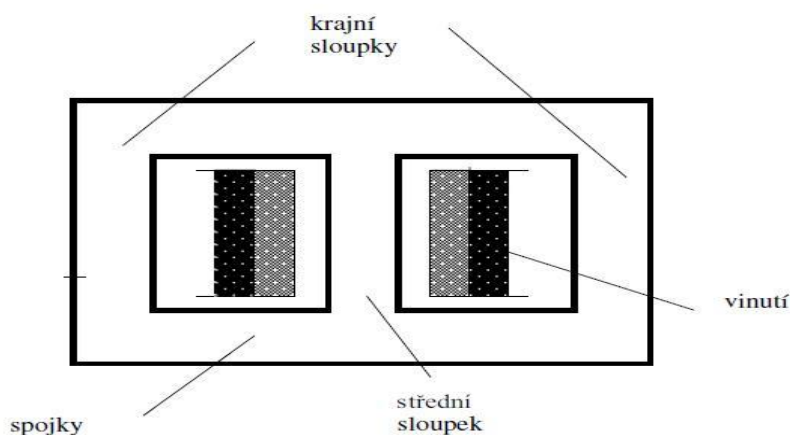


Obrázek 2: Princip působení transformátoru [8]

1.2 Jednofázový transformátor

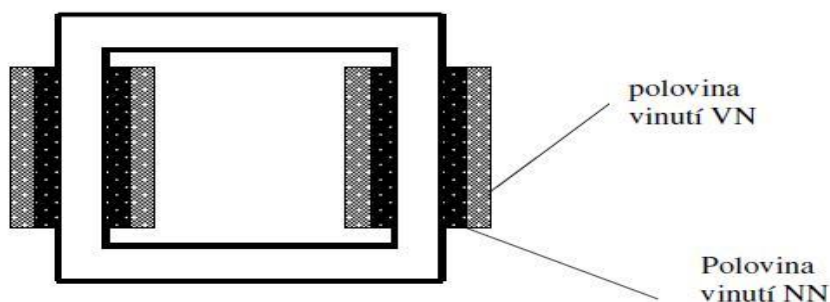
Tento typ transformátorů může být *jádrový* nebo *plášťový*. Používají se jako transformátory malých výkonů (desítky až stovky wattů). Jejich funkcí je obvykle transformace směrem dolů – na nižší napětí.

Transformátory plášťového provedení mají magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí. Vinutí jsou umístěna na dvou jádrech z důvodu pevnější magnetické vazby. Docílíme tím omezení magnetických toků, které mají magnetickou vazbu pouze s jedním vinutím. Nevýhodou plášťového provedení je hmotnost, avšak výhodou je pevnější magnetická vazba. Vinutí je umístěno na prostřední sloupek. Magnetický tok procházející středním sloupkem je rovnoměrně rozdělen do spojek a krajních sloupků. Výhodou je souměrné rozdělení magnetického toku. [1]



Obrázek 3: Schéma plášťového provedení jednofázového transformátoru [1].

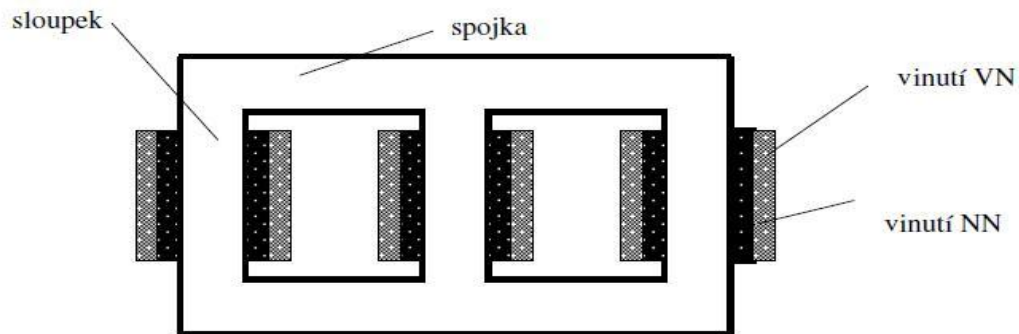
Transformátory jádrového provedení jsou lehčí, ale jejich nevýhodou jsou větší rozptylové toky. Pro zmenšení rozptylových toků se vinutí rozdělí na dvě části. Každá část se umístí na jednotlivý sloupek. Výhodou je lepší chlazení, zvláště u vzduchového chlazení. Jádrové provedení se používá většinou u transformátorů větších výkonů. V současné době se používají jednofázové transformátory s toroidním jádrem, aby se omezil proud potřebný k vytvoření vazebního magnetického toku. [1]



Obrázek 4: Schéma jádrového provedení jednofázového transformátoru [1].

1.3 Třífázový transformátor

Třífázové transformátory slouží k přenosu a distribuci elektrické energie. Jejich výkon dosahuje hodnot až stovek megawattů. Třífázové transformátory se obvykle konstruují jako jádrové. Průřez magnetickým obvodem je všude stejný. U malých transformátorů se používá vinutí z mědi, u energetických transformátorů větších výkonů se používá i z hliníku. Je vhodné, aby z důvodu využití transformátoru smaltované vodiče vinutí vyplňovaly okénka magnetického obvodu transformátoru. [1]



Obrázek 5: Schéma provedení třífázového transformátoru [1].

Třífázový transformátor si můžeme představit jako spojení tří jednofázových transformátorů. Jednotlivé fáze transformátorů se zapojují do trojúhelníku (D, d), hvězdy (Y, y) nebo do lomené hvězdy (Z, z). Spojení do *trojúhelníku* je v sobě uzavřené. Spojení do *hvězdy* má začátky fází připojeny ke svorkám, konce jsou spojeny v uzlu. Uzel je svorkou nulového bodu. Zapojení *lomené hvězdy* má v každé fázi dvě poloviny vinutí zapojené v sérii, avšak navinuté vždy na dvou různých jádrech. Zbývající konce jsou připojeny jednak ke svorkám a jednak k uzlu. [1]

2 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU

Magnetické obvody jsou dle topologického hlediska rozděleny na spojité nebo diskrétní. Diskrétní obvody obsahují feromagnetické jádro s velkou permeabilitou. Magnetický tok prochází ohraničenou (diskrétní) cestou, která je vymezena geometrií jádra. [4]

2.1 Rozdělení magnetických obvodů

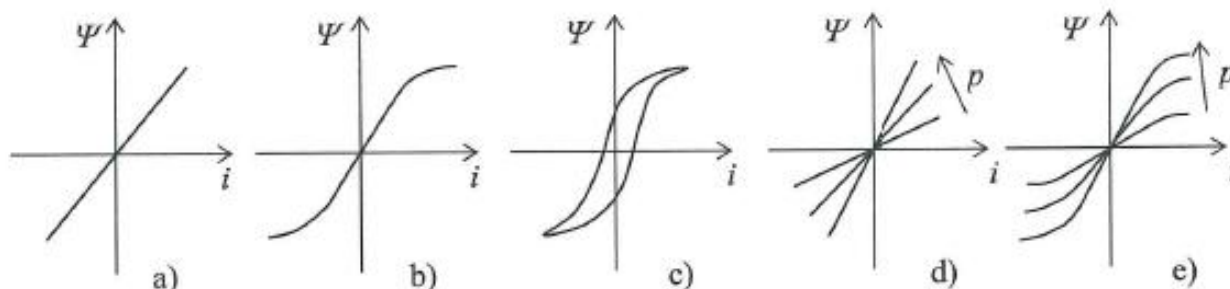
Magnetické obvody dělíme dle tvaru magnetizační charakteristiky ($\Psi = \Psi(i)$), tedy podle tvaru funkční závislosti spřaženého toku na proudu:

- lineární,
- nelineární.

Magnetické obvody:

- parametrické,
- nparametrické.

Parametrický obvod je takový, kdy spřažený magnetický tok Ψ je funkčně závislý na proudu a dalším fyzikálním parametru p , který nám udává například délku vzduchové mezery, teplotu a jiné parametry. Vyskytují se kombinace uvedených vlastností. Tyto možnosti lze vidět na obrázku 6. Hysterezi c) je nutno chápat jako zvláštní a složitější případ nelinearity b). [4]



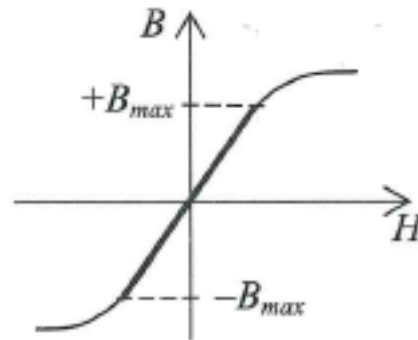
Obrázek 6: Rozdělení magnetických obvodů: a) lineární, b) nelineární, c) nelineární s hystezí, d) lineární parametrický, e) nelineární parametrický [4].

2.1.1 Lineární magnetický obvod

Pokud je magnetický obvod lineární, platí přímá úměra mezi spřaženým tokem a proudem:

$$\Psi = LI \quad \Psi(t) = L i(t) \quad (2.1.1-1)$$

Konstantou úměrnosti je indukčnost L . Rovnice má současně význam statické definice indukčnosti. Je však vidět, že přímá úměra platí dle rovnice (2.1.1-1) i dynamicky, pro okamžité hodnoty veličin měnících se libovolně v čase.

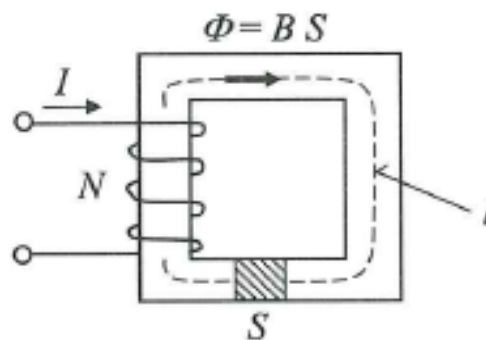


Obrázek 7: Linearizovaný magnetický obvod, mezi body $+B_{\max}$ $-B_{\max}$ [4].

V technické praxi lze považovat i feromagnetický obvod za přibližně lineární, pohybuje-li se pracovní bod pouze v lineární oblasti magnetizační charakteristiky podle obrázku 7. Namísto absolutní magnetizační charakteristiky $\Psi = \Psi(i)$ je výhodnější používat relativní normovanou charakteristiku $B = B(H)$, která není závislá na geometrických rozměrech magnetického obvodu, a proto umožňuje vzájemně porovnávat vlastnosti různých materiálů. [4]

2.1.1.1 Lineární diskretní magnetický obvod – Hopkinsonův zákon

Při zanedbání rozptylových toků jdoucích okolními vzdušnými cestami lze magnetický obvod na obrázku 8 považovat za diskretní. V diskretním obvodu je cesta magnetického toku Φ ostře vytyčena a ohraničena v prostoru. Za diskretní obvod lze v technické praxi považovat všechna feromagnetická jádra jednodušších tvarů, feromagnetikum však nesmí být v přesyceném stavu. Pokud se nachází v přesyceném stavu, klesá jeho permeabilita (tj. měrná magnetická vodivost). [4]



Obrázek 8: Lineární diskretní magnetický obvod [4].

Magnetický obvod na obrázku 8 má po celé délce l konstantní průřez S a konstantní permeabilitu, pak je homogenní. V tom případě lze zavést magneticko-elektrické analogie:

$$U_m = NI = Hl \quad \text{magnetické napětí („ampérváhy“) [A; A/m, m]} \quad (2.1.1.1-1)$$

$$I_m \equiv \Phi = BS \quad \text{magnetický tok („magnetický proud“) [Wb; T, m^2]} \quad (2.1.1.1-2)$$

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} \quad \text{magnetická vodivost [H; Wb, A]} \quad (2.1.1.1-3)$$

Rovnice (2.1.1.1-3) se nazývá Hopkinsonův zákon a je analogií Ohmova zákona.

Pokud dosadíme pravé strany rovnic (2.1.1.1-1) a (2.1.1.1-2) do (2.1.1.1-3), vyjde nám výraz:

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} = \frac{B S}{H l} = \mu \frac{S}{l} \quad (2.1.1.1-4)$$

Z analogie s elektrickou vodivostí vidíme, že magnetická permeabilita μ má význam měrné magnetické vodivosti daného materiálu. Z rovnice (2.1.1.1-3) plyne:

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_r \mu_0 \quad [\text{H/m; T, A/m}] \quad (2.1.1.1-5)$$

kde μ_r je relativní permeabilita materiálu, vztažená k permeabilitě vakua μ_0 . [4]

2.1.1.2 Indukčnost lineárního diskrétního magnetického obvodu

Dosazením do Hopkinsonova zákona (2.1.1.1-3), ve tvaru $U_m \lambda_m = I_m$, rovnice (2.1.1.1-1) a (2.1.1.1-2), získáme vztah:

$$N I \lambda_m = \Phi \quad (2.1.1.2-1)$$

Vynásobení obou stran počtem závitů N :

$$N^2 \lambda_m I = N \Phi \cong \Psi = L I \quad (2.1.1.2-2)$$

Velikost indukčnosti lineárního diskrétního magnetického obvodu je:

$$L = N^2 \lambda_m = N^2 \mu \frac{S}{l} \quad (2.1.1.2-3)$$

U feritových jader je zvykem modifikace rovnice do praktického tvaru:

$$L = N^2 A_L \quad [\text{nH; -, nH/závit}^2] \quad (2.1.1.2-4)$$

kde A_L je tzv. konstanta jádra uváděná výrobcem. Konstanta má význam magnetické vodivosti jádra, ale vyjádřené v praktických jednotkách. [4]

2.1.1.3 Elektromagnetický návrh lineárního diskrétního magnetického obvodu

Porovnáním rovnic získáme vztah:

$$\Psi(t) \cong N\Phi(t) = Li(t) \quad (2.1.1.3-1)$$

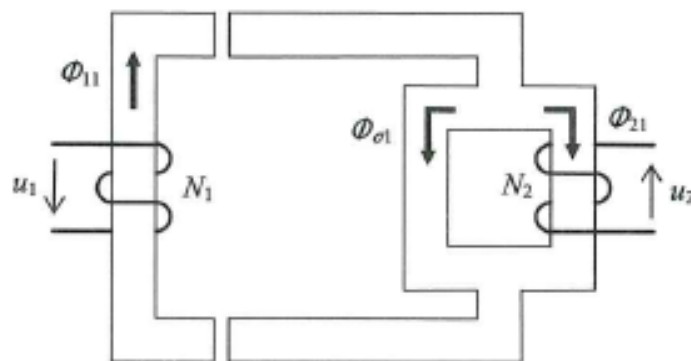
Tento vztah můžeme přepsat do tvaru:

$$NB(t)S = Li(t) \quad (2.1.1.3-2)$$

Pomocí této rovnice můžeme navrhovat tlumivky, transformátory a elektrické stroje s feromagnetickým jádrem. [4]

2.1.1.4 Hopkinsonovy činitele rozptylu

Vyskytují se u diskrétního magnetického obvodu se dvěma nebo více vinutími, u transformátoru nebo motoru. Situaci lze vidět na obrázku 9.



Obrázek 9: Pro definici Hopkinsonova činitele rozptylu [4].

Definice Hopkinsonova činitele rozptylu v :

$$v = \frac{\text{celkový tok } \Phi_{11} \text{ vyslaný vysílací cívkou}}{\text{tok } \Phi_{21} \text{ procházející přijímací cívkou}} \quad (2.1.1.4-1)$$

$$v \geq 1 \text{ vždy}$$

Při určování Hopkinsonova činitele je sekundární (přijímací) cívka ve stavu elektricky naprázdno, což odpovídá stavu magneticky nakrátko (její sloupek o nekonečné magnetické vodivosti se chová vůči toku φ_{21} jako magnetický zkrat). Jestliže bychom sekundární cívku elektricky zkratovali, bude na ní nulové napětí, tedy i nulový integrál z napětí, tedy i nulový tok. Tento stav lze popsat jako stav elektricky nakrátko, což odpovídá stavu magneticky naprázdno (sloupek zkratované „supravodivé“ sekundární cívky se chová vůči toku φ_{21} jako

dokonalý magnetický izolant). Podobně lze určit Hopkinsonův činitel rozptylu v obráceném směru, zaměněním rolí obou cívek. [4]

2.1.1.5 Výpočet indukovaného napětí v lineárním magnetickém obvodu

Magnetizační charakteristika lineárního magnetického obvodu má tvar přímky dané rovnicí:

$$\Psi = \Psi(i) = Li, \text{ resp. } \Psi(t) = \Psi[i(t)] = Li(t) \quad (2.1.1.5-1)$$

Z formálního matematického pohledu může být na magnetizační charakteristiku $\Psi = \Psi(i)$ pohlíženo jako na složenou funkci dynamickou $\Psi(t) = \Psi[i(t)]$, kde v hranatých závorkách je vyznačena vnější statická funkce proudu a kulatými závorkami je vyznačena vnitřní dynamická funkce času. Z rovnic lze získat inverzní magnetizační charakteristiku ve tvaru:

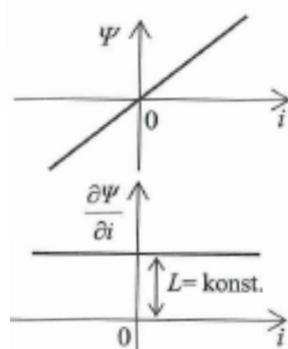
$$i = \frac{\Psi}{L}, \text{ resp. } i(t) = \frac{\Psi(t)}{L} \quad (2.1.1.5-2)$$

Výpočet indukovaného napětí vychází z obecného indukčního zákona napsaného v diferenciálním tvaru ($u(t) = d\Psi(t)/dt$), do kterého dosadíme pravou stranu rovnice:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{dLi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.1.1.5-3)$$

Rozdíl mezi rovnicemi je v tom, že první tvar rovnice je platný v lineárních i nelineárních obvodech. Druhý tvar rovnice platí jen ve zvláštním případě lineárního magnetického obvodu. Na funkci (2.1.1.5-2) můžeme pohlížet jako na složenou funkci. Její derivace je pak rovna součinu derivací vnější a vnitřní funkce:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}, \text{ kde } L = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \quad (2.1.1.5-4)$$



Obrázek 10: Pro výpočet indukovaného napětí v lineárním magnetickém obvodu. Indukčnost má význam derivace toku podle proudu [4].

Na obrázku 10 je geometricky znázorněno, že indukčnost má význam derivace toku podle proudu: $L = \partial \Psi / \partial i$. Pouze u lineárního obvodu je tato derivace konstantní – nezávislá na proudu i . [4]

2.1.2 Nelineární magnetický obvod

Jedná se o předpoklad nelineární magnetizační charakteristiky bez hystereze dle obrázku 11. Matematické operace jsou nezbytné při realizaci matematických modelů nelineárních obvodů v prostředí Matlab-Simulink. Nelineární magnetizační charakteristiku je možné zadat dvěma způsoby:

- Jako jednorozměrnou převodní tabulku $\rightarrow B = B(H)$ nebo inverzní tabulku $H = H(B)$, kde dosadíme dostatečně hustě naměřené hodnoty. Program Simulink následně automaticky dopočítá hodnoty mezi sousedními body pomocí polynomů a vytvoří tak spojitou funkci.
- Jako analytickou funkci, odvozenou z vnitřních fyzikálních dějů ve feromagnetiku.

Jestliže je magnetický obvod bez vzduchové mezery, magnetizační charakteristiku $\Psi = \Psi(i)$ lze získat z funkce $B = B(H)$ pomocí známých převodních vztahů:

$$\Psi \cong N\Phi = NS_{Fe}B(H), i = \frac{l_{Fe}}{N}H \quad (2.1.2-1)$$

2.1.2.1 Výpočet indukovaného napětí v nelineárním magnetickém obvodu

Magnetizační charakteristika nelineárního magnetického obvodu má tvar obecné nelineární funkce:

$$\Psi = \Psi(i), \text{ resp. } \Psi(t) = \Psi[i(t)] \quad (2.1.2.1-1)$$

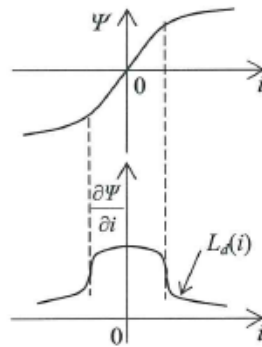
Z formálního matematického pohledu lze na magnetizační charakteristiku $\Psi = \Psi[i]$ pohlížet jako na složenou dynamickou funkci $\Psi(t) = \Psi[i(t)]$, kde za hranatými závorkami je vnější statická funkce proudu a kulatými závorkami je vyznačena vnitřní dynamická funkce času. Z rovnic lze získat inverzní magnetizační charakteristiku:

$$i = i[\Psi], \text{ resp. } i(t) = i[\Psi(t)] \quad (2.1.2.1-2)$$

Výpočet indukovaného napětí vychází z obecného indukčního zákona napsaného v diferenciálním tvaru, tj. z rovnice $u(t) = d\Psi(t)/dt$, do které dosadíme složenou funkci. Pak její derivace je rovna součinu vnější a vnitřní funkce:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{d\Psi[i(t)]}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di(t)}{dt} = L_d[i] \frac{di(t)}{dt}, \text{ kde } L_d[i] = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \quad (2.1.2.1-3)$$

Význam má pouze diferenciální indukčnost L_d , tj. směrnice tečny k magnetizační charakteristice, což je znázorněno geometricky na obrázku 11. Indukčnost počítaná jako směrnice sečny nemá matematický ani fyzikální význam. Proto je nutné v matematických modelech pracovat s diferenciální permeabilitou, nikoli však s permeabilitou amplitudovou.



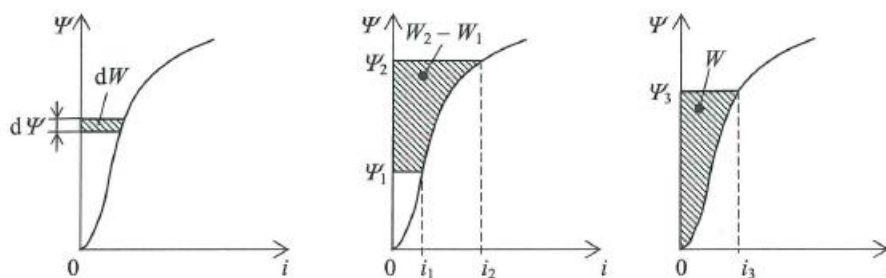
Obrázek 11: Pro výpočet indukovaného napětí v nelineárním magnetickém obvodu [4].

Obrázek 11 znázorňuje diferenciální indukčnost L_d . Ta je přibližně konstantní v nepřesycené oblasti magnetizační charakteristiky. Vně této oblasti indukčnost rychle klesá, při velkých proudech až na indukčnost samotné vzduchové cívky (jako by bylo odstraněno feromagnetické jádro z cívky). [4]

2.1.2.2 Energie nelineárního magnetického obvodu

Diferenciální přírůstek magnetické energie je nutno vyjádřit pomocí okamžitého výkonu vztahem:

$$dW(t) = p(t)dt = u(t)i(t)dt = i(t)dt \frac{d\Psi(t)}{dt} = i(t)d\Psi(t) \quad (2.1.2.2-1)$$



Obrázek 12: Výpočet energie nelineárního magnetického obvodu [4].

Diferenciály času dt v rovnici číslo 2.1.2.2-1 se vykrátily a zbyl pouze diferenciál toku $d\Psi(t)$. To znamená, že je nutno integrovat dle proměnné $\Psi(t)$ na obrázku 12. V geometrickém smyslu je energie rovna ploše ležící nad magnetizační charakteristikou.

První způsob výpočtu energie:

Do rovnice je dosazena za proud $i(t)$ pravá strana inverzní magnetizační charakteristiky:

$$dW(t) = i(t)d\Psi(i) = i[\Psi(t)]d\Psi(t) \quad (2.1.2.2-2)$$

Integrací rovnice získáme okamžitou energii akumulovanou v magnetickém obvodu:

$$W(t) = W_0 + \int_t dW(t) = W_0 + \int_{\Psi(t)} i[\Psi(t)]d\Psi(t) \quad (2.1.2.2-3)$$

kde W_0 je libovolná počáteční energie nashromážděná v cívce v předcházejícím ději. Neurčitý integrál je možno přepsat na určitý integrál:

$$W(t_2) - W(t_1) = \int_{\Psi(t_1)}^{\Psi(t_2)} i[\Psi(t)]d\Psi(t) \quad (2.1.2.2-4)$$

následně je formálně upraven do statického tvaru:

$$W_2 - W_1 = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i[\Psi]d\Psi \quad (2.1.2.2-5)$$

Druhý způsob výpočtu energie:

Do rovnice je dosazena za napětí $u(t)$ pravá strana rovnice:

$$dW(t) = u(t)i(t)dt = L_d[i] \frac{di(t)}{dt} i(t)dt = L_d[i]i(t)di(t) \quad (2.1.2.2-6)$$

Integrací je získána okamžitá energie akumulovaná v magnetickém obvodu:

$$W(t) = W_0 + \int_t dW(t) = W_0 + \int_{i(t)} L_d[i]i(t)di(t) \quad (2.1.2.2-7)$$

Neurčitý integrál je přepsán na určitý integrál:

$$W(t_2) - W(t_1) = \int_{i(t_1)}^{i(t_2)} i(t)L_d[i]di(t) \quad (2.1.2.2-8)$$

který je formálně přepsán do statického tvaru:

$$W_2 - W_1 = \int_{i_1}^{i_2} i L_d[i] di \quad (2.1.2.2-9)$$

Uvedené rovnice platí především dynamicky, v okamžitých hodnotách. Známé statické tvary vyplynou z rovnic sekundárně jako zvláštní případy. [4]

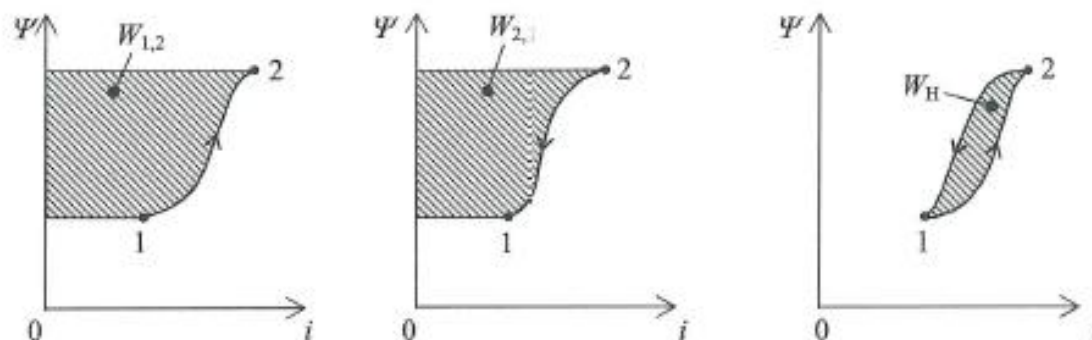
2.1.2.3 Hysterezní ztráty

Ztrátová energie přeměněná v teplo při jednom oběhu hysterezní smyčky je přímo rovna ploše smyčky podle obrázku 13. Tvzení plyne z výpočtů provedených v předchozí kapitole. Srovnáním obrázků je vidět, že energie $W_{1,2}$ akumulovaná v magnetickém obvodu při pohybu z bodu 1 do bodu 2 je větší než energie $W_{2,1}$ odevzdaná zpět do zdroje při pohybu z bodu 2 do bodu 1. Rozdílem těchto energií je tepelná ztrátová hysterezní energie W_H , která má velikost:

$$W_H = W_{1,2} - W_{2,1} \quad (2.1.2.3-1)$$

Rovnice rozměrově souhlasí:

$$[J] = [Ws] = [Wb] \cdot [A] = [Vs] \cdot [A].$$



Obrázek 13: Ztrátová energie hysterezní smyčky [4].

Jestliže pracujeme s normovanou magnetizační charakteristikou $B = B(H)$, pak plocha hysterezní smyčky S_H má význam měrné ztrátové energie vztažené na 1 m^3 , protože lze rozměrově psát:

$$\left[\frac{J}{\text{m}^3} \right] = [T] \cdot \left[\frac{A}{\text{m}} \right] = \left[\frac{Vs}{\text{m}^2} \right] \cdot \left[\frac{A}{\text{m}} \right]$$

Ztrátový hysterezní činný výkon – je definován jako střední hodnota okamžitého výkonu na opakovací periodě T :

$$P_H = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} W_H = f W_H = f S_H V_{Fe} \quad [W; Hz, \frac{J}{m^3}, m^3] \quad (2.1.2.3-2)$$

Objem feromagnetika V_{Fe} je možné pomocí měrné hmotnosti γ_{Fe} přepočítat na hmotnost m_{Fe} :

$$P_H = f S_H V_{Fe} = f \frac{S_H}{\gamma_{Fe}} m_{Fe} = Z m_{Fe} \quad [W; \frac{W}{kg}, kg] \quad (2.1.2.3-3)$$

kde Z má význam ztrátového čísla – měrných ztrát. V praxi je nutné započítat do měrných ztrát i ztráty vířivé. [4]

2.2 Magnetický obvod třífázového transformátoru

Na obrázku 14 je naznačeno vytvoření trojfázového jádra ze tří samostatných jednofázových jader. Jestliže je distribuční soustava vyvážená, pak primární napájecí napětí splňují rovnici:

$$u_{1A}(t) + u_{1B}(t) + u_{1C}(t) = 0 \quad (2.2-1)$$

Obě strany rovnice lze integrovat dle času, aniž by byla porušena platnost:

$$\int u_{1A}(t) dt + \int u_{1B}(t) dt + \int u_{1C}(t) dt = 0 \quad (2.2-2)$$

Sprážený tok je integrálem z napětí a v každém okamžiku platí:

$$\Psi_{1A}(t) + \Psi_{1B}(t) + \Psi_{1C}(t) = 0 \Rightarrow N_1 \Phi_{1A}(t) + N_1 \Phi_{1B}(t) + N_1 \Phi_{1C}(t) = 0 \quad (2.2-3)$$

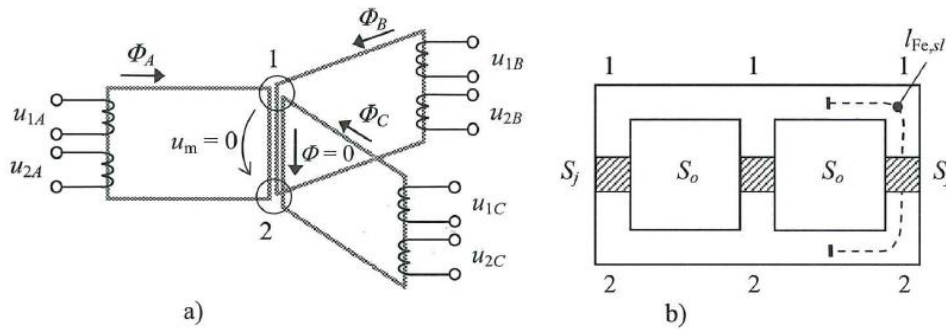
Po vykrácení rovnice počtem primárních závitů:

$$\Phi_{1A}(t) + \Phi_{1B}(t) + \Phi_{1C}(t) = 0 \quad (2.2-4)$$

Součet fázových magnetických toků Φ je v každém okamžiku roven nule. Nulový je i součet toků, tekoucích trojnásobným prostředním sloupkem na obrázku 14 mezi magnetickými uzly 1 a 2. Pak je mezi těmito body virtuální magnetický zkrat, jelikož magnetické napětí mezi body je nulové:

$$u_m(t) = \frac{\Phi(t)}{\lambda_m} = \frac{0}{\lambda_m} = 0 \quad (2.2-5)$$

Existence tří centrálních paralelních sloupků je zbytečná a sloupky se mohou odstranit. Po této úpravě je získáno trojfázové jádro, což znázorňuje obrázek 14.



Obrázek 14: Třífázové jádro vznikne vynecháním tří centrálních sloupků mezi uzly 1 a 2. Zbývající části tří jader lze uspořádat do rovinného útvaru b) [4].

Z existence virtuálního magnetického zkratu mezi body 1 a 2 nastávají dvě situace:

- Délka magnetického obvodu l_{Fe} příslušejícího jedné fázi je rovna vzdálenosti uzlů 1 a 2 – výšce sloupku l_{Fe} .
- Magnetické obvody jednotlivých fází jsou dokonale odděleny a neovlivňují se. [4]

2.2.1 Určení počtu primárních závitů

Primární vinutí trojfázového transformátoru jsou zapojena do hvězdy, napětí U_{1ef} má význam fázového napětí. Primární vinutí trojfázového transformátoru jsou zapojena do trojúhelníku, napětí U_{1ef} má význam sdruženého napětí:

$$N_1 = \frac{U_{1ef}}{\sqrt{2}\pi f B_{\max} S_j k_{p,Fe}} = \frac{U_{1ef}}{4,44 f B_{\max} S_j k_{p,Fe}} \quad (2.2.1-1)$$

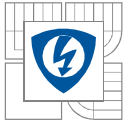
2.2.2 Výpočet magnetizačního proudu

Fázový magnetizační proud lze určit z rovnice, která byla odvozena pro jednofázový transformátor. Uvedená rovnice je v přeznačené podobě:

$$I_{\mu ef} = \frac{I_{\mu ampl}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi f B_{\max}^2 S_j k_{p,Fe} l_{Fe,sl}}{U_{1ef} \mu_0 \mu_{rFe}} \left(1 + \frac{\mu_{rFe} l_v}{l_{Fe,sl}} \right) \quad (2.2.2-1)$$

Za hodnotu $l_{Fe,sl}$ je nutné dosadit přibližnou výšku svislého sloupku. Rovnice slouží pouze ke kontrole velikosti magnetizačního proudu. Z rovnice plynou tyto skutečnosti:

- Velikost magnetizačního proudu nemůže vývojář nijak ovlivnit, jestliže chce železo magneticky využít maximální možnou indukci $B_{\max}$.
- Vzduchová mezera je velmi škodlivá, pokud zlomek v závorce je srovnatelný s jedničkou, zvyšuje se magnetizační proud a je ohříváno vinutí.
- Velikost magnetizačního proudu je úměrná objemu železa.
- Velikost magnetizačního proudu roste donekonečna, jestliže se primární napětí limitně blíží nule.



Magnetizační proud a magnetizační reaktance ωL_1 vyhovuje Ohmovu zákonu:

$$I_{\mu\text{ef}} = \frac{U_{1\text{ef}}}{\omega L_1} \quad (2.2.2-2)$$

Rovnice (2.2.2-1) a (2.2.2-2) platí pouze v lineárním magnetickém obvodu. [4]

3 MATERIÁLY – ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY

Magnetické obvody transformátorů jsou zhotoveny z elektrotechnické oceli vyválcované do tenkých tabulí nebo pásů, které jsou označeny jako elektrotechnické plechy. Jedná se o elektrotechnické plechy E_o , E_i a E_t . Nejstarším typem jsou oceli značené E_t (elektrotechnické plechy tabulové). Mechanické i magnetické vlastnosti jsou odlišné od plechů, které jsou vyráběny v současné době. Odlišná je i výroba a technologické zpracování do magnetických obvodů. Magnetické vlastnosti E_o a E_i plechů jsou propracovanější, a také více technologicky ovladatelnější. Požadavky jejich dalšího vývoje zvyšují nároky na jejich magnetické vlastnosti a nároky na jejich dobré zpracování rychlostí a kruhovými nůžkami z pásů do tvarů, ze kterých je sestaven magnetický obvod. Cílem je dosažení úzkých tolerancí tloušťky plechů a neproměnnost tloušťky v různých místech pro dosažení co největšího plnění magnetického obvodu a co největší stálost magnetických vlastností. Kritickými se stávají magnetické vlastnosti u elektrických strojů velkých výkonů, u kterých se nepříznivě zmenšuje poměr jejich povrchu k objemu, tím dochází ke zhoršení jejich chlazení. Přípustné oteplení se stává jednou z rozhodujících podmínek omezujících jejich výkon. Magnetické vlastnosti elektrotechnických plechů určených pro výrobu strojů malých výkonů nejsou tak kritické. Projevuje se vliv mechanického zpracování plechů do výrobků, stahování a kvalita lisovacího nástroje. U transformátorů s výkonem nad 100 kVA z celkových ztrát připadá asi 50% na ztráty způsobené magnetickým materiálem jádra. U transformátorů s výkonem nad 10 kVA asi 25%. U transformátorů s výkonem do 1 kVA dochází ke ztrátám kolem 10%. Pokud budeme uvažovat o transformátoru s výkonem 1 kVA, účinností 95% a podílem ztrát v jádru 20%, na jádro připadne 10 W ztrátového výkonu. Vezme-li se na složení jádra tak kvalitní plech, že dojde ke snížení ztrát na polovinu, zvýší se tím účinnost tohoto transformátoru jen o 0,5%. Kvalitní elektrotechnické plechy nepodmiňují úspěšnou výrobu malých transformátorů. Kvalitní elektrotechnické plechy rozvíjejí možnost výroby velkých transformátorů a strojů. U malých transformátorů je výběr vhodného materiálu v první řadě otázkou ekonomickou a až v druhé řadě otázkou technickou. Požadavkem ke zvyšování technických vlastností zařízení vyráběných z těchto elektrotechnických plechů při současném snižování ceny je, aby střední hodnoty magnetických vlastností byly co nejbližší krajní zaručované hodnotě a aby tyto vlastnosti zůstaly zachovány i po dalším zpracování. Poté jsou vlastnosti materiálů dobře využity.

Technologická náročnost výroby kvalitních tříd elektrotechnických plechů má vliv na cenu. Třídění vyrobených plechů ovlivňuje i počet tříd kvality, které jsou odstupňovány v desetinách a jednotkách ztrátového čísla. Konstruktor rozhoduje o volbě materiálu jádra transformátoru. Tato volba je výsledkem technické a hospodářské úvahy. Ke zvolené velikosti jádra o hmotnosti m_j a volbě plechu náleží celkové ztráty v jádru P_v . Transformátor v přirozeném prostředí může povrchem jádra, které je ve styku s volně proudícím vzduchem, odvést jen určitou hodnotu ztrátového výkonu, který odpovídá oteplení $\Delta\theta$, ochlazovací konstantě c_j a chladicímu povrchu jádra S_j . Tuto podmínku splňují plechy, u kterých nedojde k překročení vyznačené hodnoty magnetické indukce. Čím vyšší ztrátové číslo plechu a čím levnější plech, tím bude použita nižší indukce. Vyrůstají pak nároky na oteplení vinutí, protože je nutné použít vodič o menším průměru. Dojde-li k vyřešení technického problému, nemusí být vyřešené cenové hledisko. [5]

3.1 Elektrotechnické plechy Et

Plechy Et se vyráběly v několika magnetických vlastnostech charakterizovaných ztrátovým číslem p_1 . Poslední vyráběný typ u nás byla ocel Et 1,3 a Et 1,3s.

Plech Et 1,3 byl vyráběn v tloušťce 0,35 mm, plech Et 1,3s v tloušťce 0,5mm. Plech Et 1,3 byl za studena doválcovaný pro zvýšení činitele plnění. Činitel plnění vzrostl z 92% na 96%. Plechy kromě toho byly 100% tříděny dle ztrátového čísla $p_{1,5}$. Et 1,3 byl nejkvalitnějším typem elektrotechnických ocelí, které u nás byly vyráběny technologií „za tepla“.

Plechy Et se ztrátovým číslem p_1 do 1,8 W/kg byly značeny jako transformátorové plechy. Od 1,8 W/kg jsou značeny jako dynamové, které sloužily pro výrobu motorů. Z jejich historie se dosud dodržuje název dynamové, protože jejich původní použití bylo pro výrobu zdrojů stejnosměrného proudu. Transformátorové plechy jsou nahrazovány plechy typu Eo, dynamové plechy typu Ei.

Čísla charakterizující tvrdost plechů se určují počtem ohybů o 180° ve směru válcování a ve směru kolmém k tomuto směru. Údaj o počtu ohybů je důležitý k posouzení tvrdosti materiálu pro jeho zpracování. Čím méně ohybů snese, tím je křehčí a tím i tvrdší. Více se otupují nástroje. Proto lze nástrojem bez přebroušení zhotovit asi jen 100 000 výseků z transformátorového plechu Et 1,3 a až 300 000 výseků z dynamové ocele Et 2,6, avšak až 3x tolik výseků z plechu Ei. Velký počet výseků příznivě ovlivňuje lisování ze svitků, ve kterých jsou plechy Ei dodávány, dále izolace svitků organickým lakem zn. Sulfizol, který se chová jako mazadlo, a konečně i zlepšená konstrukce rychlolistů i konstrukce postupových nástrojů. U plechů Eo pro zvýšený obsah křemíku a keramickou izolaci Kerizol, který nepůsobí jako mazadlo, se takového počtu výseků nedosahuje. Kerizol je keramická izolace, která snáší teploty i přes 800°C . Výseky z plechů Eo se tepelně regeneračně zpracovávají při této teplotě po několik hodin, aby se odstranilo mechanické napětí vzniklé při výrobě výseků, které je magneticky poškozuje. Měrné ztráty plechů Et se zjišťovaly Epsteinovým přístrojem. Tabulové plechy se šíří do 1000 mm byly tříděny podle p_1 a lakovány po jedné straně.

Pro elektrotechnické plechy Et je charakteristický vyšší obsah křemíku. Transformátorové plechy s nejmenšími ztrátami mají do 4,5 % obsahu křemíku, dynamové plechy s největším ztrátovým číslem nad 2 %.

Vyšší obsah křemíku a tvrdost plechu je u všech těchto elektrotechnických plechů v nepřímé závislosti na jejich ztrátách a indukci nasycení. [5]

3.2 Elektrotechnické plechy Eo

Tabulové plechy pro stavbu transformátorů jsou nahrazovány kontinuálně vyráběnými svitky pásu Eo válcovanými za studena. Technologickým zpracováním dochází k orientaci krystalů, a tím k magnetické textuře. Železo krystaluje v kubické soustavě. Hrana krychle je snadným směrem magnetování, směr plošné úhlopříčky je nesnadný. Po válcování za studena, které je pro Eo plechy charakteristické, následuje tepelné zpracování pásů v průběžných pecích v ochranné atmosféře. Toto tepelné zpracování je charakterizováno oduhličením a rekrystalizací.

Pásky jsou oboustranně opatřovány izolační vrstvou Kerizol o tloušťce 2 až 5 mikronů, která zabraňuje vzájemnému svaření závitů svitků při tepelném zpracování a také vzájemně izoluje plechy v magnetickém obvodu pro zmenšení ztrát vířivými proudy. Průběžné je rovněž

měření mechanických i magnetických vlastností. Pásky mají hladký povrch, rovnoměrné mechanické i magnetické vlastnosti. Pásky tepelně zpracovávají se ke spotřebiteli dodávají ve svitcích o průměru do 920 mm a o šíři pásu 500 až 950 mm a hmotnosti do 2 t nebo o šíři 500 až 950 mm, délce 1500 a 2000 mm a hmotnosti až 2,5 t. Výseky z těchto plechů se již obvykle dále tepelně nezpracovávají. Je-li nutné, doporučuje se regenerační tepelné zpracování při teplotě 820 °C po dobu dvou hodin v ochranné nebo normální atmosféře podle druhu izolace. Tyto plechy jsou označovány jako Eo (elektrotechnický plech orientovaný). Elektrotechnické plechy Eo se v zahraniční literatuře značí jako plechy se strukturou GOSS (Grain Oriented Silicon Steel).

Plech Eo se vyrábí v druzích Eo 9, Eo 10, Eo 11, Eo 12, Eo 13, Eo 15 a Eo 17. Vyrábí se v tloušťkách 0,28 až 0,35 mm s tolerancí $\pm 20\%$. Nejpoužívanější jsou Eo 10 a Eo 11. Číslo znamená ztrátové číslo $p_{1,5}$, vyjádřené v desetinách W/kg. Vyrábí se také plech o tloušťce 0,5 mm. V zahraničí se vyrábí plechy v tloušťkách 0,32; 0,30; 0,27; 0,12; 0,08; 0,05 a 0,025 mm. Plechy Eo jsou vhodné pro výrobu výseků EI.

Nízkých ztrát je dosaženo jen tehdy, je-li uzavřen indukční tok ve směru válcování. V tomto směru dosahují plechy indukci blízkou nasycení při nižších polích než plechy Et. Právě tyto vlastnosti způsobují jejich široké uplatnění, ačkoliv jejich cena na 1 kg je proti ceně plechů Et několikanásobně vyšší. Navzdory tomu pro menší ztráty v magnetickém obvodu a snadněji dosahované vyšší hodnoty indukce umožňují zmenšení magnetických obvodů, takže při rozboru celkových nákladů se dosahovalo úspor několika tisíc Kč na 1 t plechů.

Činitel plnění plechů Eo při tlaku 40 až 50 N na cm^2 je 97 až 98 %. Činitel stárnutí:

$$A_p = \frac{p_b - p_a}{p_a} \cdot 100 [\%] \quad (3.2-1)$$

Činitel se zjišťuje ze změny $p_{1,5}$ u plechů ohřátých po dobu 120 hodin na 120 °C (p_a je ztrátové číslo před stárnutím, p_b po stárnutí). Je menší než 3 %. Počet ohybů podél směru válcování má být větší než 3. Izolační odpor zjištěný při tlaku do 100 N/ cm^2 je větší než 20 Ω/cm^2 . Při větším tlaku dojde k porušení izolace. Nebezpečí ztráty izolačních vlastností vrstvy mechanickým tlakem nepříznivě ovlivňuje i magnetovací charakteristiku. V jádrech transformátorů by tento tlak neměl být větší než 40 až 50 N/ cm^2 .

Při zpracování plechů Eo vzniká odpad, ze kterého se po ořezání na určité šířky vyrábí C jádra. Tím se zlepší využití těchto materiálů. [5]

3.3 Elektrotechnické plechy Ei

Tyto plechy se používají při výrobě elektromotorů a pro výseky plechů pro jádra malých transformátorů. Plechy jsou magneticky izotropní. Magnetické vlastnosti měřené v různých směrech, hlavně ve směru válcování nebo kolmo k němu, jsou prakticky stejné. Technologie pásů Ei válcovaných za studena má podobný charakter jako technologie výroby plechů Eo. Vzhledem k plechům Et mají plechy Ei podstatně nižší ztráty, a to převážně složku hysterezních ztrát. Zlepšují se však i mechanické vlastnosti. Plech je hladší, dosahuje dobrého činitele plnění. Pásky se dodávají ke spotřebiteli ve svitcích o hmotnosti do 1 t a o průměru svitku do 1,2 m a šíři pásu od 500 mm do 1000 mm. Plechy v délkách od 1400 do 2500 mm a

šíři 1000 mm. Výroba ze svitků umožňuje výrobcům elektrických strojů využít progresivní technologie, např. lisování automatickými rychlolisy. Tato technologie však vyžaduje dobré a rovnoměrné mechanické vlastnosti pásů.

Plechý Ei jsou vyráběny v kvalitě Ei 33, Ei 35, Ei 40, Ei 45, Ei 50, Ei 55, Ei 60, Ei 70, Ei 80 o tloušťkách 0,50 mm a 0,65 mm $\pm$ 8 %. Čísla opět znamenají ztráty v desetinách wattu na kilogram při 1,5 T, 50 Hz. [5]

3.4 Amorfni magnetické materiály

Materiálem pro stavbu výkonových transformátorů jsou plechy vyráběné technologií rychlým chlazením. Mají proti současným ocelím jen třetinové ztráty. Pro stavbu distribučních transformátorů jsou již používány. Technologie výroby magnetických materiálů technologií rychlého chlazení umožňuje vyrábět pásy o tloušťce i jen několik desítek mikronů. Těžiště výroby leží v tloušťkách 0,1 mm a 0,2 mm. Největší šíře doposud vyráběných pásů je 200 mm. Magnetickými obvody jsou toroidy a C jádra. Pro transformátory v měničích napětí malých výkonů v oblastech spínání několika megahertz se touto technologií vyrábějí dráty o průměru několika desítek μm . Pro nulovou magnetostrikci se uvažují pro „ohebné“ transformátory v lékařství.

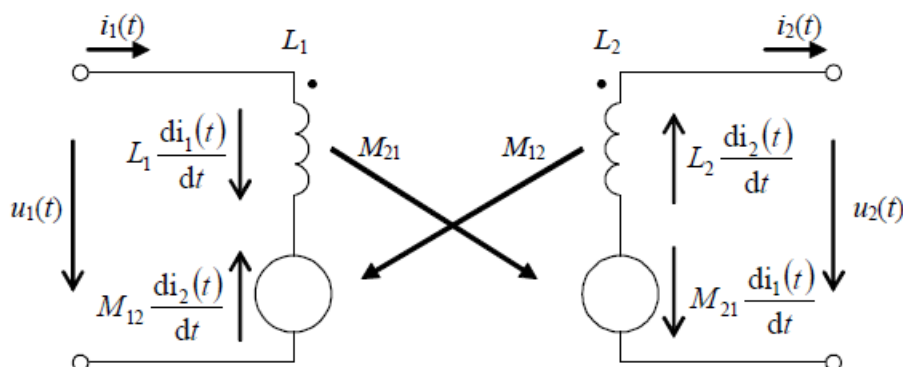
Pro rychlé chlazení (z tekutého stavu do pevného za 1 ms až 2 ms) nedojde k nukleaci zárodku krystalického zrna vůbec nebo je jejich růst velmi omezen. Ochlazování se uskutečňuje na chlazeném rotujícím válci, na který stříká tekutý kov. Výsledkem je nanokrystalická struktura. Také jsou velmi odlišné vlastnosti od kovových krystalických látek. Mají omezenou tepelnou stabilitu, nízkou magnetickou anizotropii, velký elektrický odpor, nízkou, některé z nich nulovou magnetostrikci, velkou korozivzdornost, velkou pevnost a velkou otěruvzdornost. Mimo silové transformátory velkých výkonů, kde bude těžiště jejich uplatnění, se používají pro měřicí transformátory proudu, magnetofonové hlavy, stínění, spínací zdroje, magneticky regulované usměrňovače a odrušovací tlumivky.

Pro nekystalickou strukturu se označují také jako magnetické amorfni látky nebo magnetická skla. Používá se několik druhů složení, např. CoFeSiB , CoNbZr , FeSiB .

Amorfni magnetické materiály se vyznačují nízkou koercivitou (1 až 2 A/m) a vysokou permeabilitou (až 10^6). Jsou rozvinuty dva systémy. Systém se základem Fe má indukci nasycení 1,8 T. Systém se základem Co jen 0,55 T, zato však termomagnetickým zpracováním dosáhne ve směru působení pole pravoúhlost 0,99. V příčném směru má normální hysterezní smyčku. Při zachování koercivity má nízkou remanenci. Pro nízkou až nulovou magnetostrikci snášejí tyto materiály až tisíckrát větší mechanické deformace bez ovlivnění magnetických vlastností. Výrobky z tohoto systému mají mnohem menší ztrátový výkon, ale jsou dražší. [5]

4 MODEL TRANSFORMÁTORU

Matematický model je souhrn matematických vztahů, popisujících fyzikální systém. Dle obrázku 15 obsahuje model transformátoru dvě vzájemné indukčnosti, tj. dvě libovolné cívky, které mají vlastní a vzájemné indukčnosti a dva zdroje indukovaného napětí, vznikajícího v protilehlém vinutí při průchodu proudu vinutím opačným. Indukované napětí je úměrné derivaci proudu. Konstantou úměrnosti je právě vzájemná indukčnost M . [7]



Obrázek 15: Model transformátoru [7].

Z principu reciprocity je patrné, že v lineárních a nelineárních magnetických obvodech jsou vzájemné indukčnosti M_{12} a M_{21} stejné a budou značeny pouze M . Následně vztah mezi indukčnostmi M , L_1 a L_2 bude:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (4-1)$$

kde M je vzájemná indukčnost, L_1 a L_2 indukčnost primárního a sekundárního vinutí, k je číselník vazby, $k \in (0,1)$.

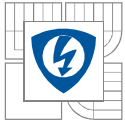
Podle číselníku vazby lze transformátory třídit:

- $k < 1$ rozptylový transformátor, technicky realizovatelný,
- $k \rightarrow 1$ transformátor těsný, technicky realizovatelný,
- $k = 1$ transformátor dokonalý, technicky nerealizovatelný,
- $k = 1, L_1 \rightarrow \infty$ transformátor ideální, technicky nerealizovatelný.

Následně lze sestavit napěťové rovnice podle II. Kirchhoffova zákona, odpovídající obvodovému modelu transformátoru:

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - k\sqrt{L_1 L_2} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-2)$$

$$u_2(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} = k\sqrt{L_1 L_2} \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-3)$$



kde $u_1(t), u_2(t)$ je okamžitá hodnota primárního a sekundárního napětí, a $i_1(t), i_2(t)$ je okamžitá hodnota primárního a sekundárního proudu. Tyto rovnice slouží k vytvoření modelů transformátorů napětí i proudu s lineárním a nelineárním magnetickým obvodem. [7]

5 ZAPÍNACÍ PROUD TRANSFORMÁTORU

Při zapínání transformátoru nastává přechodový děj, kterým rozumíme děj mezi dvěma ustálenými stavy obvodu. [6]

5.1 Připínání transformátoru

Intenzita magnetického pole v jádře transformátoru je dána Maxwellovou rovnicí pro kvazistacionární pole:

$$\oint_C H_t dl = \oint_C H_t dl = \sum_k I_k \quad (5.1-1)$$

Integrační dráha C tvoří magnetický obvod a intenzita magnetického pole je tečnou k integrační dráze $H \parallel dl$. U transformátorů jsou budící proudy magnetického pole funkcí času $I_k = I_k(t)$ stejně jako intenzita magnetického pole $H = H(t)$.

Magnetický obvod je možné rozdělit na části, kde budou stejné geometrické i magnetické vlastnosti jádra. Úseky uvažujeme jako homogenní a integrál $\oint H_t dl$ můžeme nahradit součtem přes jednotlivé části magnetického obvodu, jenž bude popisovat jeho heterogenní strukturu. V případě potřeby lze do výpočtu zahrnout i vzduchovou mezeru v magnetickém obvodu.

Magnetické pole transformátoru je tvořeno cívkou, kde jednotlivými závity protéká stejně velký proud, proto můžeme pravou stranu rovnice nahradit součtem příspěvků jednotlivých cívek:

$$\sum_j H_j(t) l_j = \sum_K N_K I_K(t) \quad (5.1-2)$$

kde N_K je počet závitů cívky a I_K je proud protékající cívkou.

Magnetický tok je dán indukovaným elektromotorickým napětím podle Faradayova zákona:

$$u_i = - \frac{d\phi}{dt} \quad (5.1-3)$$

Magnetický tok lze definovat vztahem:

$$\phi = \iint_S B dS = \iint_S B_n dS \quad (5.1-4)$$

kde B_n je složka B kolmá k ploše dS . Magnetický tok i magnetická indukce transformátoru je časově proměnná $\phi = \phi(t)$ a $B = B(t)$. Pokud je magnetické pole homogenní, tok bude:

$$\phi(t) = SB(t) \quad (5.1-5)$$

Použití indukčního zákona na celou cívku s počtem závitů N . Indukované napětí v cívkce bude:

$$u_i(t) = -NS \frac{dB(t)}{dt} \quad (5.1-6)$$

Vztah mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B je v ideálním lineárním materiálu dán permeabilitou μ , respektive relativní permeabilitou μ_r :

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (5.1-7)$$

V reálném nelineárním magnetiku je magnetická indukce nelineární funkcí intenzity magnetického pole $B = f(H)$. Nelinearita je odražena tvarem hysterezní smyčky při magnetování feromagnetika. Magnetizace je funkcí intenzity pole, sama sebe, teploty, času, mechanického napětí a dalších veličin. Popis magnetickou polarizací J :

$$B(t) = \mu_0 (H(t) + M(H, M, \vartheta, t, \dots)) = \mu_0 H(t) + J(H, J, \vartheta, t, \dots) \quad (5.1-8)$$

Přechodový jev vzniká při připínání transformátoru k napájecí síti, proto předpokládáme, že distribuční síť je tvrdý zdroj harmonického napětí:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi) \quad (5.1-9)$$

kde ψ vyjadřuje okamžik připnutí transformátoru k síti.

Napětí sítě je svorkovým napětím vinutí u , které lze převést na elektromotorické napětí u_i pomocí Kirchhofova zákona:

$$u_{i1}(t) = u(t) - R_1 i_1(t) - L_{1\sigma} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (5.1-10)$$

Odpor primárního vinutí R_1 transformátoru, rozptylovou indukčnost $L_{1\sigma}$ a nelinearitu magnetického obvodu zanedbáme.

Dosazením průběhu indukovaným napětím do Faradayova indukčního zákona získáme po integraci:

$$\int \frac{U_m}{N} \sin(\omega t + \psi) dt = -\phi(t) \quad (5.1-11)$$

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\omega t + \psi) + k = -\phi(t) \quad (5.1-12)$$

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

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) + k = -\Phi_r \quad (5.1-13)$$

$$k = \frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) - \Phi_r \quad (5.1-14)$$

Průběh výsledného magnetického toku po zapnutí transformátoru je dán:

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} [\cos(\omega t + \psi) - \cos(\psi)] + \Phi_r \quad (5.1-15)$$

Respektive:

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \left[\sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) - \cos(\psi) \right] + \Phi_r \quad (5.1-16)$$

Existence stejnosměrné složky magnetického toku při přechodovém ději je závislá na okamžiku připojení transformátoru k síti ψ a na remanentním magnetickém toku Φ_r . Na ní je superponován magnetický tok v ustáleném stavu:

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.1-17)$$

kde hodnota Φ_m je amplituda magnetického toku v ustáleném stavu.

Nejvhodnější připojení transformátoru nastává v okamžiku:

$$\Phi_m \cos \psi - \Phi_r = 0 \quad (5.1-18)$$

jelikož nevznikne žádný přechodový jev.

Pro nulový remanentní tok $\Phi_r = 0$ je to, když napětí sítě prochází maximem $\psi = \frac{\pi}{2}$.

Maximální tok poteče jádrem v čase $\omega t = \frac{\pi}{2}$ a jeho amplituda odpovídá amplitudě v ustáleném stavu $\Phi_{max} = \Phi_m$, což ilustruje obrázek 16.

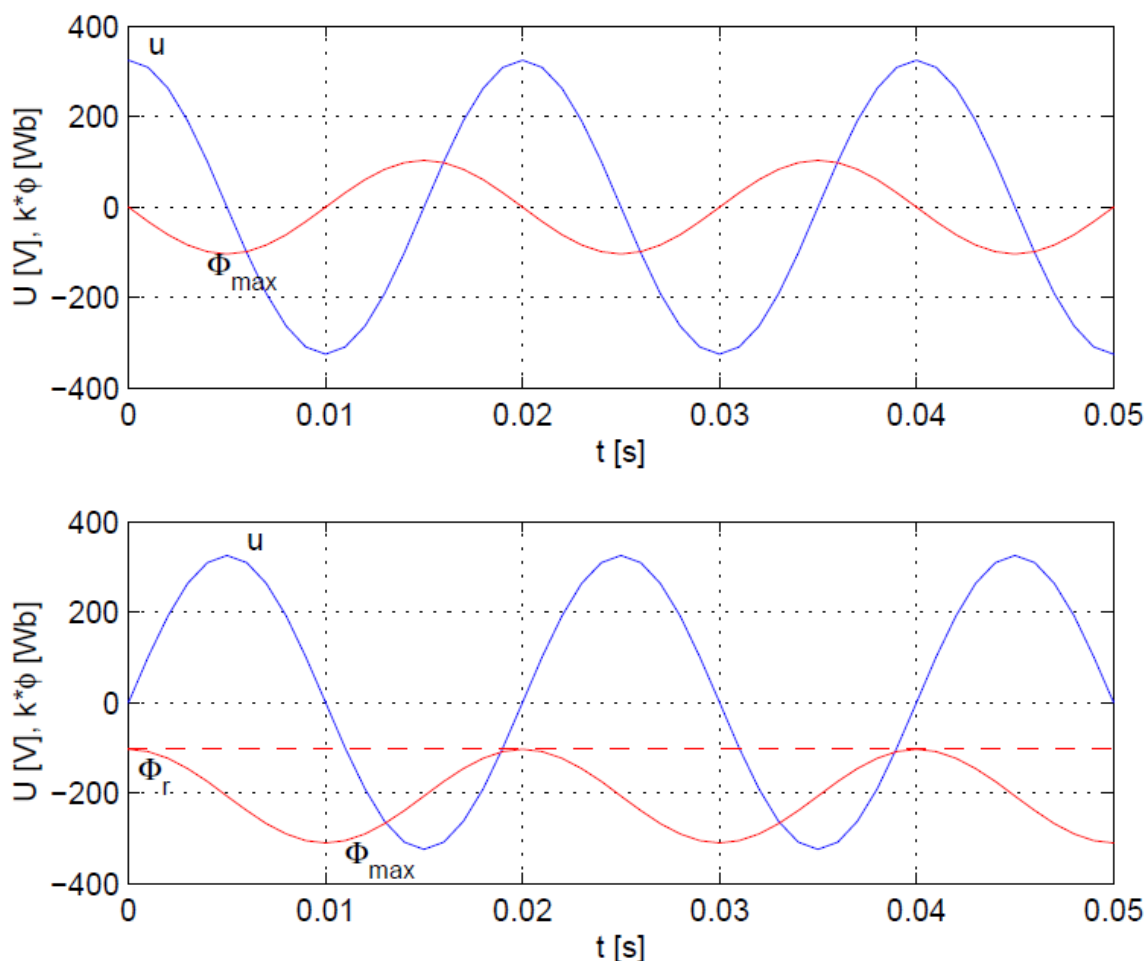
Maximální indukční tok poteče jádrem v případě, když výraz $\Phi_m \cos \psi - \Phi_r$ bude mít maximální hodnotu:

$$\max (\Phi_m \cos \psi - \Phi_r) \quad (5.1-19)$$

Tento stav nastane v situaci, kdy je transformátor připojen k síti při průchodu napětí nulou $\psi = 0$ s uvažováním maximálního záporného počátečního toku Φ_r . Potom v čase $\omega t = \pi$ po připojení k síti dosáhne magnetický tok teoretické hodnoty:

$$\Phi_{\max} = 2\Phi_m + \Phi_r \quad (5.1-20)$$

Skutečná velikost magnetického toku bude výrazně menší vlivem konečné velikosti impedance primárního obvodu. [6]



Obrázek 16: Průběh indukčního toku, po připojení transformátoru a) v nejvhodnější okamžik splňující podmínku, b) v nejhorším případě [6].

5.2 Velikost zapínacího proudu

Velký proud protéká vinutím při zkratech, velkých přetíženích a také po připojení nezátíženého transformátoru v určitém okamžiku na síť. Velikost zapínacího proudu je ovlivněna mimo jiné impedancí primárního vinutí. V jednoduchém přiblížení je uvažován

pouze odpor vinutí. Poměry v jednoduchém sériovém RL tvořeném odporem vinutí a hlavní indukčností transformátoru popisuje rovnice:

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} = \sqrt{2} U_0 \sin(\omega t + \psi) \quad (5.2-1)$$

kde úhel ψ je okamžik připnutí transformátoru k napájení. Odpor R a indukčnost L jsou konstantní. Počáteční podmínka je $i(0) = 0$.

Obecné řešení rovnice:

$$i_0 = K e^{\lambda t} \quad (5.2-2)$$

kde $\lambda = -R_1/L_1$, lze vyjádřit časovou konstantou

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \quad (5.2-3)$$

Partikulární řešení z podmínek v ustáleném stavu $t \rightarrow \infty$:

$$R_1 I_0 + j\omega L_1 I_0 = \sqrt{2} U_0 e^{j\psi} \quad (5.2-4)$$

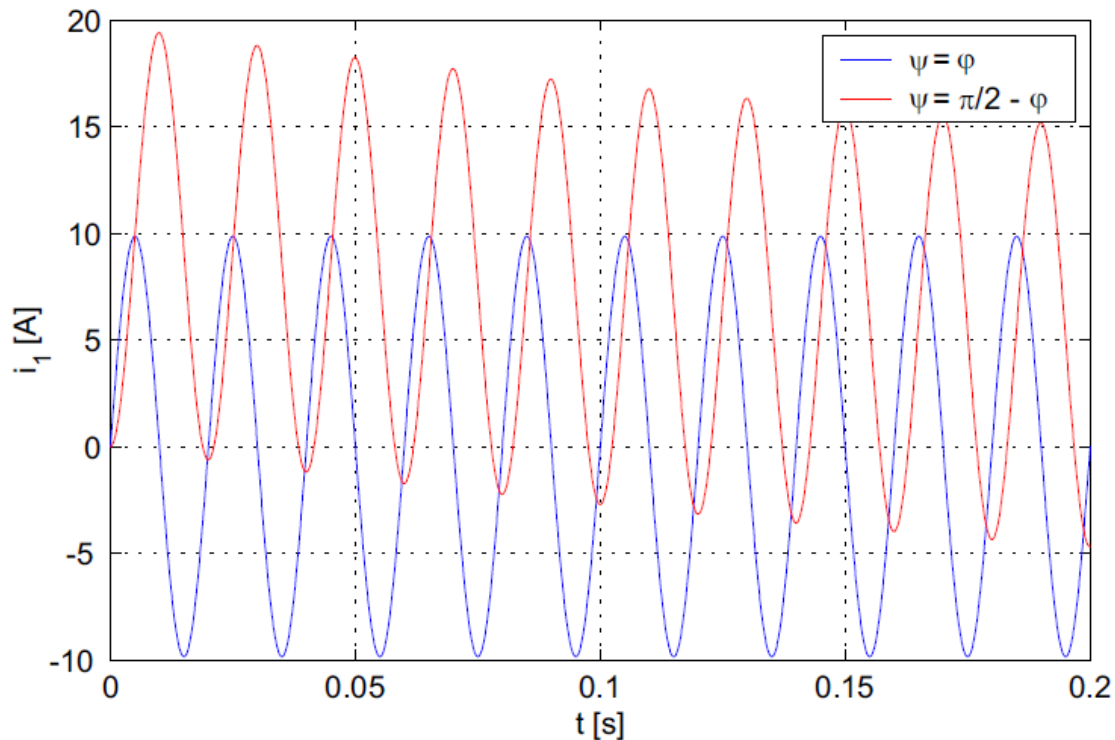
$$I_0 = \frac{\sqrt{2} U_0 e^{j\psi}}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} e^{j(\psi - \varphi)} \quad (5.2-5)$$

Impedance Z a φ bude:

$$Z = \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}; \varphi = \arctan \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (5.2-6)$$

Přepsáním rovnice (5.2-5) z fázorového vyjádření do časového získáme partikulární řešení ve tvaru:

$$i_p = \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (5.2-7)$$



Obrázek 17: Průběh proudu při přechodovém jevu ve zjednodušeném náhradním obvodu [6].

Řešením je tedy:

$$i = i_0 + i_p = K e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (5.2-8)$$

Integrační konstanta K je vypočtena z počáteční podmínky:

$$0 = K + \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\psi - \varphi) \quad (5.2-9)$$

Proud při přechodovém ději zjednodušeného obvodu bude:

$$i = \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \varphi)] \quad (5.2-10)$$

Rozborem extrémů je zjištěno, že přechodový děj nenastane v případě $\psi = \varphi$ a bude největší při $\psi = \pi/2 - \varphi$. Proudů jsou uvedeny na obrázku 17. [6]

6 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

V této části diplomové práce je uveden vývojový diagram znázorňující funkci zařízení. Je zde popsán mechanismus zjištění velikosti plochy napětí a dvě metody demagnetizace. Následně je vypracován návrh plošného spoje a popis již osazeného plošného spoje sloužícího k demagnetizaci transformátoru, pomocí kterého obstaráváme samotné měření na připojené induktivní zátěži (cívce) a také měření na již připojeném transformátoru TT2. Hlavní částí jsou naměřené skutečné průběhy zapínání transformátoru TT2 bez přípravku pro demagnetizaci a s přípravkem pro demagnetizaci.

6.1 Vývojové diagramy

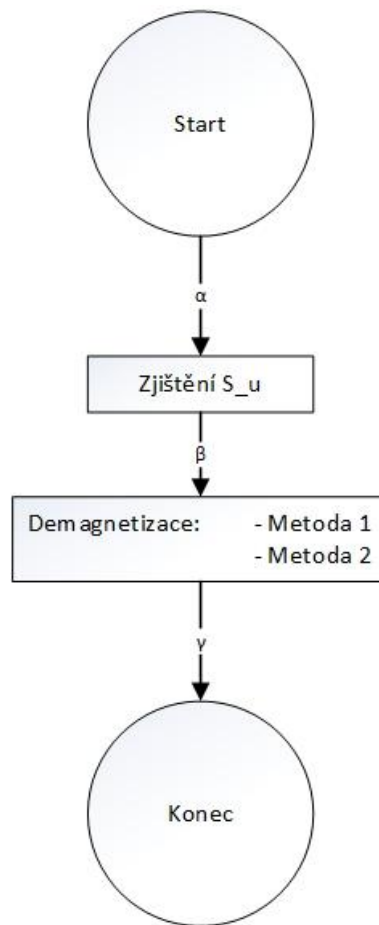
Vývojový diagram je symbolický algoritmický jazyk. Je použit pro zobrazení algoritmu sloužícího k popisu principu funkce zařízení. Algoritmický jazyk se skládá z přesně definovaných symbolů s jednoznačným významem a pravidel, jak symboly používat ve vzájemné souvislosti. Vývojový diagram se skládá ze symbolů představujících začátek a konec programu. Startující a koncové symboly jsou znázorněny pomocí kruhů, kde je obsažena fráze určující začátek a konec daného procesu.

Ve vývojovém diagramu jsou použity spojnice, jejichž tvar je svislá nebo vodorovná čára. Spojnice zobrazují směr řídicího toku a slouží ke spojení jednotlivých symbolů ve vývojovém diagramu. Standardní směr toku informací je shora dolů a zleva doprava. V podstatě spojnice vstupuje do symbolu shora nebo zleva a vystupuje dole nebo vpravo. Pokud není směr dodržen, je vhodné spojnice označit otevřenou nebo plnou šipkou, určující daný směr. Pro zvýšení názornosti vývojového diagramu je vhodné spojnice opatřit šipkou již při spojování symbolů. V případě potřeby je možné spojnice propojovat. Křížení spojnic není doporučováno. Dojde-li ke křížení, nevznikne žádný vzájemný vztah a žádná změna ve směru toku dat.

Symbol obdélníku představuje jakýkoliv druh zpracování nebo provedení definované operace nebo skupiny operací. Výsledkem je transformace informace. Vstup do symbolu obdélníku je z libovolné strany, vstupů může být několik. Vstupy mohou být samostatné nebo se může jednat o výslednou spojnicí, tvořenou dílčími spojnicemi. Výstup ze symbolu je vždy jeden.

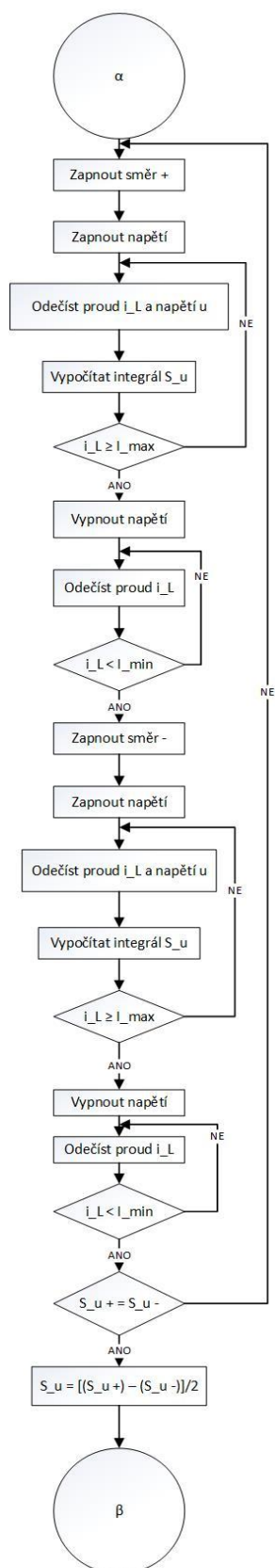
Symbol kosočtverce představuje rozhodovací nebo přepínací funkci. Vstup do symbolu je pouze jeden a má alternativní výstupy. Tento symbol je aktivován po vyhodnocení podmínek uvnitř symbolu. Výsledné vyhodnocení podmínek je zaznačeno u výstupních spojnic, představujících řešení dané podmínky. [9]

Na obrázku 18 je základní diagram popisující funkci programu, sloužícího ke snížení zapínacího proudu transformátoru. Na základní diagram je navázáno rozšiřujícími diagramy pro zjištění plochy napětí a diagramy pro obě metody demagnetizace. Prvním krokem vedoucím k vlastní demagnetizaci je zjištění plochy napětí S_u . Krok pro zjištění plochy napětí je uveden v následující části a graficky znázorněn v diagramu na obrázku 19. První metoda demagnetizace je uvedena v diagramu na obrázku 20. Druhá metoda je na obrázku 21.



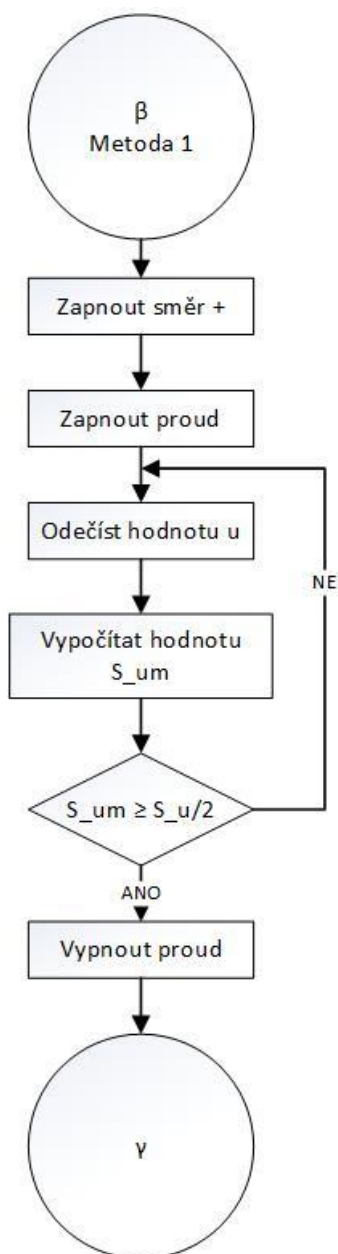
Obrázek 18: Základní diagram

Základem úspěšné demagnetizace je splnění všech daných podmínek ve vývojových diagramech. Pro první krok je určující velikost plochy napětí S_u . Nejprve je zapnuto kladné napětí v čase $t = 0$ s, což je okamžik ukončení definován dosažením proudu. Sleduje se proud obvodu i_L a současně se sleduje velikost napětí u . Z hodnoty napětí bude vypočítán integrál plochy napětí $S_u = \int_0^t u dt$. V případě, že $i_L > I_{max}$, je vypnut proud a ukončeno načítání plochy napětí S_u . Pokud není splněna podmínka, je nutné opět sledovat proud obvodu i_L a napětí u do té doby, než bude splněna daná podmínka $i_L > I_{max}$. Druhým bodem je sledování proudu nulovou diodou, $i_L < I_{min}$. Není – li splněna podmínka, je třeba načítat znovu proud i_L , do doby, než dojde ke splnění podmínky. Ve třetím bodě je zapnuto záporné napětí, sledování proudu obvodu i_L , současné sledování napětí u a vypočítání integrálu plochy napětí S_u . V případě $i_L > I_{max}$, je vypnut proud a ukončeno načítání plochy napětí S_u . Následně je sledován proud nulovou diodou, $i_L < I_{min}$.



Obrázek 19: Diagram zjištění plochy napětí S_u

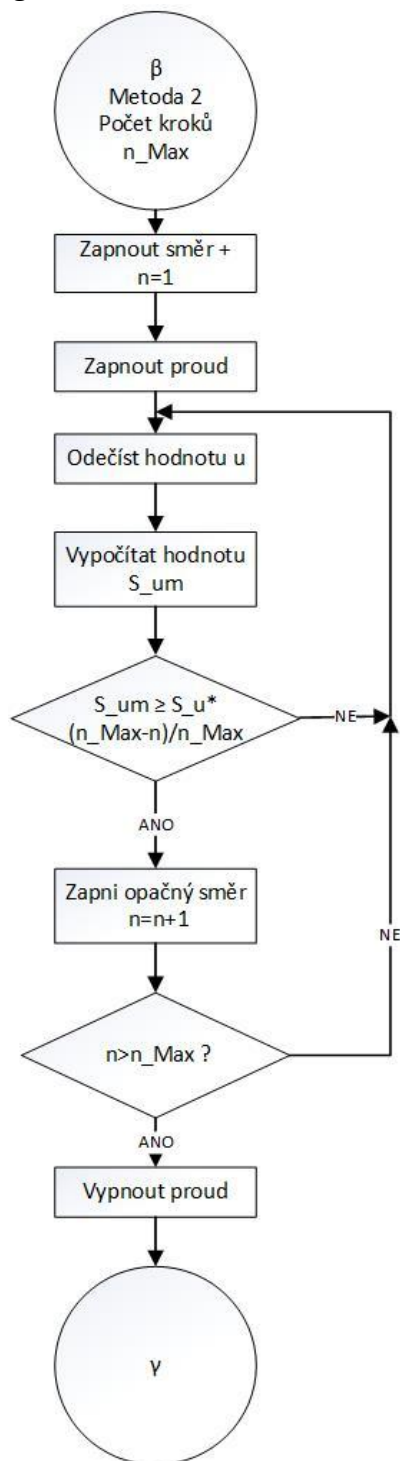
Pro první metodu demagnetizace je známa plocha napětí S_u , dojde k zapnutí kladného směru. Nutno odečíst hodnotu napětí a vypočítat hodnotu plochy demagnetovaného napětí S_{um} . Pokud je hodnota S_{um} větší, než polovina plochy napětí S_u , dojde k ukončení a demagnetizace je hotová. Jestliže není hodnota S_{um} větší než polovina plochy napětí, cyklus se opakuje znovu načítáním hodnoty napětí u , dokud daná podmínka není splněna. Jakmile je podmínka splněna, máme transformátor demagnetován.



Obrázek 20: Diagram, metoda 1

Pro druhou metodu je nutné zvolit počet kroků n , pak je zapnut směr kladného napětí u a odečtena jeho hodnota. Vypočítáním zjistíme hodnotu S_{um} . Tato hodnota odpovídá podmínce, $S_{um} \geq S_u * (n_{Max} - n) / n_{Max}$. Pokud není splněna podmínka, je nutné znovu odečíst hodnotu napětí a celý krok opakovat, než dojde ke splnění této podmínky. Po splnění první

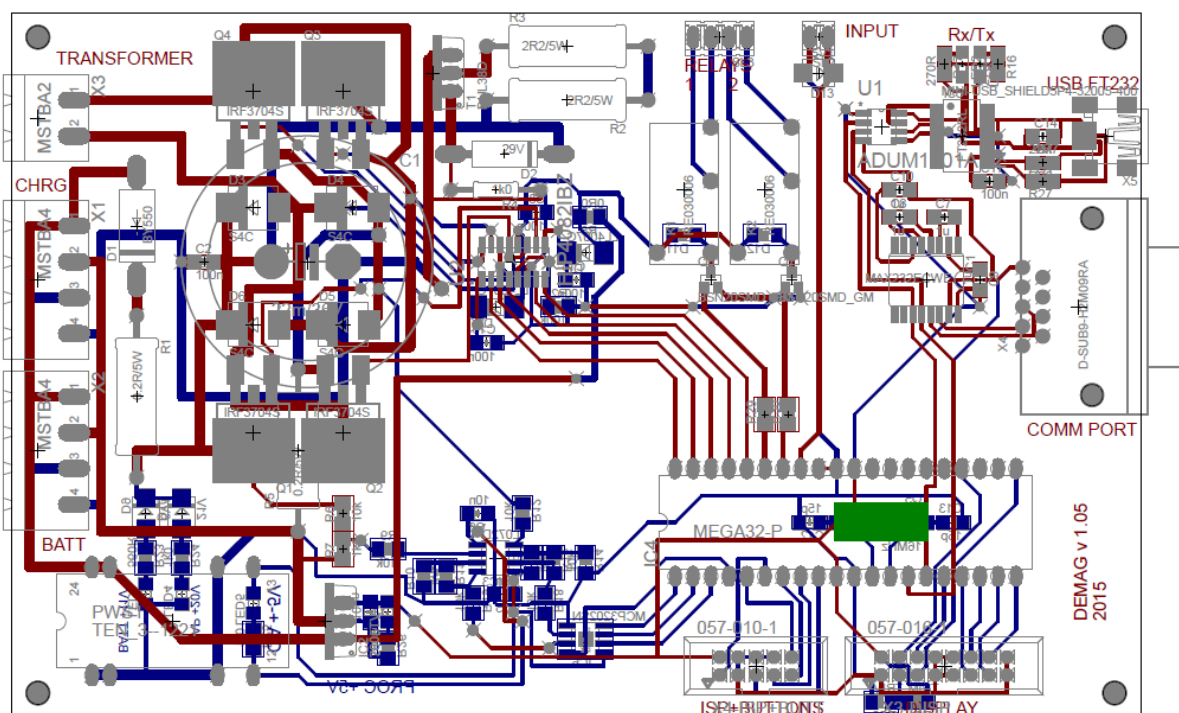
podmínky je zapnut opačný směr a následuje navýšení počtu kroků n , zároveň je nutno dodržet podmínku, že počet kroků n je větší než maximální počet kroků n_{Max} . Jestliže není splněna podmínka, dojde k opakování celého cyklu do té doby, než tato podmínka je splněna. Po jejím splnění je proces demagnetizace hotov.



Obrázek 21: Diagram, metoda 2

6.2 Návrh plošného spoje

V programu Eagle 6.4 bylo navrženo schéma zapojení a následně vygenerován podklad pro výrobu plošného spoje. Obrázek 22 ilustruje podklad pro výrobu plošného spoje. Lze vidět označení jednotlivých součástek, které jsou použity při osazení. Vodivé trasy jsou zaznačeny barevně, kde červená barva značí trasy na přední stranu plošného spoje a modrá barva značí trasy na zadní straně plošného spoje.

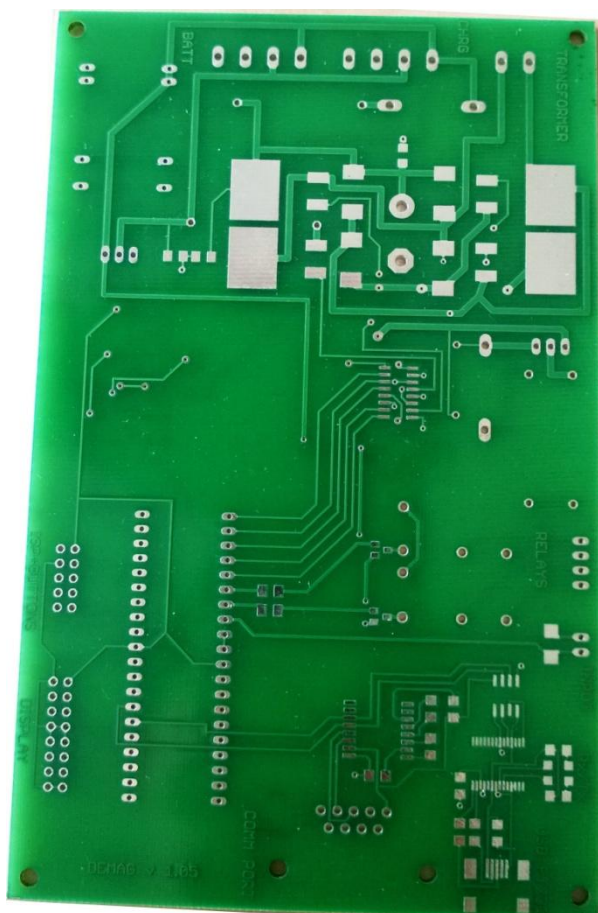


Obrázek 22: Podklad pro tvorbu plošného spoje, verze 1

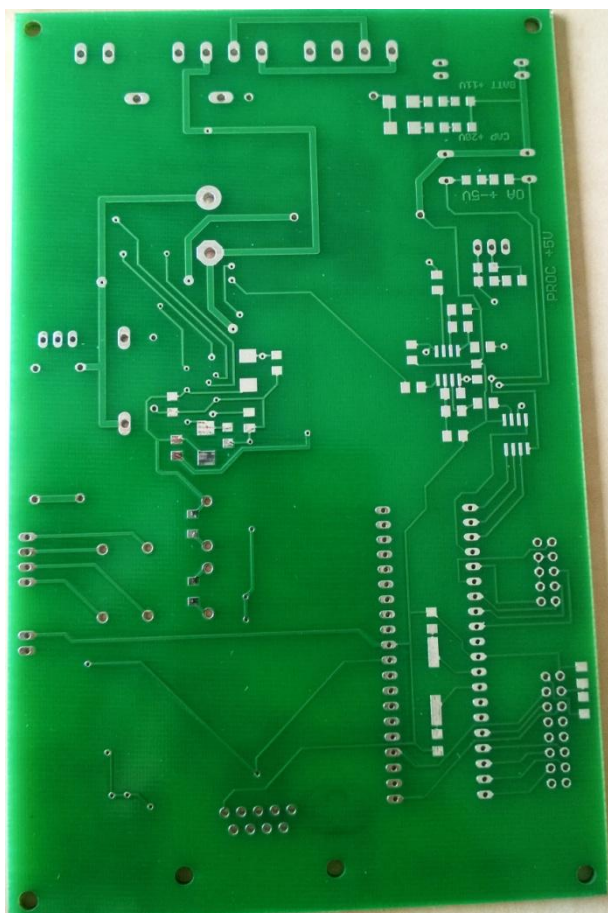
Vyrobená deska plošných spojů (DPS) je oboustranná. Deska plošných spojů je opatřena izolační vrstvou a odkryté jsou pouze pájecí plošky a průchody, které jsou prokovené. Vodivé trasy jsou izolační vrstvou chráněny před poškozením. Součástky jsou propojeny vodivými trasami, vytvořenými leptáním z měděných folií, nalepených na izolační desce.

Zčásti je využíváno součástek vývodových, které jsou prostrčeny a následně připájeny skrze vyvrtané díry v DPS. Pro výrobu DPS je také využívána technologie SMT, což značí technologii povrchové montáže. Součástky používané pro tento typ výroby se značí SMD a mají kontaktní plošky pro připevnění.

Na obrázku 23 je neosazená přední strana plošného spoje a na obrázku 24 je neosazená zadní strana plošného spoje. Z těchto obrázků lze vidět plošný spoj s ploškami pro připájení SMD součástek a současně vyvrtaných průchodů pro připojení vývodových součástek. Také jsou patrné vodivé trasy mezi ploškami.



Obrázek 23: Neosazený plošný spoj, přední strana



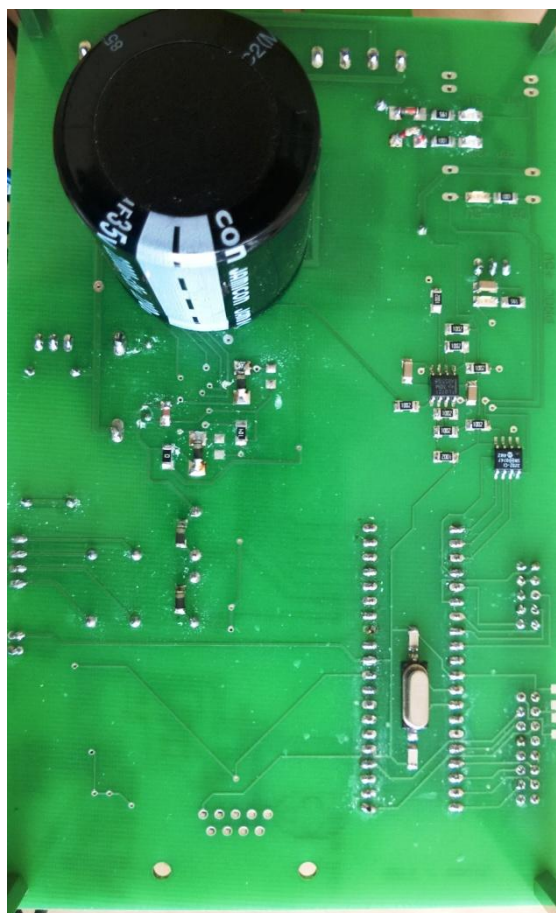
Obrázek 24: Neosazený plošný spoj, zadní strana

Na obrázku 25 je již osazený plošný spoj. Toto zařízení se skládá ze silové části, komunikační části, ovládací části a části pro měření napětí a proudu na zátěži. Silová část musela být upravena z důvodu špatné volby budiče. Úprava proběhla odebráním tranzistoru Q3 a zkratem tranzistoru Q1. Po úpravě přidáním relé, sloužícího k otáčení vinutí, je silová část ovládána přímo z procesoru pomocí tranzistoru Q4. Tato úprava byla nutná pro zajištění chodu zařízení. Odpor nad tranzistory Q1 a Q2 tvoří bočník, což je paralelně zapojený rezistor, který slouží ke zvětšení měřicího rozsahu. Na plošném spoji jsou dvě relé pro ovládání stykačů. Dále zde vidíme komunikační část. Je osazena jen část pro komunikaci pomocí mini-USB, komunikace přes sériový port není osazena. Ochrannou část tvoří Zenerova dioda, jedná se o ochranný obvod mezi-obvodu, který maří energii v případě přesažení maximálního napětí v mezi-obvodu. U procesoru jsou porty pro ovládání tlačítka a displeje. Zelené čtyř-pinové konektory slouží k připojení na vstupní napájení. Toto napájení může být z nabíječky nebo akumulátoru. Zelený dvou-pinový konektor slouží pro výstup na připojení transformátoru. Na tomto vzorku není osazen zdroj napětí ± 5 V pro měření. Ke správné funkci zařízení je nutné dodržet podmínku, aby napětí bylo stabilizované a nepulzující.

Na obrázku 26 se nachází zadní strana tištěného spoje, kde je osazen kondenzátor silové části a další součástky pro měření. Je zde osazen obvod MCP 282, který obstarává vlastní měření napětí a proudu.



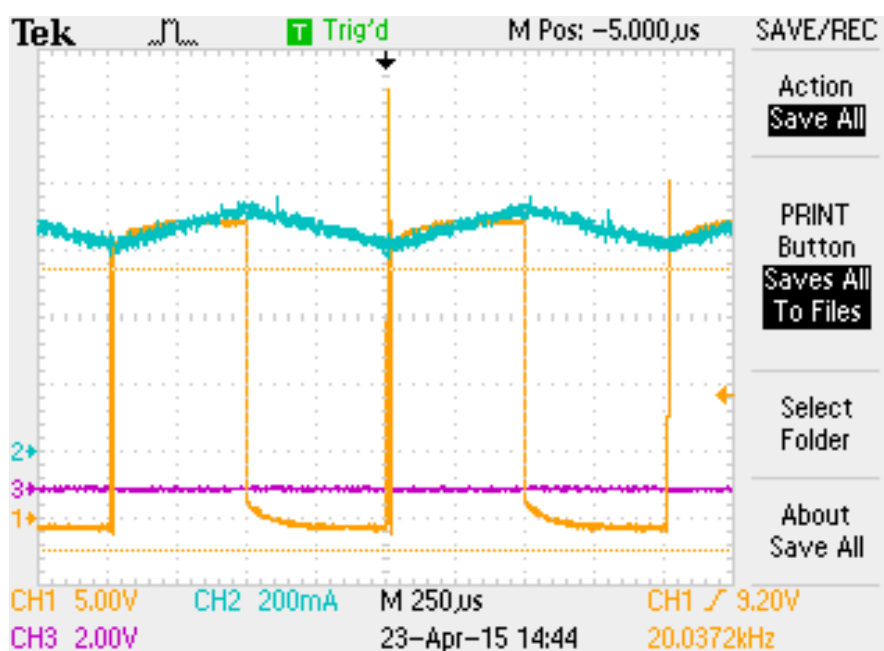
Obrázek 25: Osazený plošný spoj, přední strana



Obrázek 26: Osazený plošný spoj, zadní strana

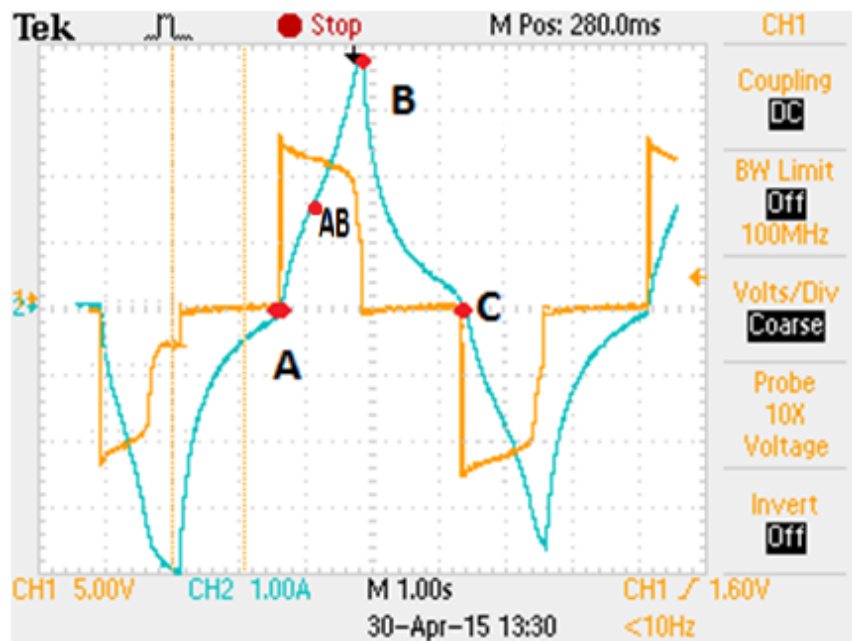
6.3 Měření na zařízení

Pro ověření správné funkce zařízení bylo provedeno zkušební měření. Z průběhu měření na obrázku 27 je vidět unipolární řízení. Zařízení nám snímá zátěž, která má induktivní charakter. V průběhu jedné periody opakovacího kmitočtu je na zátěži pouze jedna polarita napětí. Měření je prováděno na cívce o indukčnosti $L = 0,25 \text{ H}$. Modrý průběh je proudový průběh, dosahující minimální hodnoty 600 mA a maximální hodnoty 700 mA. Oranžový průběh je průběh napětí, dosahující hodnoty 25 V. Je zde vidět rozkmitaný průběh proudu i_L , který způsobuje chybu při výpočtu.



Obrázek 27: Měření induktivní zátěže

Druhé měření bylo provedeno na připojeném transformátoru TT2 v laboratoři spínacích přístrojů. Na obrázku 28 lze vidět bipolární řízení s úpravou zařízení přidáním relé. Při bipolárním řízení se na zátěži v průběhu jedné periody střídá napětí obou polarit. Tohoto řízení se dosahuje současným spínáním tranzistorů v diagonále můstku. Lze vidět zapnutí tranzistoru, jehož napětí (oranžový průběh) vzroste na hodnotu 12 V a následně klesne na nulovou hodnotu, kde dojde k jeho vypnutí. Také pozorujeme nárůst proudu z počáteční hodnoty A až do hodnoty B, která odpovídá velikosti přibližně 3,8 A, dojde k přesycení a následnému vybíjení přes nulovou diodu. Velikost proudu klesá k nulové hodnotě C.

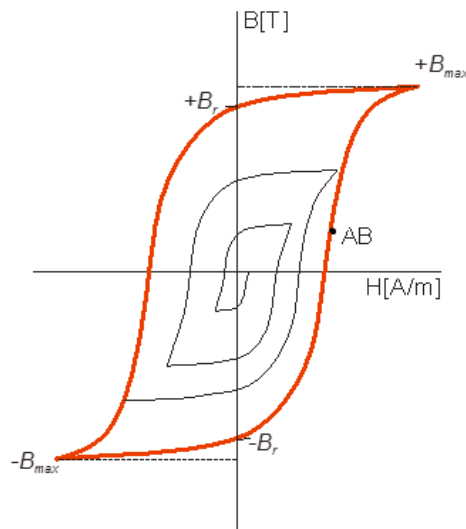


Obrázek 28: Měření na transformátoru

Nyní je možné z průběhu měření na transformátoru na obrázku 28 a BH křivky z obrázku 29 vysvětlit metody demagnetizace, které jsou uvedeny v části vývojových diagramů 6.2. Oranžový průběh značí napětí, modrý průběh je proudový. Z napěťového průběhu je vypočítán integrál, jehož výsledek je velikost plochy napětí.

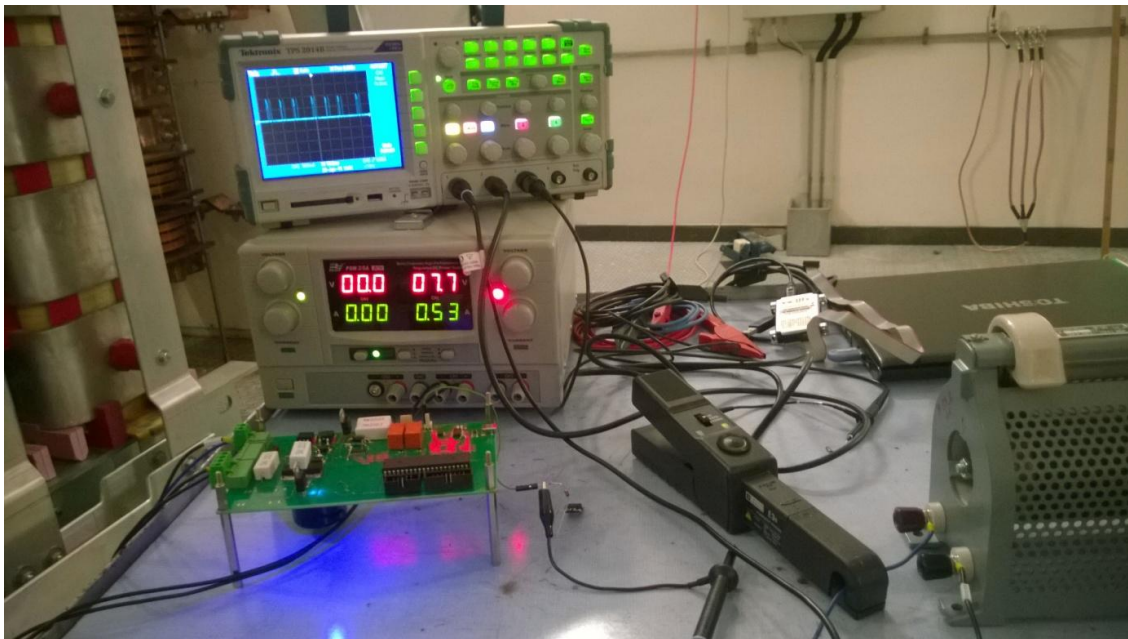
V první metodě je vypočtená plocha napětí rozpuřena, z bodu A odpovídajícímu na BH křivce bodu $-B_r$ se dostaneme do bodu AB, který leží na spojnici poloviny plochy napětí a proudového průběhu. V BH křivce je tento bod označen také AB. Při poklesu proudu v průběhu měření na nulovou hodnotu se v BH křivce přiblížíme ke středu. Transformátor je pak demagnetován a může být zapnut.

Pro druhou metodu demagnetizace použijeme opět proudový a napěťový průběh z obrázku 28. Bod A odpovídá bodu $-B_r$ v BH křivce. Při nárůstu proudu do bodu B se v BH křivce posuneme do bodu $+B_{max}$. Následně při poklesu proudu do bodu C v BH křivce nastane posun do bodu $+B_r$. Pokračováním do bodu $-B_{max}$ bude opsána BH křivka. Pokračováním procesu se budou jednotlivé kroky v BH křivce snižovat, čímž se dostaneme ke středu BH křivky, transformátor bude demagnetován a může dojít k zapnutí transformátoru. Tato metoda je oproti první metodě náročnější na počet kroků, avšak je přesnější.



Obrázek 29: BH křivka

Z obrázku 30 lze vidět zapojení měřicích přístrojů a zařízení připojené k transformátoru TT2. Pro měření proudu a napětí byl použit digitální čtyř-kanálový osciloskop Tektronix TPS 2014B se šířkou snímacího pásma 100 MHz a rychlostí snímání 1 GS/s. Sonda zaznamenávající proudové měření na osciloskopu byla proudová sonda Chauvin Arnoux E3N. Má 2 nastavitelné citlivosti pro snímání proudu a kmitočtový rozsah 0 Hz – 100 kHz. Stabilizované napětí zajišťoval tří-kanálový generátor stabilizovaného napětí PSM 3/5 A. Tento generátor má 2 nastavitelné výstupní kanály a jeden pevný výstupní kanál 5 V/1 A. Nastavitelné kanály umožňují plynulou regulaci výstupního napětí v rozsahu 0 – 30 V. Dále pro měření byl použit rezistor a cívka s indukčností $L = 0,25 \text{ H}$.



Obrázek 30: Zapojení měřicího pracoviště

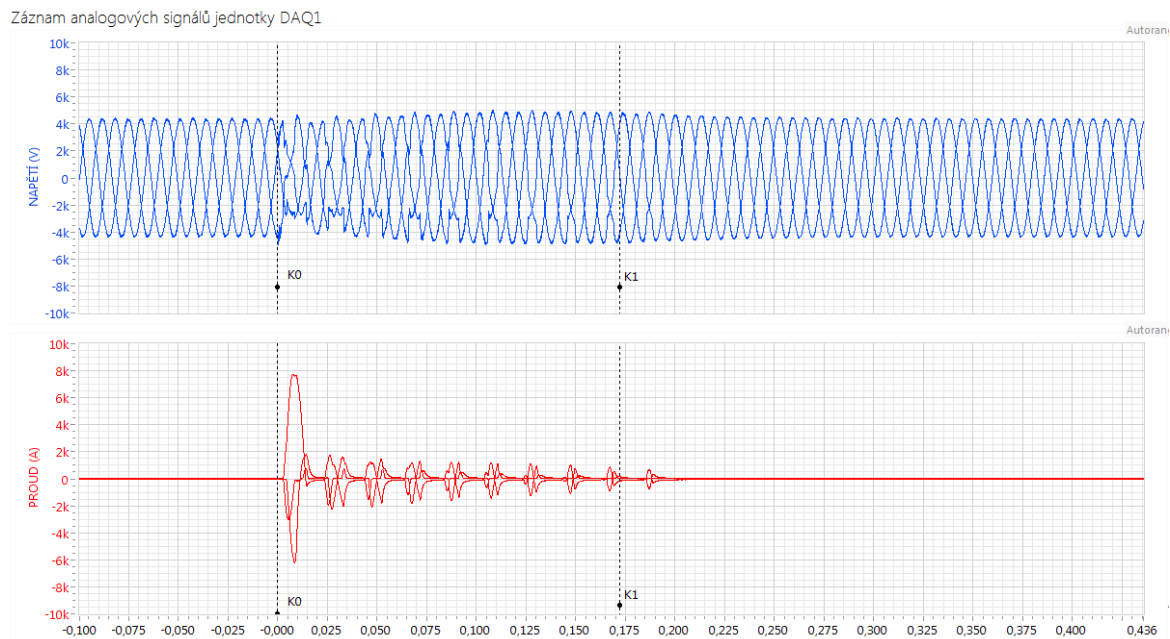
Na obrázku 31 je transformátor TT2 16MVA, umístěný v laboratoři spínacích přístrojů ve vědecko-technickém parku profesora Lista. V pravém dolním rohu na obrázku lze vidět vývod pro připojení zařízení sloužícího k demagnetizaci.



Obrázek 31: Transformátor TT2

6.4 Zapínání transformátoru

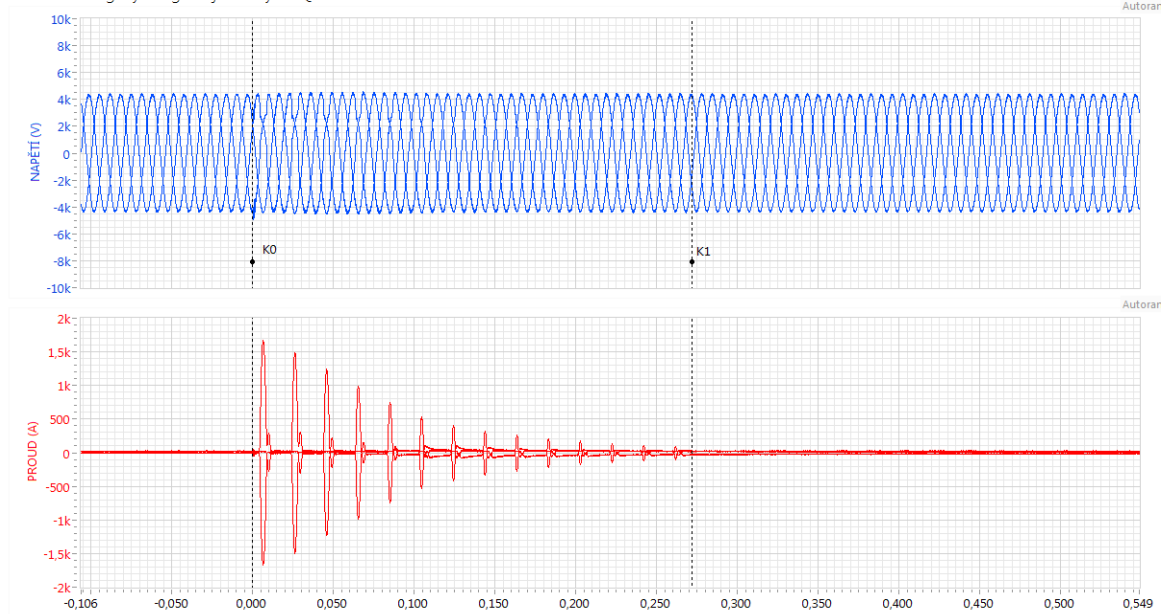
Na obrázku 32 je zobrazen průběh napětí a proudu po zapnutí třífázového transformátoru TT2. Tento transformátor se nachází ve vědecko-technickém parku profesora Lista v laboratoři spínacích přístrojů. Jedná se o 16 MVA transformátor. Průběh napětí je modré barvy a proudový průběh je červené barvy. Jedná se o průběhy zapínání transformátoru bez demagnetizace, což je kritickým případem zapínání. Po zapnutí v bodě K0 lze vidět deformované napětí, které se ustálí v bodě K1 na hodnotě přibližně 4 kV. Z průběhu proudu je znatelný překmit proudu dosahující hodnoty až 8 kA. Je způsoben fází napětí v momentě sepnutí v bodě K0. Transformátor zůstává v remanenci. Zapínání transformátoru je nelineární děj, při kterém dochází k přesycení jádra. Velikost proudu bude odpovídat pouze hodnotě diferenciální permeability μ_{dif} , která je v saturevané oblasti přibližně rovna hodnotě diferenciální permeability vzduchu. Příčná indukčnost L_μ je pak téměř zanedbatelná a způsobuje veliký nárazový proud.



Obrázek 32: Zapnutí transformátoru TT2, bez demagnetizace

Na obrázku 33 jsou opět zaznamenány průběhy napětí a proudu při zapnutí již demagnetovaného transformátoru TT2, kde modrý průběh značí napětí, které se po zapnutí v bodě K0 ustálí na hodnotě 4 kV. Červeným průběhem je zaznačen proud. Po zapnutí v bodě K0 dosahuje hodnoty 1,5 kA. Tento průběh je lepším případem zapínání než na obrázku 32, kde proud dosáhl hodnoty až 8 kA.

Záznam analogových signálů jednotky DAQ1



Obrázek 33: Zapnutí transformátoru TT2, s demagnetizací

7 ZÁVĚR

Diplomová práce na téma Snížení zapínacího proudu transformátoru byla zaměřena na výrobu zařízení snižujícího zapínací proud transformátoru.

V první části byla zpracována obecná teorie transformátorů, jednofázových i třífázových, principy jejich funkce, značení. Dále byl uveden magnetický obvod transformátoru, jeho rozdělení na lineární a nelineární magnetické obvody.

U lineárních magnetických obvodů byl popsán Hopkinsonův zákon, indukčnost a elektromagnetický návrh lineárního diskrétního magnetického obvodu. Také byly uvedeny Hopkinsonovy činitele rozptylu a výpočet indukovaného napětí v lineárním magnetickém obvodu.

V části zabývající se nelineárními magnetickými obvody byl vysvětlen výpočet indukovaného napětí pro nelineární obvody, energie nelineárního magnetického obvodu a hysterezní ztráty. Magnetický obvod třífázového transformátoru, určení počtu primárních závitů a také výpočet magnetizačního proudu.

V kapitole 3 byla objasněna problematika elektrotechnických materiálů sloužících k výrobě transformátorových jader. Mezi tyto materiály jsou řazeny elektrotechnické plechy Et, Eo, Ei a amorfní magnetické materiály.

Následně byl rozebrán model transformátoru, který popisuje matematickými rovnicemi chování transformátoru jako fyzikální systému.

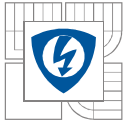
V části 5 byl popsán přechodový jev při připínání transformátoru a zapínací proud transformátoru.

Vlastní práce byla zaměřena na výrobu zařízení, které demagnetuje jádro transformátoru před zapnutím. V programu Eagle byla navržena deska plošného spoje, následně vyrobena a osazena danými součástkami. V laboratorních podmínkách byl ověřen provoz zařízení, měření na zátěži v podobě cívky o indukčnosti 0,25 H. Z důvodu úpravy budiče byla navržena nová deska plošných spojů, na které bylo lépe vyřešeno umístění součástek a také byla přidána ovládací tlačítka sloužící k manuálnímu ovládání, a relé pro ovládání externího stykače pro odpojovač VN. Schéma zapojení pro první i druhou verzi zařízení jsou uvedena v příloze. Posléze bylo provedeno měření na samotném transformátoru TT2 v laboratoři spínacích přístrojů.

Z průběhu měření na cívce lze vidět unipolární řízení, kde zařízení snímalo zátěž o induktivním charakteru. V průběhu jedné periody opakovacího kmitočtu se na zátěži vyskytovala pouze jedna polarita napětí.

Další měření bylo provedeno již na připojeném transformátoru TT2. Jednalo se o bipolární řízení, kde se na zátěži v průběhu jedné periody střídaly napětí obou polarit. Tohoto řízení bylo dosaženo současným spínáním tranzistorů v diagonále můstku.

V poslední části 6.4 bylo provedeno zkušební zapnutí transformátoru bez demagnetizace a s demagnetizací. Z průběhu napětí při zapínání bez demagnetizace lze vidět deformované napětí, které se ustálí na hodnotě 4kV. Z průběhu proudu je patrný překmit proudu dosahujícího hodnoty až 8 kA, způsobený fází napětí v momentě sepnutí. Zapínání transformátoru je nelineární děj, při kterém dochází k přesycení jádra. Velikost proudu bude odpovídat pouze hodnotě diferenciální permeability μ_{dif} , která je v saturované oblasti



přibližně rovna hodnotě diferenciální permeability vzduchu. Příčná indukčnost L_μ je pak téměř zanedbatelná a způsobuje veliký nárazový proud.

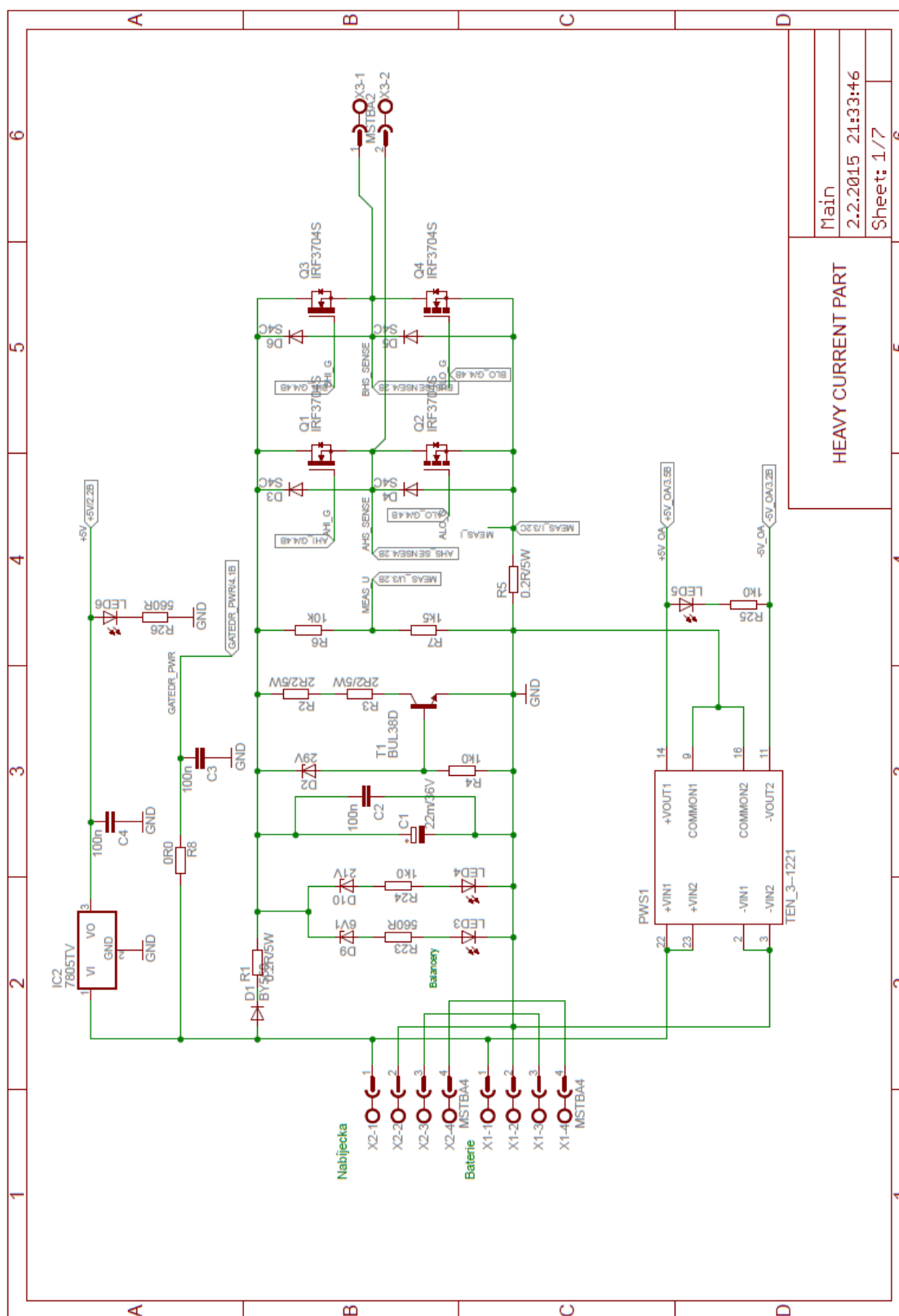
Pro zapínání z demagnetovaného stavu dosáhl proudový překmit hodnoty 1,5 kA, což je mnohem lepší případ zapínání oproti překmitu proudu bez demagnetizace.

Vyrobené kybernetické zařízení lze použít pro demagnetizaci transformátorů, v našem případě pro demagnetizaci transformátoru TT2. Zařízení lze použít i pro komunikaci většího autonomního systému, například v rozvodnách při demagnetizaci transformátorů velkých výkonů.

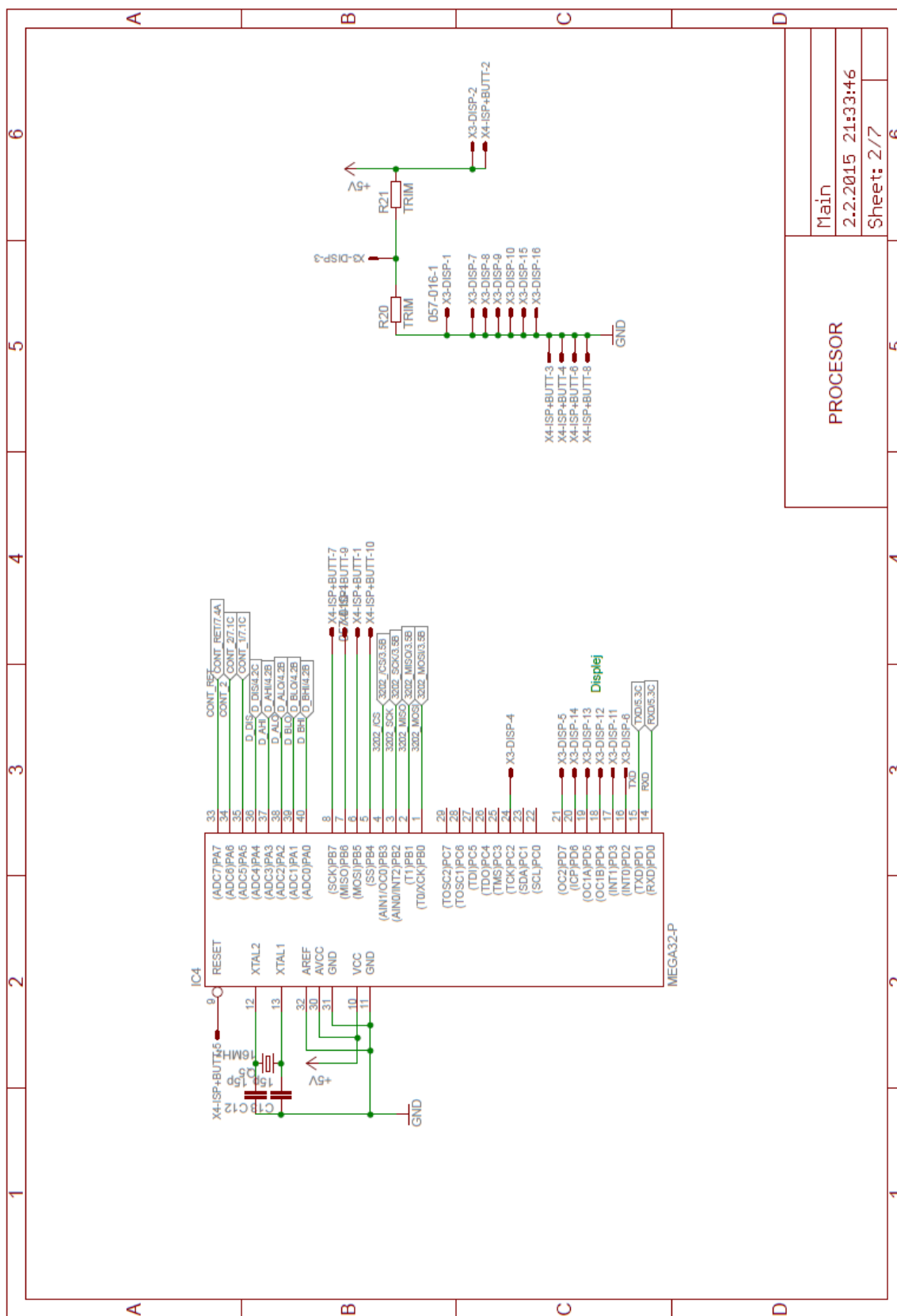
LITERATURA

- [1] ZOUFALÝ, Marek. *Analýza a doporučení změny výkonového přepínače* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56824. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.
- [2] Poznámky z přednášek Doc. Ing. Čestmíra Ondrůška, CSc.
- [3] Technická dokumentace firmy REVOS (montážní deníky, fotodokumentace)
- [4] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIMUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [5] FAKTOR, Z. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 392 s. ISBN 80-860-5649-X.
- [6] NOVÁK, Miroslav. *Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacího proudu* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2003 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/disertace_Miroslav_Novak.pdf. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [7] CIPÍN, Radoslav. *Matematické modely transformátorů a asynchronních motorů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7287. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [8] MAKKI, Zbyněk. *Chyba přístrojového transformátoru napětí* [online]. 2011. Brno [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/210482/mod_resource/content/1/chyba%20MTN.pdf
- [9] *Vývojové diagramy* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://www.ikvalita.cz/download/kap2.pdf>

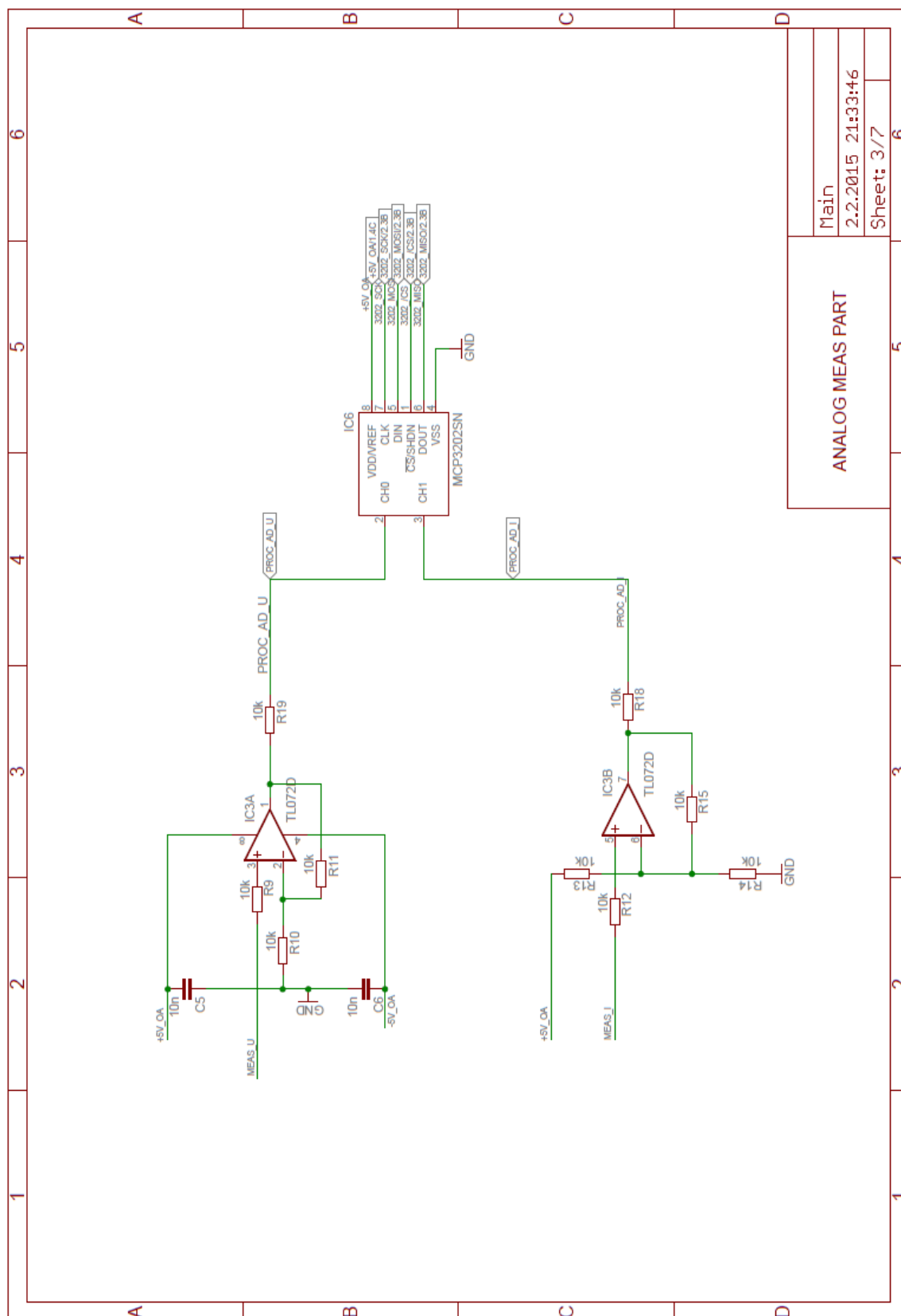
PŘÍLOHY



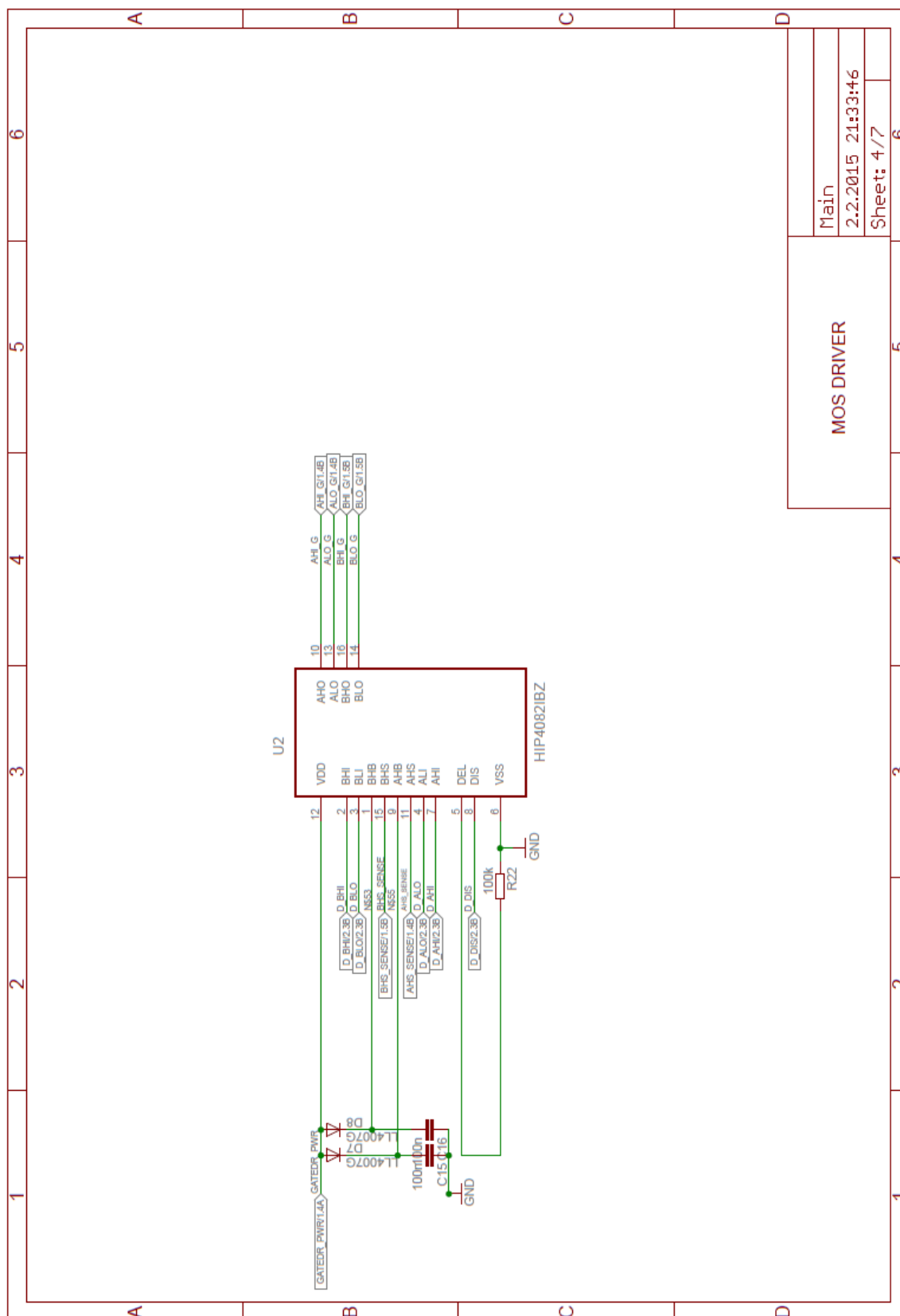
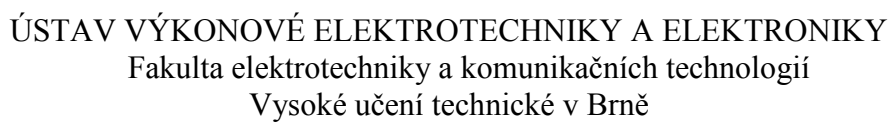
Obrázek 34: Schéma zapojení, silová část, verze 1

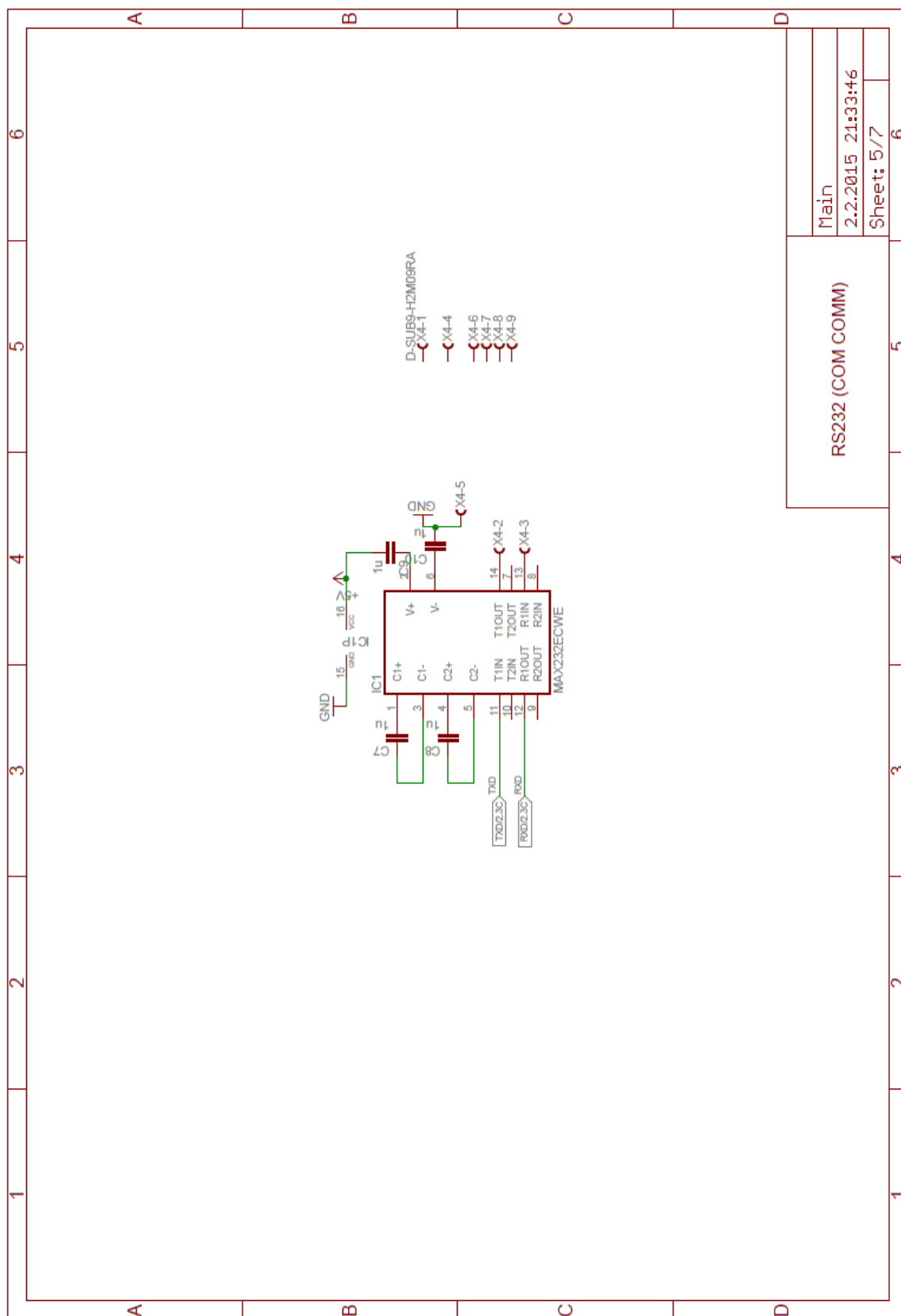


Obrázek 35: Schéma zapojení, procesor, verze 1

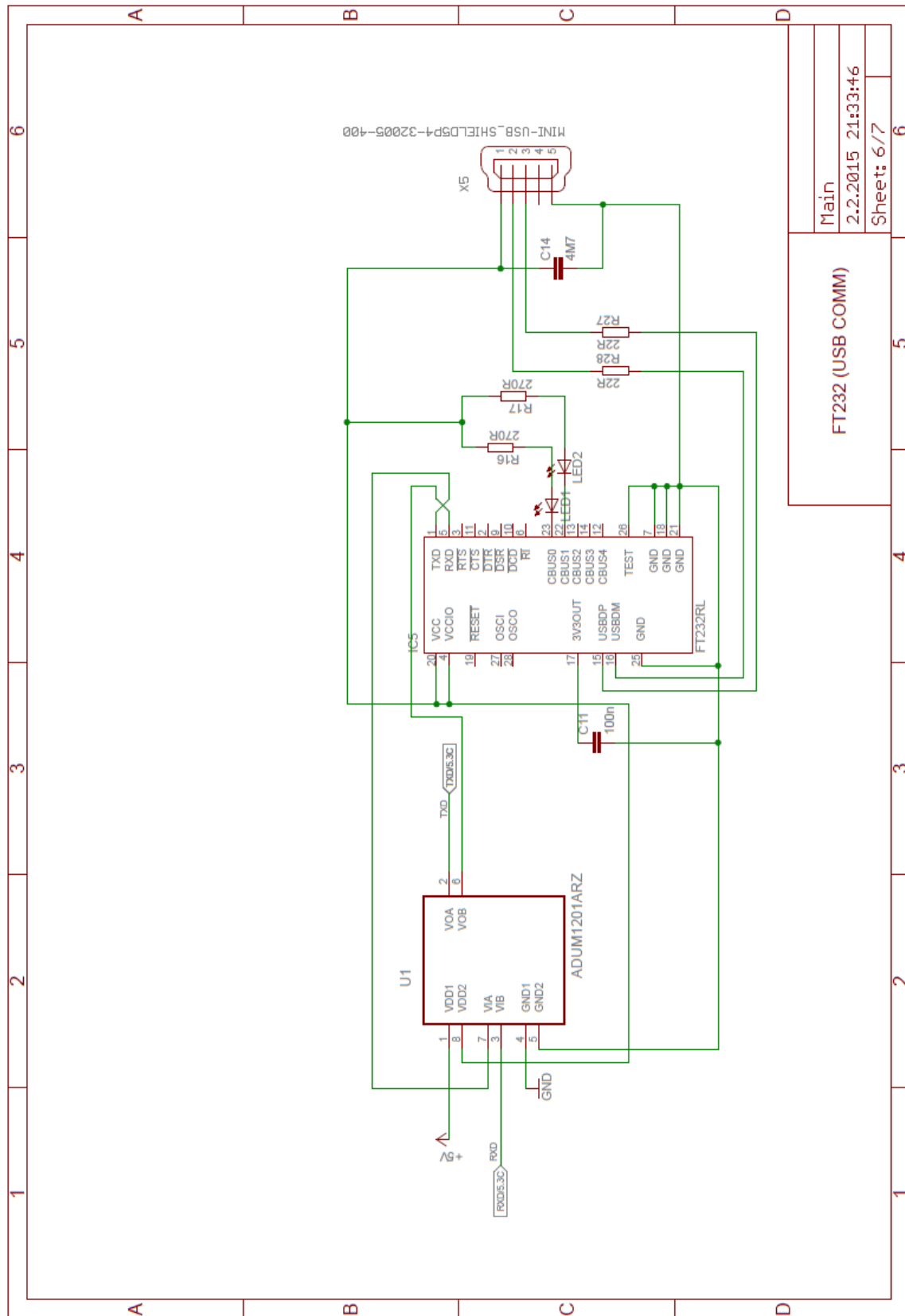


Obrázek 36: Schéma zapojení, měřicí část, verze 1

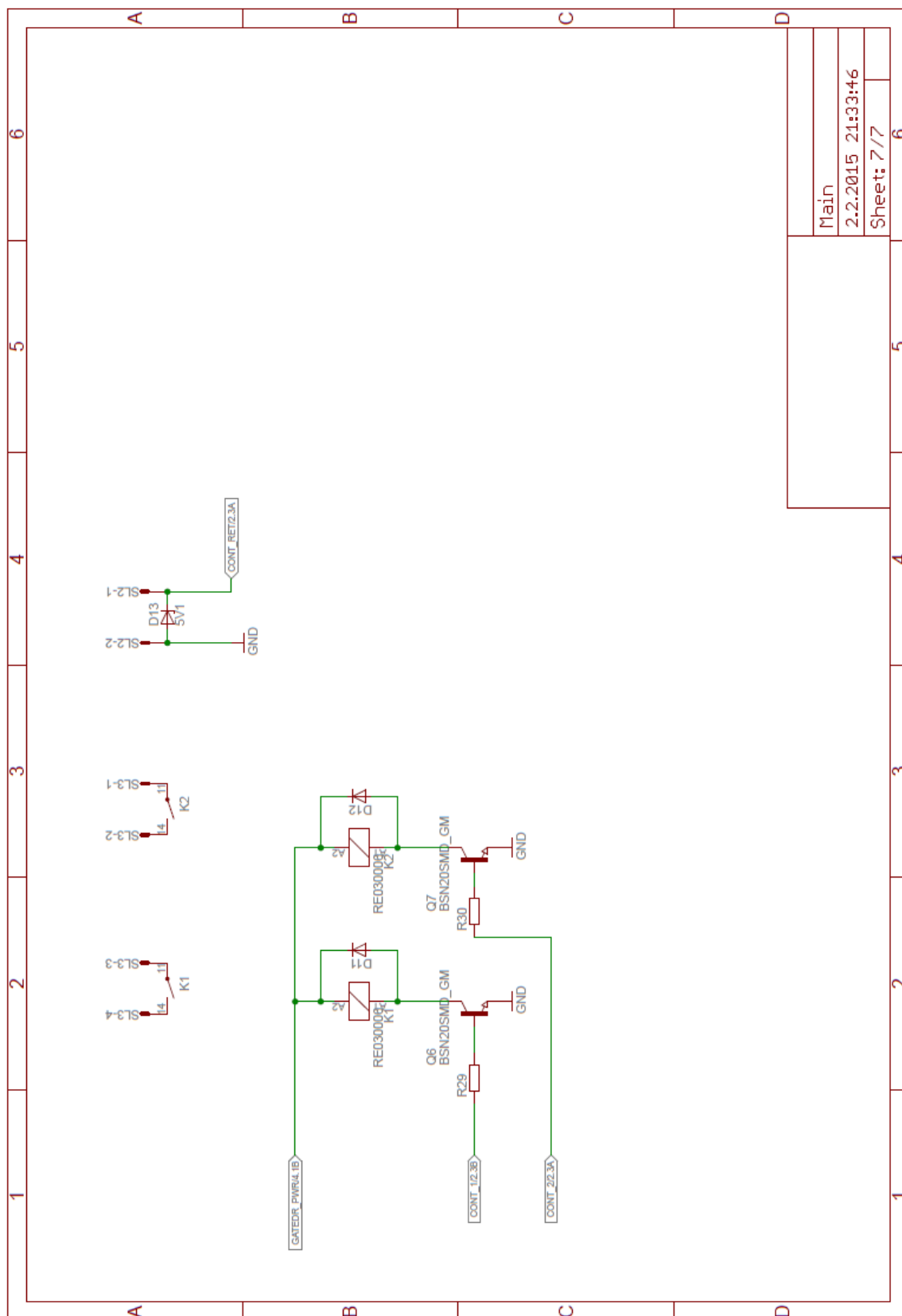




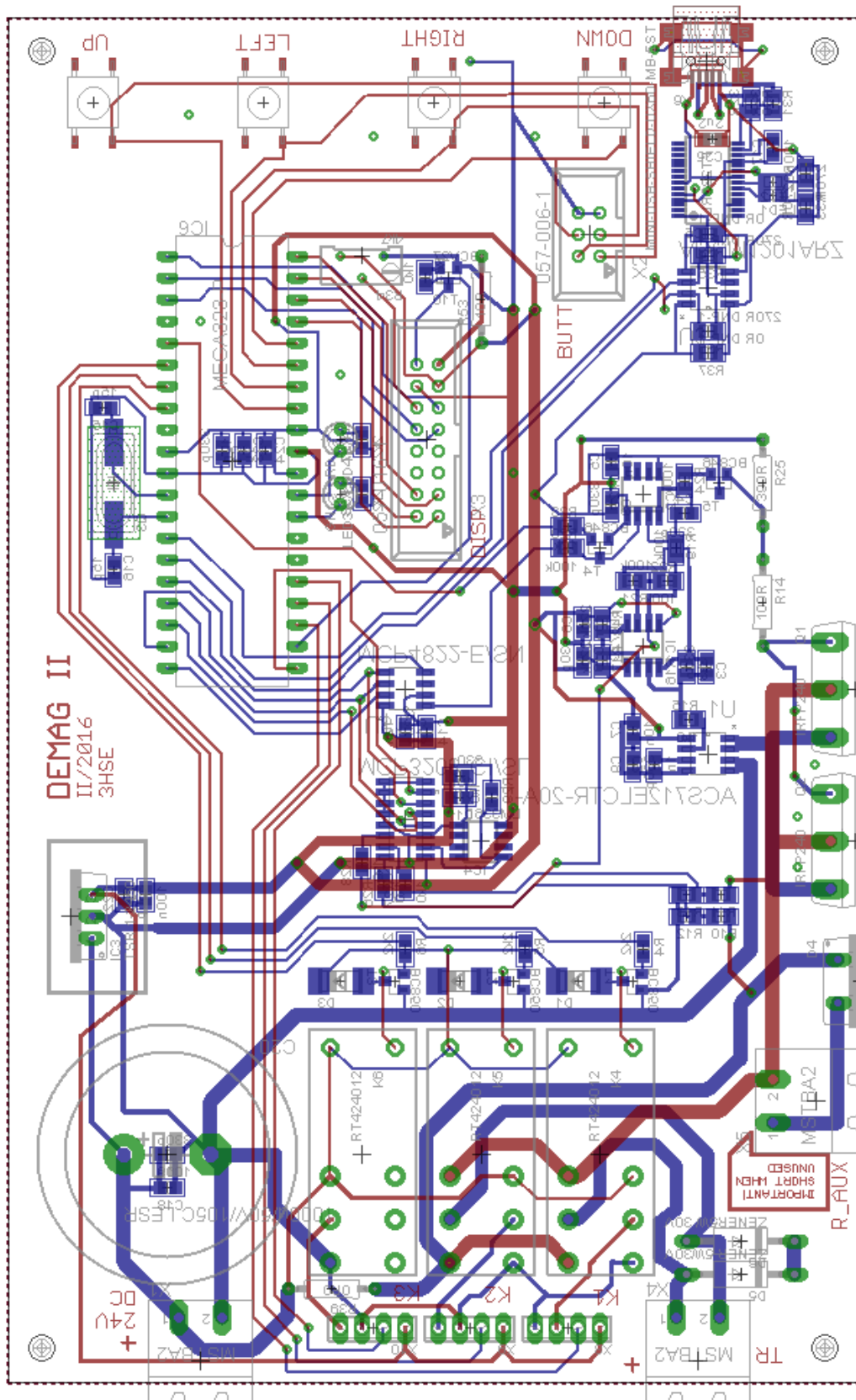
Obrázek 38: Schéma zapojení, komunikace, verze 1



Obrázek 39: Schéma zapojení, USB komunikace, verze 1

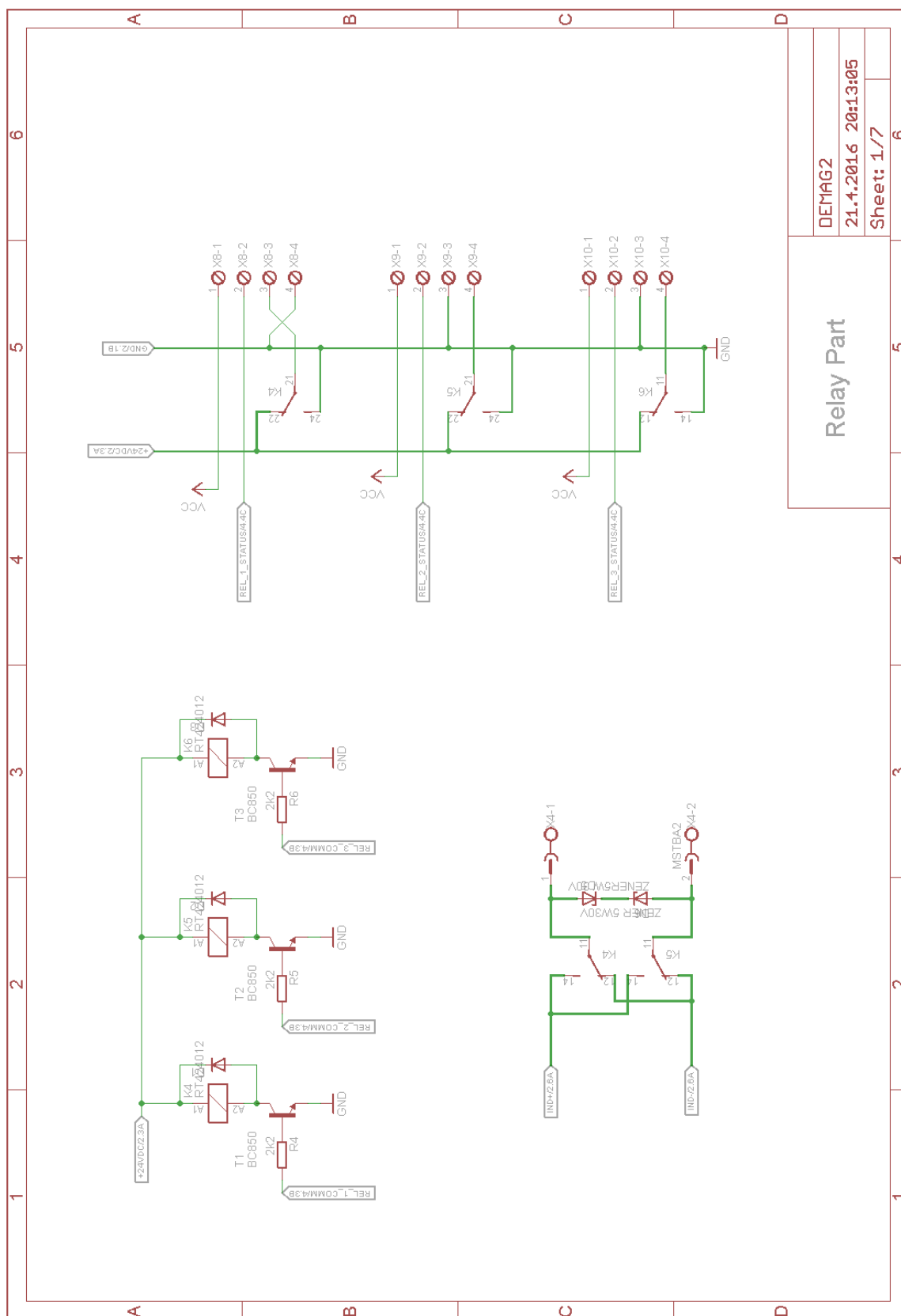


Obrázek 40: Schéma zapojení, ovládání stykačů pomocí relé, verze 1

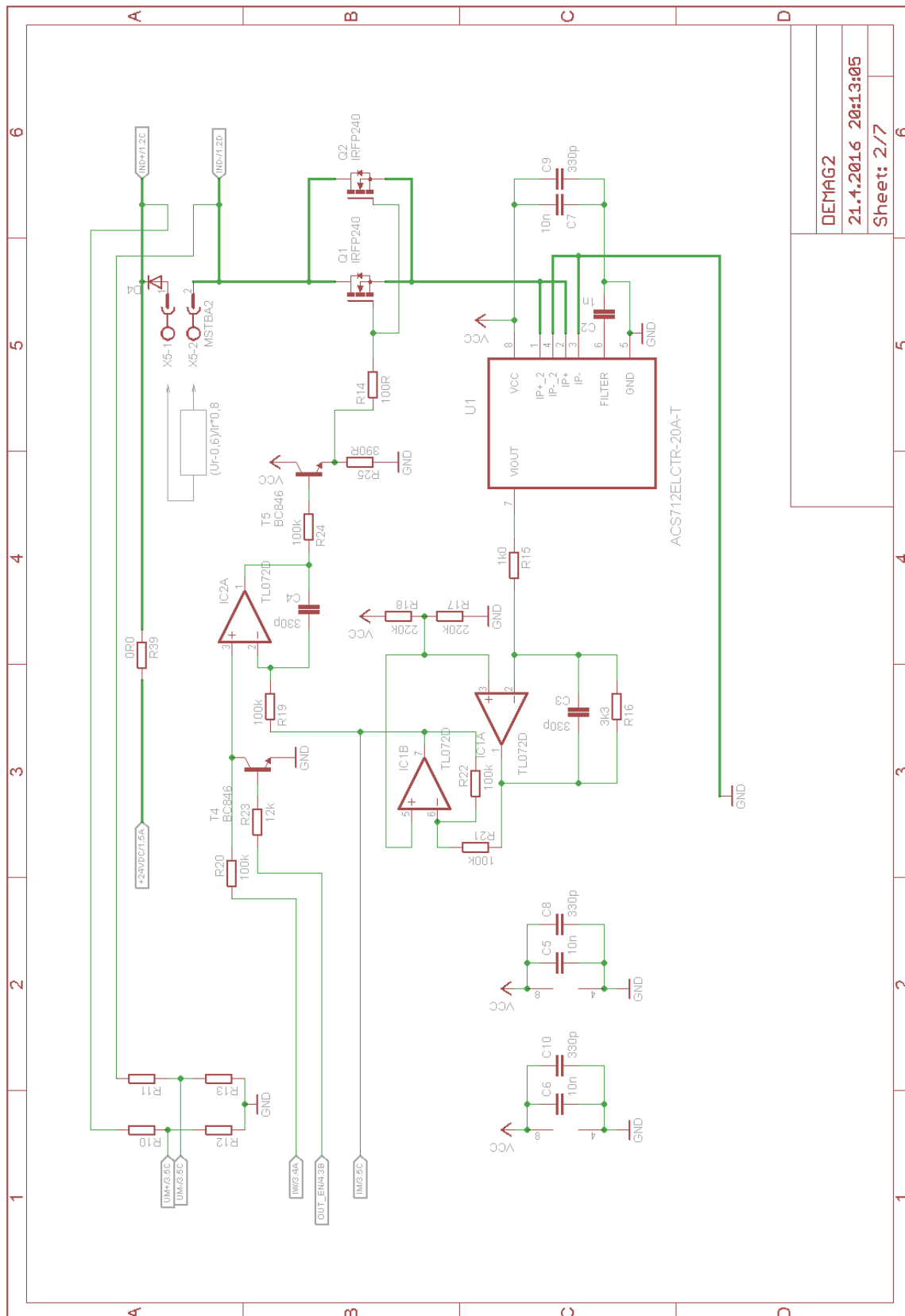


FR4 1,5mm
35/35um východí Cu
Otvory konečné
HAL
Maska zelená

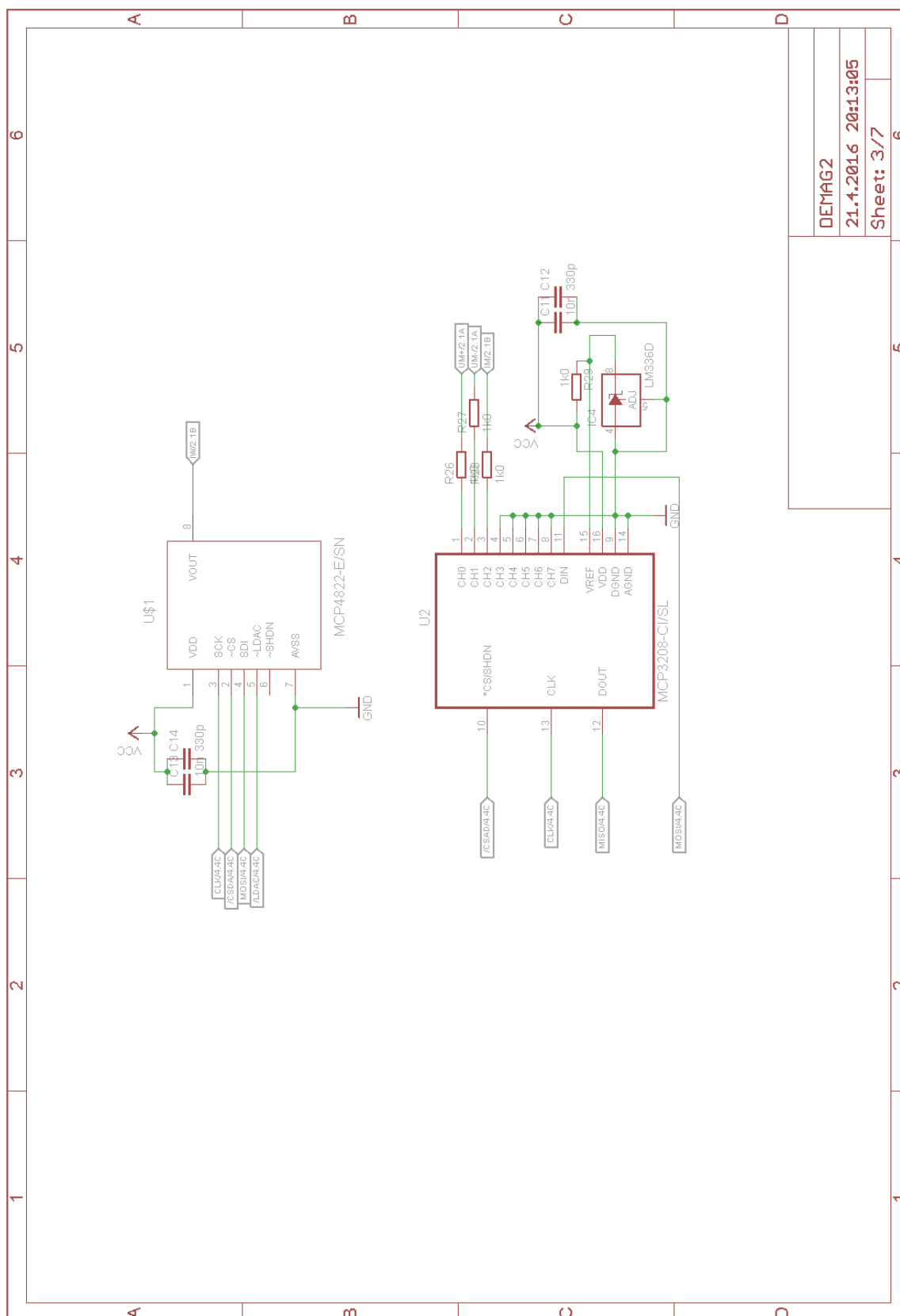
Obrázek 41: Podklad pro tvorbu plošného spoje, verze 2



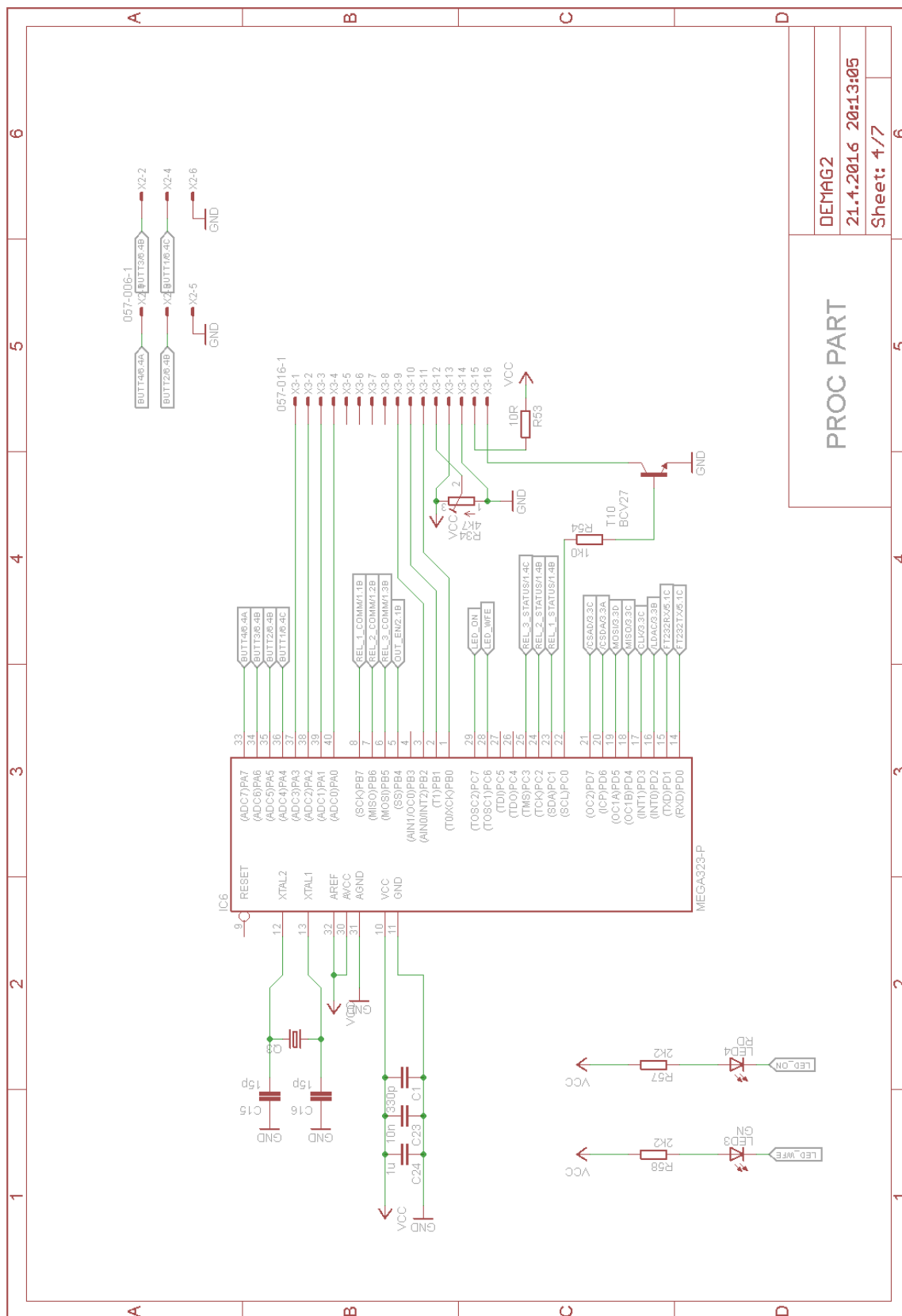
Obrázek 42: Schéma zapojení, ovládání pomocí relé, verze 2



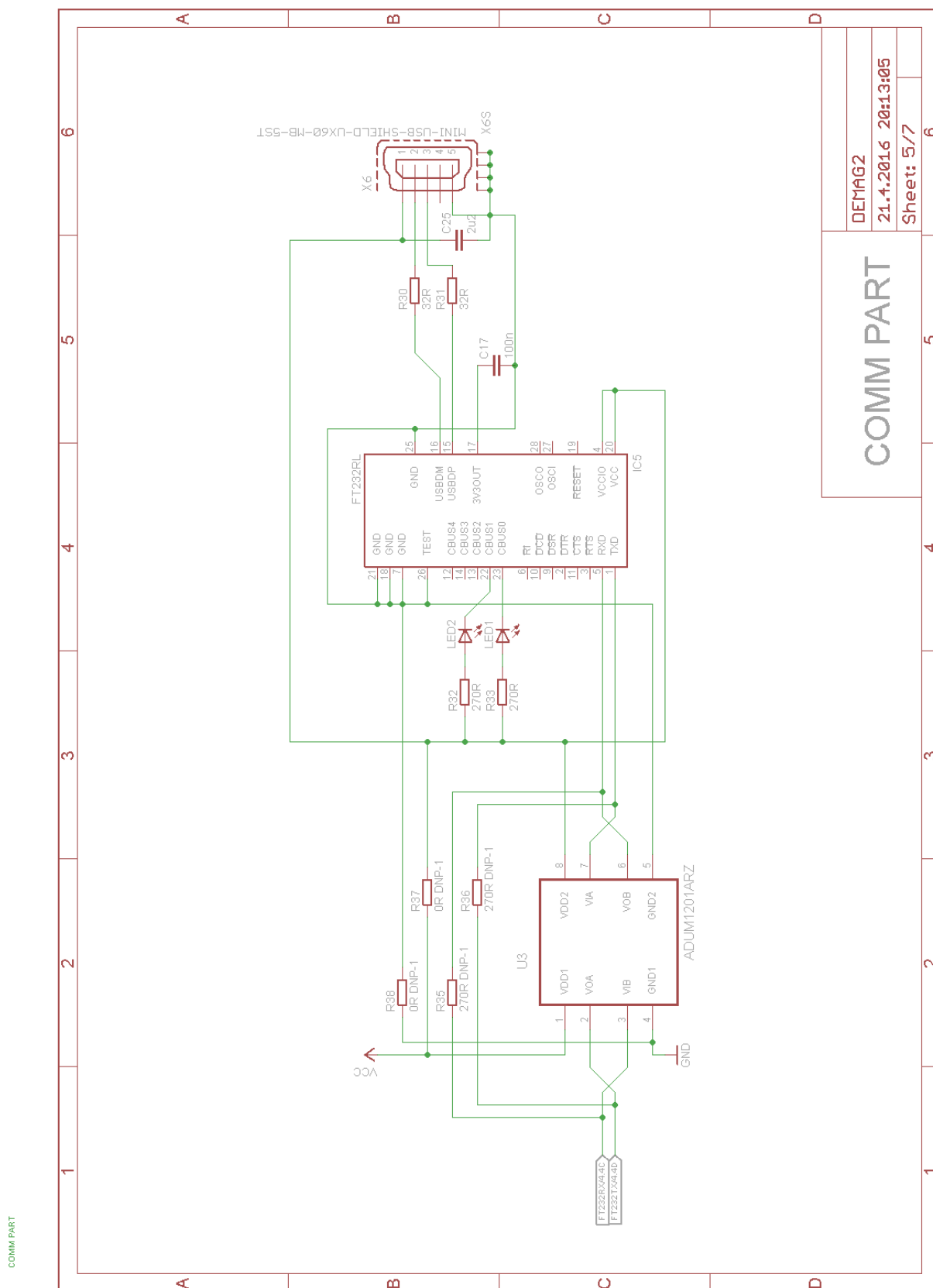
Obrázek 43: Schéma zapojení, silová část, verze 2



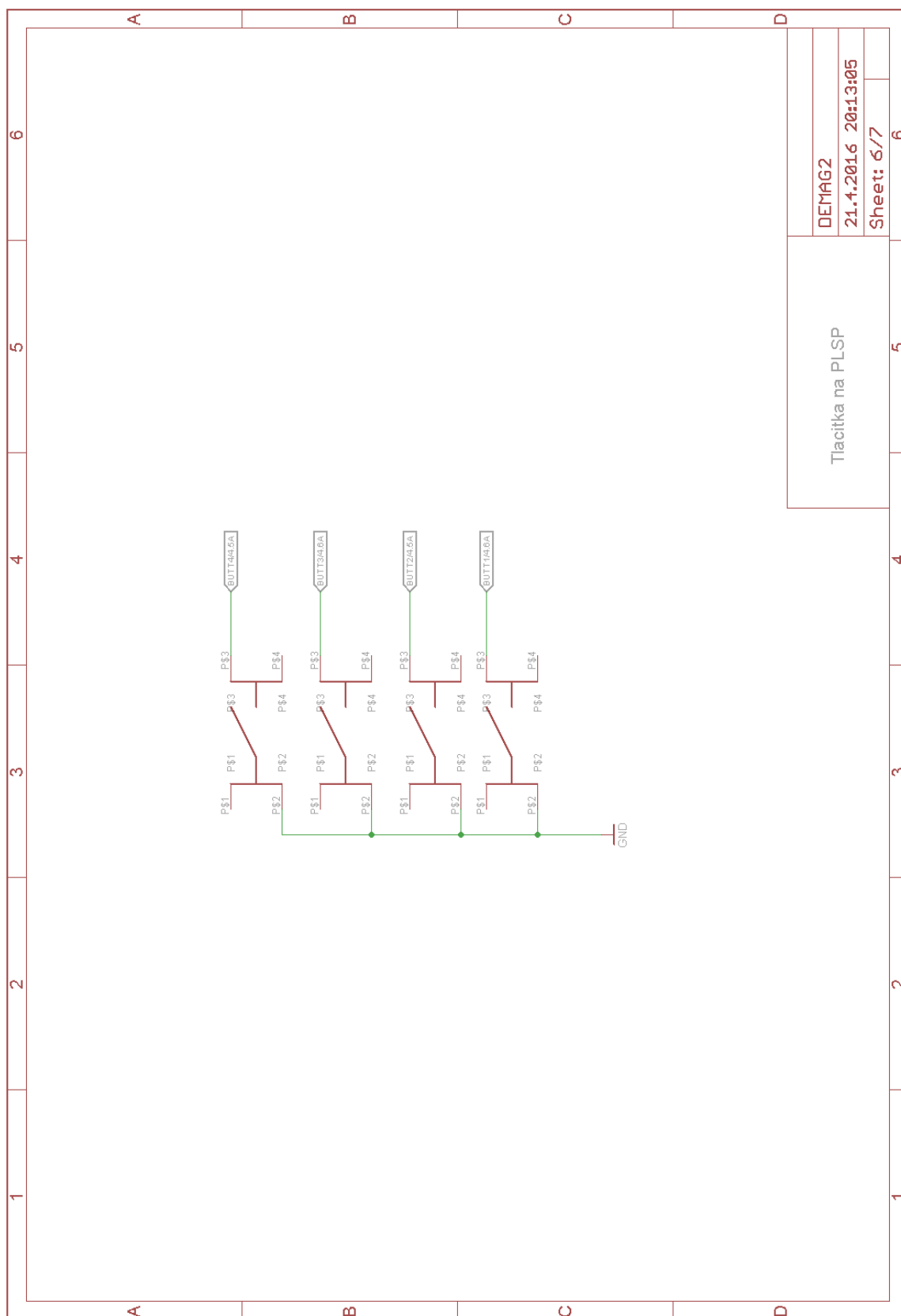
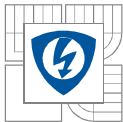
Obrázek 44: Schéma zapojení, měřicí část, verze 2



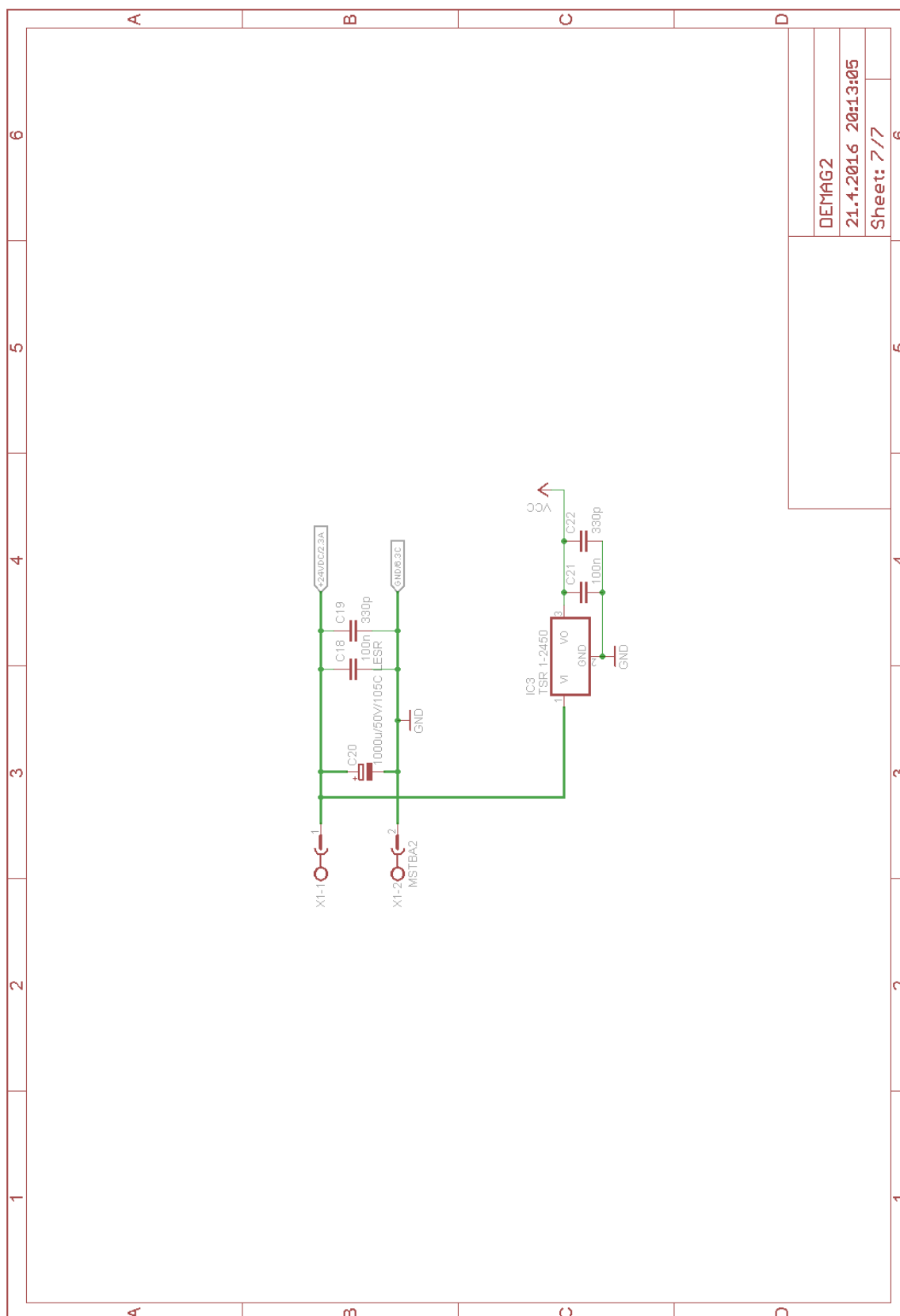
Obrázek 45: Schéma zapojení, procesor, verze 2



Obrázek 46: Schéma zapojení, komunikace USB, verze 2



Obrázek 47: Schéma zapojení, tlačítka, verze 2



Obrázek 48: Schéma zapojení, připojení transformátoru, verze 2