

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Jakub Horký



# 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

## REMANENTNÍ MAGNETISMUS ELEKTROMAGNETŮ STEJNOSMĚRNÝCH STYKAČŮ

REMANENT MAGNETISM OF ELECTROMAGNETS OF DC CONTACTORS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Horký

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2021

# Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Jakub Horký

**ID:** 195584

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Remanentní magnetismus elektromagnetů stejnosměrných stykačů**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte teorii vzniku a zániku magnetického toku stejnosměrných elektromagnetů.
2. Podrobně rozeberte remanentní magnetizaci jader stejnosměrných elektromagnetů stykačů a její vliv na chování přístroje.
3. Na dvojici konkrétních přístrojů proveďte měření reakčních časů při spínání v závislosti na aplikovaném proudu budící cívkou a porovnejte výsledky.
4. Na základě získaných dat navrhnete elektronický obvod pro minimalizaci rozdílu spínacích časů daných přístrojů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] ZARVA, V. A. Magnetické jevy. Praha: Naše vojsko, 1955. Knižnice radiotechniky. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:f002bc50-836a-11e3-a606-005056827e51>
- [2] MINDL, Pavel a Vladimír NOVOTNÝ. Měření a zkoušení elektrických přístrojů. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01842-3.
- [3] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. David Šimek

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce řeší remanentní magnetismus elektromagnetů u stejnosměrných stykačů. První část práce pojednává o teorii vzniku magnetického pole v různých druzích materiálu, popisuje jejich magnetizaci a dělí je dle různých kategorií. V další části se práce zabývá elektromagnetem, který je popsán především z hlediska funkčnosti a z historického pohledu. Nakonec je v teoretické části práce popsán stykač společně s nepříznivými vlivy a remanentní indukci.

Druhá část je částí praktickou. Nejprve bylo provedeno měření reakčních časů na dvojici stejnosměrných stykačů. Pomocí získaných dat byl navrhnout elektronický obvod pro minimalizaci rozdílu spínacích časů daných stejnosměrných stykačů.

## **Klíčová slova**

magnetická indukce, remanentní magnetická indukce, magnetické látky, elektromagnet, stejnosměrný stykač, obvod, reakční čas

## **Abstract**

The master thesis is focused on a remanent magnetism of electromagnets of DC contactors. In the first part of the thesis deals with the formation of a magnetic field in different kinds of materials, description of their magnetization and sorting. The next part is focused on the principle and history of an electromagnet. Negative effects and remanent induction of the contactor are described in the end of the theoretical part.

The second part is a practical part. First, the reaction times were measured on a pair of DC contactors. Using the obtained data, an electronic circuit was designed to minimize the difference in switching times of the given DC contactors.

## **Keywords**

magnetic induction, remanent magnetic induction, magnetic material, electromagnet, DC contactor, circuit, reaction time

## **Bibliografická citace**

HORKÝ, Jakub. *Remanentní magnetismus elektromagnetů stejnosměrných stykačů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133114>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Bc. Jakub Horký*

**VUT ID studenta:** *195584*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Remanentní magnetismus elektromagnetů  
stejnoseměrných stykačů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Davidu Šimkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych rád poděkoval panu Ing. Janu Martišovi, Ph.D. za pomoc a podnětné rady.

V Brně dne: 24. května 2021

-----  
podpis autora

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM GRAFŮ.....	10
ÚVOD .....	11
<b>1. MAGNETICKÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>12</b>
1.1 DIAMAGNETICKÉ LÁTKY .....	14
1.2 PARAMAGNETICKÉ LÁTKY .....	14
1.3 FEROMAGNETICKÉ LÁTKY .....	14
1.3.1 Magnetování feromagnetika .....	15
1.4 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ .....	19
1.4.1 Magnetické tvrdé materiály .....	19
1.4.2 Magneticky měkké materiály .....	20
<b>2. ELEKTROMAGNET .....</b>	<b>23</b>
2.1 HISTORIE ELEKTROMAGNETU .....	23
2.2 VLASTNOSTI ELEKTROMAGNETU .....	24
2.2.1 Cyklus stejnosměrného elektromagnetu.....	24
2.2.2 Hopkinsonův zákon a lineární diskrétní magnetický obvod.....	25
<b>3. STYKAČE .....</b>	<b>27</b>
3.1 KONSTRUKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO STYKAČE .....	27
3.2 KLASIFIKACE STYKAČŮ .....	28
<b>4. STEJNOSMĚRNÝ STYKAČ .....</b>	<b>31</b>
4.1 NEŽÁDOUCÍ VLIVY NA PŮSOBENÍ STEJNOSMĚRNÉHO STYKAČE .....	31
4.2 REMANENTNÍ MAGNETIZACE JADER STYKAČE .....	32
<b>5. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>35</b>
5.1 MĚŘENÍ ODPORŮ CÍVKY STEJNOSMĚRNÉHO STYKAČE.....	36
5.2 MĚŘENÍ DC STYKAČŮ.....	37
5.2.1 Měřený DC stykač trakční – vzorek 1 .....	37
5.2.2 Měřený DC stykač trakční – vzorek 2.....	39
5.2.3 Měřený DC stykač trakční – vzorek 3.....	41
5.3 REAKČNÍ ČASY V ZÁVISLOSTI NA PROUDU .....	42
5.4 NÁVRH OBVODU PRO MINIMALIZACI ROZDÍLU SPÍNACÍCH ČASŮ .....	46
5.4.1 Části navrhovaného obvodu .....	46
5.4.2 Popis funkce obvodu.....	48
5.4.3 Minimalizace rozdílných časů .....	48
5.5 VIZUÁLNÍ MATERIÁLY .....	50
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
LITERATURA .....	55
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	58
SEZNAM PŘÍLOH .....	60



# Seznam obrázků

Obrázek 1. : DC stykač [1] .....	11
Obrázek 1.1: Bohrov model atomu [2] .....	12
Obrázek 1.2: Orbitální pohyb [3] .....	12
Obrázek 1.3: Uspořádání magnetických momentů [5] .....	13
Obrázek 1.4: Magnetický moment při působení vnějšího pole na diamagnetikum [8] .....	14
Obrázek 1.5: a) Bez působení b) Působení vnějšího pole na feromagnetikum [8] .....	14
Obrázek 1.6: Vnitřní magnetizace při magnetování [7] .....	15
Obrázek 1.7: Křivka prvotní magnetizace (upraveno) [10] .....	15
Obrázek 1.8: Křivka prvotní magnetizace společně s průběhem diferenciální permeability [6] .....	17
Obrázek 1.9: Hysterezní smyčka (upraveno) [10] .....	17
Obrázek 1.10: Vliv vzduchové mezery na tvar hysterezní křivky [13] .....	19
Obrázek 1.11: Hysterezní smyčka MTM [9] .....	20
Obrázek 1.12: Hysterezní smyčka MMM [9] .....	21
Obrázek 1.13: Ztrátové energie hysterezní smyčky [6] .....	21
Obrázek 2.1: Elektromagnet Sturgeona [18] .....	23
Obrázek 2.2: Elektromagnet J. Henryho [21] .....	23
Obrázek 2.3: Dynamické charakteristiky elektromagnetu [16] .....	24
Obrázek 2.4: Pracovní cyklus elektromagnetu [15] .....	24
Obrázek 2.5: Diskrétní lineární magnetický obvod [6] .....	25
Obrázek 3.1: Schéma elektromagnetického stykače [24] .....	28
Obrázek 4.1: Struktura stejnosměrného stykače [28, 33] .....	31
Obrázek 4.2: Příklad hoření oblouku [30] .....	32
Obrázek 4.3: Sériové zapojení DC stykače .....	33
Obrázek 4.4: Paralelní zapojení DC stykače .....	34
Obrázek 5.1: Schéma zapojení pro měření přitahu kotvy .....	35
Obrázek 5.2: Schéma zapojení pro měření reakčních časů .....	35
Obrázek 5.3: Měření odporu cívky .....	36
Obrázek 5.4: DC stykač-vzorek 1 .....	37
Obrázek 5.5: a) vertikální poloha b) horizontální poloha .....	37
Obrázek 5.6: DC stykač-vzorek 2 .....	39
Obrázek 5.7: DC stykač-vzorek 3 .....	41
Obrázek 5.8: Modul DC/DC step down [32] .....	46
Obrázek 5.9: Návrh obvodu pro minimalizaci rozdílů spínacích časů .....	47
Obrázek 5.10: Pracoviště na měření reakčních časů a) ve vertikální a b) v horizontální poloze .....	50
Obrázek 5.11: Schéma zapojení pracoviště pro minimalizaci časů .....	51
Obrázek 5.12: Pracoviště pro měření minimalizace časů a) bez přípravku, b) s přípravkem .....	51
Obrázek 5.13: Čelní strana zhotoveného přípravku .....	52
Obrázek 5.14: Boční strany zhotoveného přípravku .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Magnetické vlastnosti MTM [9].....	20
Tabulka 2: Třídění MMM dle normy IEC [12] .....	22
Tabulka 3: Kategorie použití stykačů ČSN EN 60947-4-1 ed. 3.....	30
Tabulka 4: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 1 .....	36
Tabulka 5: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 2.....	36
Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 3 .....	36
Tabulka 7: Seznam součástí.....	46
Tabulka 8: Seznam použitých přístrojů .....	53
Tabulka 9: Podmínky okolního prostředí pro měření DC stykačů-vzorek 1 a 2 .....	53
Tabulka 10: Podmínky okolního prostředí pro měření DC stykače-vzorek 3 a rozdílných časů.....	53

## Seznam grafů

Graf 5.1: Reakční časy DC stykače-vzorek 1 pro 20 V .....	38
Graf 5.2: Reakční časy DC stykače-vzorek 1 pro 7 V .....	39
Graf 5.3: Reakční časy DC stykače-vzorek 2 pro 1 V .....	40
Graf 5.4: Reakční časy DC stykače-vzorek 2 pro 20 V .....	40
Graf 5.5: Reakční časy DC stykače-vzorek 3 pro 20 V .....	41
Graf 5.6: Reakční časy DC stykače-vzorek 3 pro 4,3 V .....	42
Graf 5.7: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro dvě polohy DC stykače-vzorek 2 .....	43
Graf 5.8: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro dvě polohy DC stykače-vzorek 1 .....	44
Graf 5.9: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro DC stykače-vzorek 3 .....	45
Graf 5.10: Minimalizace rozdílných časů bez přípravku.....	49
Graf 5.11: Minimalizace rozdílných časů s přípravkem.....	49

# ÚVOD

Elektromobilový průmysl je v této době, zejména z důvodů enviromentálních změn, na vzestupu. Z důvodu jednoduché konstrukce a vysoké spolehlivosti jsou v elektromobilech využívány stykače stejnosměrné. Hlavní stykače v aplikacích pro elektronickou mobilitu musí udržovat vysokou úroveň proudu pod kontrolou a v extrémních případech bezpečně a spolehlivě vypínat zátěže. Pouze tímto způsobem je zajištěno galvanické oddělení mezi zdrojem energie a následným systémem. U oddělení zdroje a systému většinou figurují dva stejnosměrné stykače, mezi kterými vzniká tzv. dopravní zpoždění, které způsobuje desynchronizaci vypínání stykačů v obvodu. Kromě toho je podporována plná obousměrnost – hlavní stykač musí odpojit vysoké úrovně výkonu nezávisle na směru proudu.

V úvodu práce je popsán stejnosměrný stykač a remanentní magnetismus elektromagnetu, který je faktorem zpoždění vypínání stykače. Elektromagnet je jednou ze součástí stykače, a je zhotoven z magnetického materiálu. Materiály mají různé magnetické vlastnosti a můžeme je rozdělit na magneticky tvrdé a magneticky měkké. Při magnetování těchto materiálů dochází k vytváření hysterezní křivky a následně ke stanovení remanentní indukce, která dává těmto materiálům charakteristické vlastnosti.

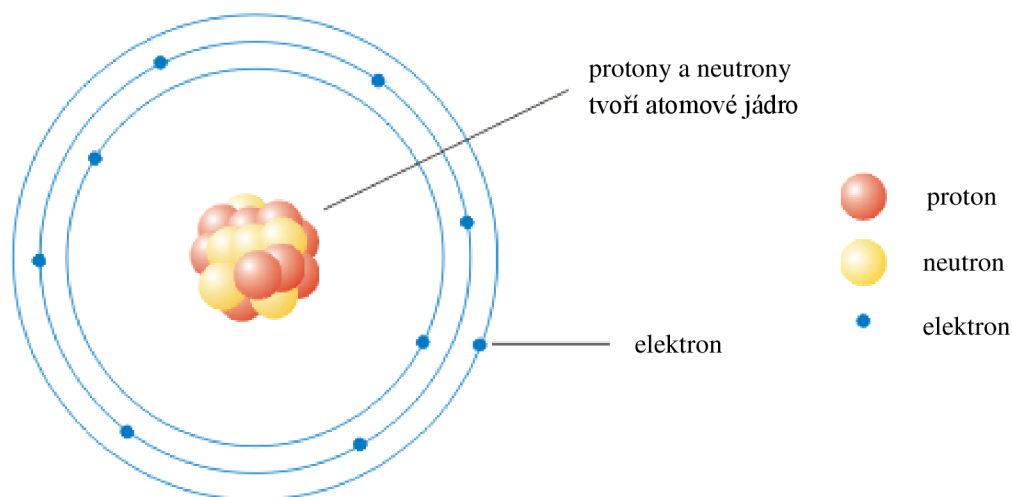
V praktické části bylo na dvojici konkrétních přístrojů provedeno měření reakčních časů při spínání v závislosti na aplikovaném proudu buďící cívkou. Měření probíhalo ve dvou polohách – horizontální a vertikální. Na základě získaných dat byl navrhnut elektronický obvod pro minimalizaci rozdílů spínacích časů daných přístrojů.



Obrázek 1. : DC stykač [1]

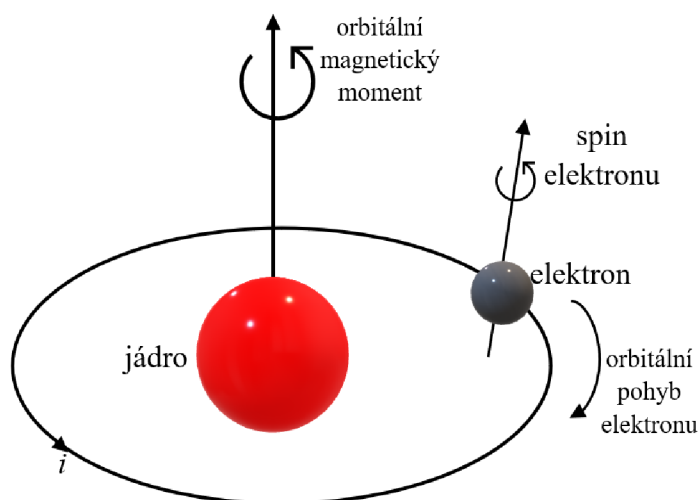
# 1. MAGNETICKÉ MATERIÁLY

Chceme-li si udělat představu o podstatě magnetismu, musíme začít od začátku, a to od atomu. Zjednodušeně lze říci, že je atom složen z protonů a neutronů, které tvoří jádro a elektronů, pohybujících se v elektronovém obale, viz. Obrázek 1.1 [2].



Obrázek 1.1: Bohrov model atomu [2]

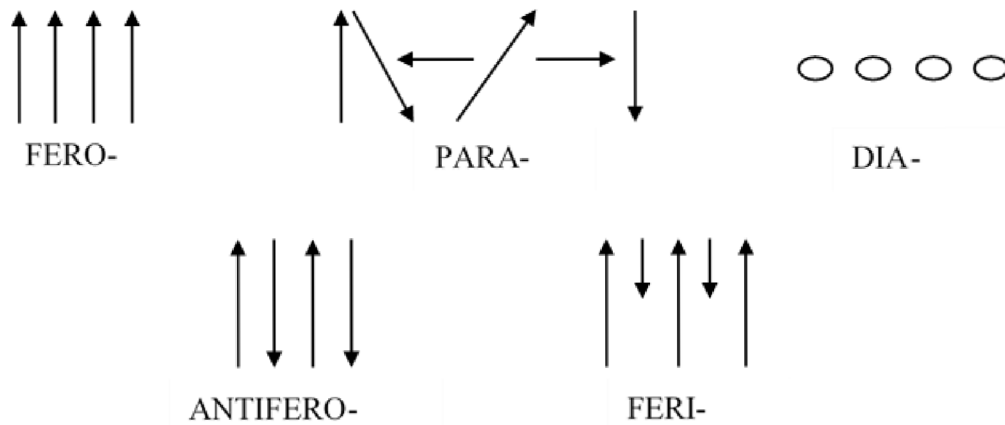
Elektricky nabitě částice (elektrony a protony) se pohybují v uzavřených proudových smyčkách, jež jsou zdrojem magnetických momentů. Magnetický moment se skládá z dráhových (orbitálních) a spinových momentů elektronů. Elektrony krouží jak po určitých drahách, tak vykonávají i vlastní pohyb – spin elektronu. Pokud elektrony nesou elektrický náboj, pak při jejich rotaci vznikají dráhové a spinové magnetické momenty.



Obrázek 1.2: Orbitální pohyb [3]

Své účinky dráhový a spinový moment vektorově skládají. U výsledného celkového momentu rozlišujeme dva stavy: 1. moment atomu může být kladný; 2. dojde k vykompenzování momentů a výsledný magnetický moment je nulový. Jestliže půjde o atomy s vykompenzovanými momenty (výsledný moment je nulový),

anebo nevykompenzovanými momenty (výsledný moment je záporný), jedná se o **diamagnetické atomy**. Vyjde-li součet nevykompenzovaných momentů kladně, jde o **paramagnetické atomy**. Diamagnetické a paramagnetické látky mají z technického hlediska slabé magnetování, a proto je významnější látka **feromagnetická**. Nevykompenzované elektronové spiny feromagnetik přispívají ke stálému magnetickému momentu [4, 5].



Obrázek 1.3: Uspořádání magnetických momentů [5]

Pozn.: Šipky značí velikost a směr momentu, kružnice atomy bez momentu.

Z těchto poznatků lze rozlišit různé látky podle magnetických vlastností na [6]:

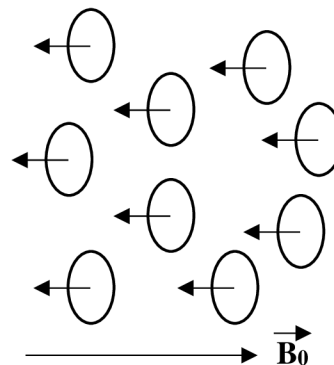
- diamagnetické;
- paramagnetické;
- feromagnetické;
- antiferomagnetické;
- ferimagnetické.

## 1.1 Diamagnetické látky

Jak víme, diamagnetické látky mají výsledný magnetický moment nulový. Do této skupiny patří některé kovy, nekovové pevné prvky, plyny a většina organických látek (např. Cu, Ag, Zn, H<sub>2</sub>, S, ...). U diamagnetických látek je relativní permeabilita  $\mu_r < 1$ .

Pokud na diamagnetickou látku nebude působit vnější magnetické pole, elektron se bude pohybovat po kruhové trajektorii díky působení elektrické coulombovské dostředivé síly.

Vložíme-li diamagnetickou látku do vnějšího magnetického pole s vektorovou intenzitou, ovlivní to pohyb elektronů. Tím vzniká u elektronu orbitální magnetický moment, který má opačnou orientaci než vnější pole. Tím dochází k zeslabení původního vnějšího magnetického pole [4, 6, 7].

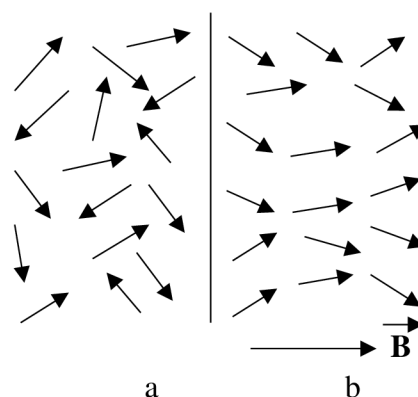


Obrázek 1.4: Magnetický moment při působení vnějšího pole na diamagnetikum [8]

## 1.2 Paramagnetické látky

Mezi paramagnetické látky řadíme například Al, O<sub>2</sub>, Pb, aj. Relativní permeabilita  $\mu_r > 1$ .

Magnetické momenty u paramagnetických látek jsou nenulové a mají nahodilou orientaci. Vložíme-li látku do vnějšího magnetického pole, začnou se magnetické momenty atomů orientovat vždy do směru tohoto pole. Velikost magnetizace ovlivňuje termodynamická teplota. Bude-li teplota klesat, intenzita magnetického pole vzroste [6–8].



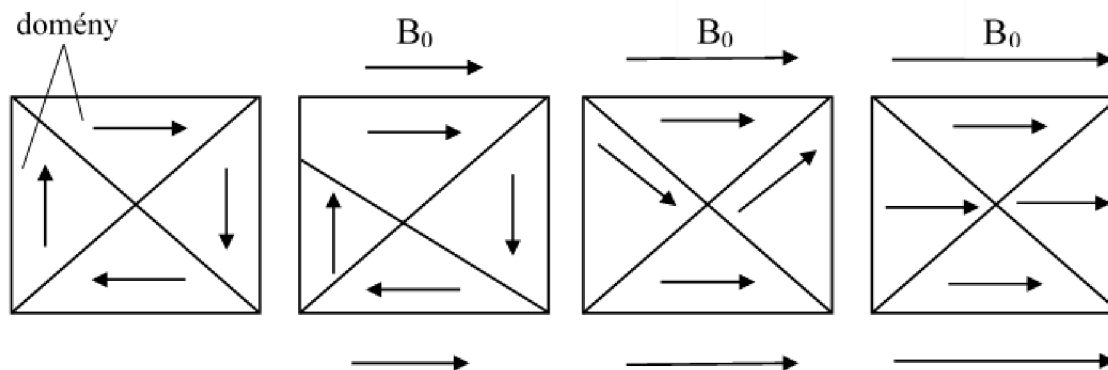
Obrázek 1.5: a) Bez působení b) Působení vnějšího pole na feromagnetikum [8]

## 1.3 Feromagnetické látky

K feromagnetickým látkám se řadí čisté prvky Fe, Co, Ni, Gd, Dy a jejich různé sloučeniny a slitiny. Relativní permeabilita  $\mu_r \gg 1$ .

U feromagnetik se vnitřní magnetické momenty navzájem ovlivňují a obsahují makroskopické oblasti, tzv. domény, u kterých jsou magnetické momenty jednotlivých částic orientováno souhlasně. Domény jsou zmagnetizovány až do nasycení z důvodu velmi velké intenzity vnitřního magnetického pole. Sousední domény jsou odděleny

vrstvami, tzv. Blochovy stěny. Máme-li nezmagnetizovanou látku, jejich domény jsou orientovány nahodile, takže nevzniká žádná magnetizace. Dáme-li látku namagnetizovat dojde k orientaci domén, jak lze vidět na obrázku (Obrázek 1.6). Po zrušení magnetického pole se veškeré momenty domén do původního stavu nevracejí [5–9].

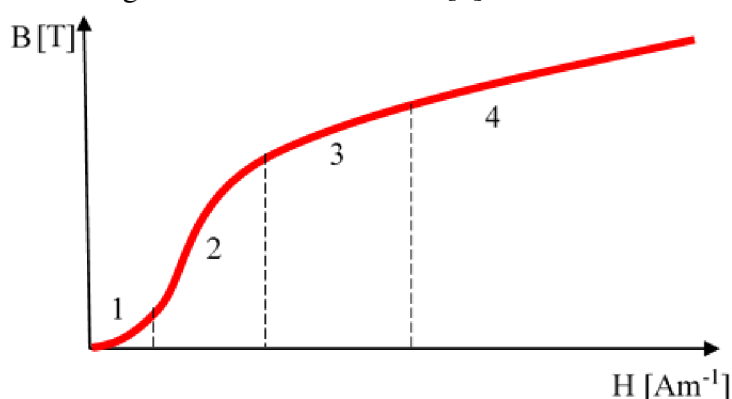


Obrázek 1.6: Vnitřní magnetizace při magnetování [7]

Feromagnetické látky výrazně ovlivňuje teplota. Zahřejeme-li látku na určitou teplotu, tzv. Curierovu teplotu, ztrácí své vlastnosti feromagnetika a stává se paramagnetikem. Tento přechod je nevratný, a proto je důležité dbát na to, aby se Curierovy teploty nedosáhlo [6–9].

### 1.3.1 Magnetování feromagnetika

Vložíme-li feromagnetickou látku do vnějšího magnetického pole, dojde k tzv. prvotní magnetizaci. Prvotní magnetizace má typický průběh, jenž lze popsat křivkou prvotní magnetizace. Tuto křivku lze rozdělit do čtyř částí, které zachycují děje probíhající ve feromagnetiku viz. Obrázek 1.7 [9].



Obrázek 1.7: Křivka prvotní magnetizace (upraveno) [10]

V první části křivky (Obrázek 1.7 označena 1) dochází k posunutí doménové (Blochové) stěny vlivem vnějšího magnetického pole. Objem domén, v nichž se směr magnetických momentů přibližuje směru intenzity magnetického pole nejvíce,

se zvětšuje na úkor objemu domén s nepříznivou orientací magnetických momentů. Tento děj je vratný [9].

V druhé části křivky (Obrázek 1.7 označena 2) se objem domén s příznivou orientací magnetických momentů nadále zvětšuje. Zvyšováním intenzity magnetického pole dochází k nevratnému pohybu doménových stěn. Tyto pohyby jsou způsobeny překonáváním bariér (cizí částice, hranice zrn apod.), jenž brání v jejich pohybu [5, 9].

V třetí části křivky (Obrázek 1.7 označena 3) se Blochovy stěny již neposouvají. Chceme-li magnetickou indukci nadále zvětšovat, musíme magnetické momenty pootočit (orientovat) do směru intenzity magnetického pole. Protože tento děj vyžaduje větší energii, může se uskutečnit pouze v silných magnetických polích. Dojde-li k orientaci (téměř) všech magnetických momentů domén ve směru intenzity vnějšího magnetického pole, nastane magnetické nasycení látky [4, 7, 8].

Ve čtvrté části křivky (Obrázek 1.7 označena 4) lze pozorovat nasycení feromagnetika. I v tomto stavu se magnetická indukce nepatrně zvětšuje, neboť silné magnetické pole je schopno obrátit směr magnetických momentů atomů, jimž tepelný pohyb vnutil antiparalelní orientaci [9].

Budeme-li po zmagnetizování feromagnetika intenzitu vnějšího magnetického pole zmenšovat, magnetická indukce nabude hodnoty vyšší než při prvotní magnetizaci. Tento děj označujeme jako magnetická hystereze.

## Permeabilita

Permeabilita je veličinou charakterizující magnetické vlastnosti látek. Popisuje schopnost magnetického pole pronikat do materiálu. Permeabilita je definovaná vztahem (1.1) [11]:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.1)$$

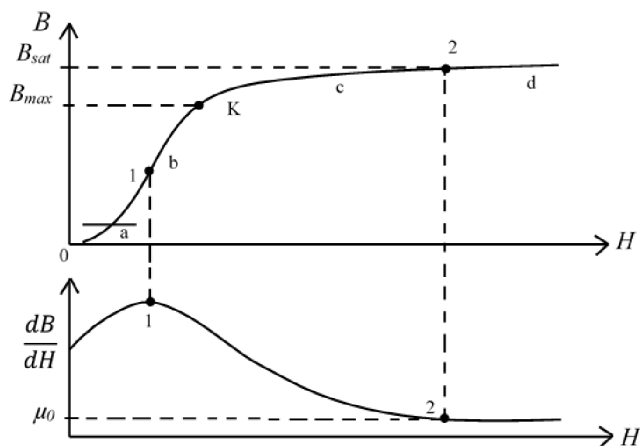
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1.2)$$

kde	$\mu$	permeabilita [ $\text{Hm}^{-1}$ ]
	$\mu_0$	permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$
	$\mu_r$	je relativní permeabilita [-]
	$H$	intenzita magnetického pole [ $\text{Am}^{-1}$ ]
	$B$	magnetická indukce [T]



Relativní permeabilita je definovaná pouze pro body (H,B) jenž leží na křivce prvotní magnetizace z čehož vyplývá, že pro body ležící na hysterezní smyčce význam nemá [12].

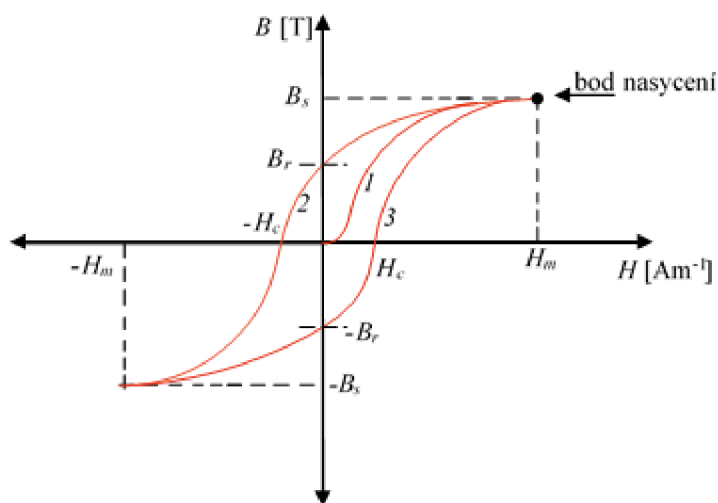
Na obrázku (Obrázek 1.8) lze vidět průběh prvotní magnetizace a diferenciální permeability  $\frac{dB}{dH}$ , která je derivací křivky prvotní magnetizace.



Obrázek 1.8: Křivka prvotní magnetizace společně s průběhem diferenciální permeability [6]

### Hysterezní smyčka

Úvodem bude popsán cyklus přemagnetování. Počátkem je bod nasycení ( $+H_m$ ). Intenzita vnějšího magnetického pole se bude zmenšovat na 0, poté obrátí směr a bude magnetizována v opačném směru až k bodu  $-H_m$  (podle křivky 2 Obrázek 1.9). Intenzita bude znovu zmenšena na 0 a opět bude změněn směr a magnetizuje se do výchozího bodu  $+H_m$  (podle křivky 3 Obrázek 1.9). Cyklus přemagnetování proběhl po uzavřené smyčce, tzv. hysterezní (Obrázek 1.9) [4]. Křivka je vždy středově souměrná [6].



Obrázek 1.9: Hysterezní smyčka (upraveno) [10]

Hysterezní smyčka má několik důležitých bodů:

**Remanentní indukce – remanence  $B_r$  [T]**

- zbytková magnetická indukce, kterou si materiál podrží i po zrušení magnetického pole tzn. v bodě  $H=0$ ;
- vzniká vlivem nevratných dějů při magnetování látky;
- obvykle nabývá hodnot 0,5–1 T [4, 10].

**Indukce nasycení –  $B_s$  [T]**

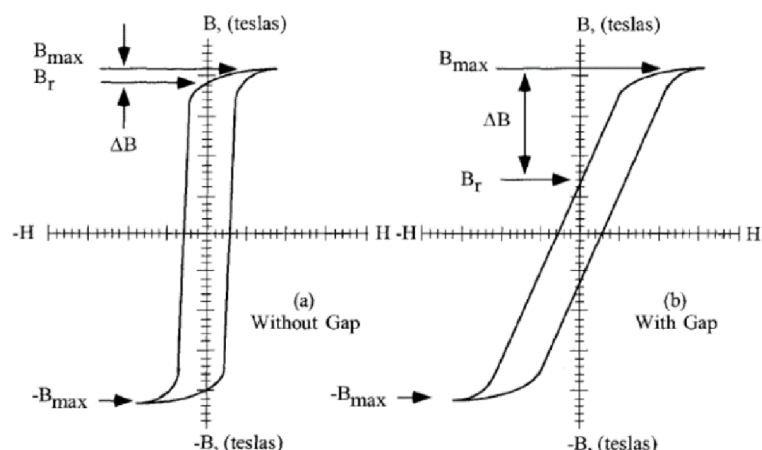
- magnetická indukce, při níž je látka magneticky nasycena;
- obvykle nabývá hodnot 0,1–2,15 T [8].

**Koercitivní síla – koercitivita  $H_c$  [ $\text{Am}^{-1}$ ]**

- intenzita, při níž dojde ke zrušení remanentní magnetické indukce  $B_r$ ;
- obvykle nabývá hodnot  $10^{-1}$ – $10^5 \text{ Am}^{-1}$ ;
- hodnota závisí na látce, tj. zda je látka magnetický měkká nebo tvrdá [5, 9, 10].

Tvar smyčky je dán chemickým složením látky a její strukturou. V praxi se však přidávají i vnější vlivy:

- teplota – s jejím růstem  $B_s$ ,  $B_r$  a  $H_c$  klesá;
- deformace – v tahu se hysterezní křivka zplošťuje, v tlaku se zeštíhluje;
- frekvence – s rostoucí frekvencí přemagnetování se  $B_s$  snižuje a  $B_r$  zvětšuje;
- přemagnetování a velikost  $H_m$  mění veškeré charakteristické vlastnosti
- způsoby zpracování materiálu [4, 10];
- vzduchová mezera – je-li v magnetickém obvodu přítomna vzduchová mezera, smyčka se zplošťuje (viz. Obrázek 1.10)
  - vzduchová mezera do jádra má silný demagnetizační účinek, který má za následek zploštění hysterezní smyčky;
  - velikost účinku vzduchové mezery závisí na délce střední magnetické dráhy a na vlastnostech nerozřezaného jádra [13].



Obrázek 1.10: Vliv vzduchové mezery na tvar hysterezní křivky [13]

## 1.4 Rozdělení magnetických materiálů

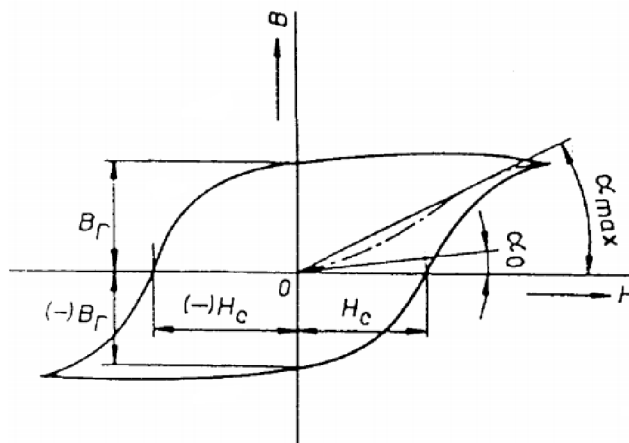
Magnetické materiály se z hlediska jejich technologického použití rozdělují na magneticky měkké, tvrdé, polotvrdé a magnetické materiály pro speciální účely [5, 9]. „Magneticky tvrdý a měkký“ nesouvisí s mechanickou měkkostí nebo tvrdostí materiálu. Existují materiály, které jsou magneticky měkké avšak mechanicky tvrdé, a naopak [4]. Pro potřeby této diplomové práce se budeme věnovat pouze materiálům magneticky tvrdým, ale především materiálům magneticky měkkým, neboť ty se používají pro elektromagnety, transformátory apod.

### 1.4.1 Magnetické tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály (dále jen MTM) se využívají k výrobě permanentních magnetů, protože mají defektní strukturu znesnadňující přemagnetování. MTM jsou tepelně citlivé, dlouhodobě nestabilní a jejich vlastnosti se zhoršují z důvodu stárnutí [5, 9].

#### Základní vlastnosti:

- široká hysterezní smyčka (viz. Obrázek 1.11);
- obtížně se magnetují i odmagnetují;
- vysoká koercivita  $H_c$  a remanence  $B_r$  ( $H_c > 800 \text{ Am}^{-1}$ );
- prvotní magnetizace má pozvolnější průběh [5, 9, 10].



Obrázek 1.11: Hysterezní smyčka MTM [9]

Nejvyužívanější MTM jsou ferity, magnety ze vzácných zemin (Sm-samarium, Nd-neodym), slitiny typu Al-Ni-Co a slitiny typu platina-cobalt a jiné [5, 10].

Za zmínku stojí Sm-Co a Fe-Nd-B jejich sloučeniny jsou velmi tvrdé a křehké. Magnety se vyrábějí práškovou technologií a umožňují miniaturizaci rozměrů. Dosáhnou stejné přídržné síly i když jsou rozměrově mnohem menší než např. magnety z feritu (neodymové magnety dokáží unést více jak tisícinásobek své hmotnosti). Jejich nevýhodou je však vysoká cena surovin a náročné technické zpracování. Výhodou pak magnetické vlastnosti [9].

Tabulka 1: Magnetické vlastnosti MTM [9]

Materiál	Koercitivita $H_c$ [kAm <sup>-1</sup> ]	Remanence $B_r$ [T]	Curerova teplota [°C]
Sm-Co	720 ÷ 790	1,03 ÷ 1,06	825
Fe-Nd-B	830 ÷ 870	1,13 ÷ 1,2	310

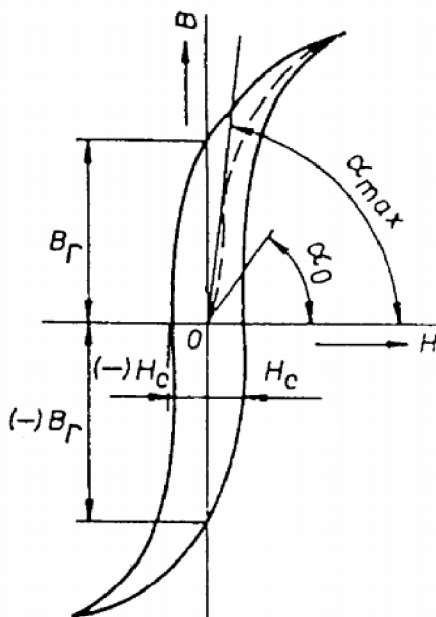
#### 1.4.2 Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály (dále jen MMM) se používají především ke zvýšení, anebo usměrnění toku vytvořeného elektrickým proudem. Lze je uplatnit jak v obvodech se střídavou, tak stejnosměrnou magnetizací. Ve stejnosměrných aplikacích se materiál nejprve magnetizuje, za účelem provedení operace a poté se na konci operace demagnetizuje. Ve střídavém obvodu se materiál nepřetržitě magnetizuje od jednoho směru do druhého, po celou dobu operace [14].

##### Základní vlastnosti:

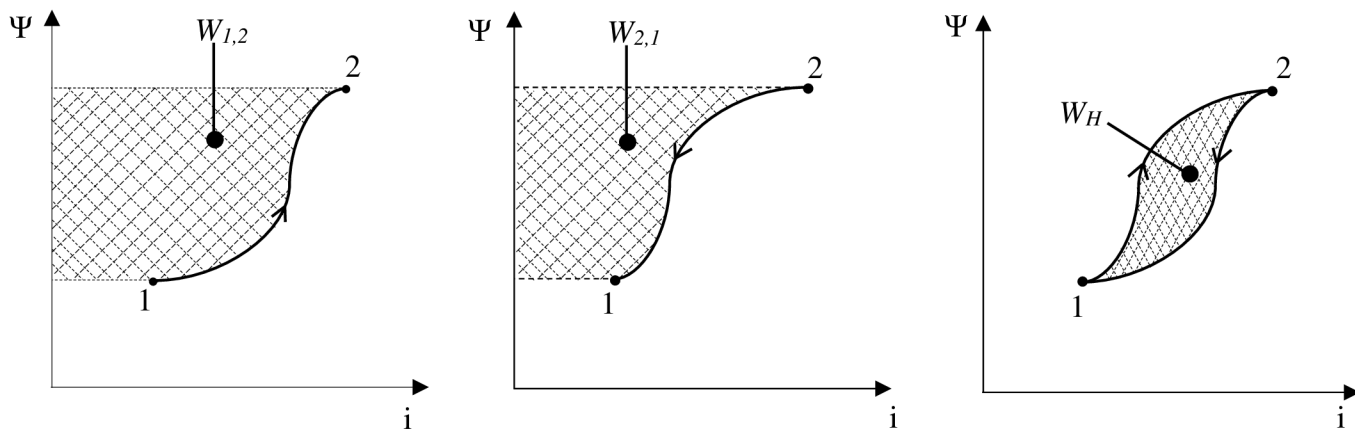
- úzká hysterezní smyčka (viz. Obrázek 1.12);
- snadno se magnetují i odmagnetují;
- nízká koercivita  $H_c$  ( $H_c < 800 \text{ Am}^{-1}$ );
- vysokou relativní permeabilitu, která v průběhu magnetizace klesá;

- malé hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy;
- vysoká indukce nasycení;
- strmá křivka prvotní magnetizace [9, 10].



Obrázek 1.12: Hysterezní smyčka MMM [9]

Ztrátová energie je přímo rovna ploše smyčky. Akumulovaná energie  $W_{1,2}$  v magnetickém obvodu je větší (pohyb z bodu 1 do 2), než energie  $W_{2,1}$ , která je odevzdána do zdroje (pohyb 2 do 1). Ztrátová hysterezní energie  $W_H$  je rovna rozdílu těchto energií (viz. Obrázek 1.13). Poněvadž má úzká hysterezní smyčka u MMM menší plochu, jsou ztráty menší než u MTM, neboť jejich hysterezní smyčka je široká.



Obrázek 1.13: Ztrátové energie hysterezní smyčky [6]

Magneticky měkké materiály se dělí dle normy IEC (viz. Tabulka 2) [12]. Níže budou popsány pouze čisté železo, nízkouhlíkaté oceli a křemíkové oceli, což jsou nejpoužívanější materiály.

Tabulka 2: Třídění MMM dle normy IEC [12]

A	Železo		
B	Nízkouhlíkaté oceli		
C	Křemíkové oceli	C1 masivní materiály C2 ploché materiály	C21 izotropní C22 anizotropní C23 tenké
D	Ostatní oceli		
E	Slitiny Ni-Fe	E1 72–83 % Ni E2 54–68 % Ni E3 45–50 % Ni E4 35–40 % Ni E5 cca 30 % Ni	
F	Slitiny Fe-Co	F1 47–50 % Co F2 35 % Co F3 23–27 % Co	
G	Ostatní slitiny	G1 Al-Fe G2 Al-Si-Fe	
H	Magneticky měkká keramika		

## ŽELEZO A NÍZKOUHLÍKOVÉ OCELI

V čistém železe vznikají při střídavé magnetizaci velké ztráty z důvodu malé rezistivity, a proto se využívají pro magnetické obvody stejnosměrných strojů a přístrojů [10]. Ačkoli má čisté železo jako MMM výtečné vlastnosti, v praxi se však v širokém měřítku z důvodů nákladného odstraňování škodlivých příměsí (kyslík, dusík, uhlík, apod.) nepoužívá [5, 9].

Nízkouhlíkaté oceli (obsah uhlíku max. 0.1 %) jsou vyráběny ve formě plechů a pásů. Chemická čistota, krystalové poruchy a vnitřní pnutí mají velký vliv na koercitivitu, hysteretní ztráty a permeabilitu (železo čistoty 99,99%  $\mu_{rmax}=100\ 000$ , čistota 99,96%  $\mu_{rmax}=5\ 000$ ) [9, 10].

## KŘEMÍKOVÁ OCEL

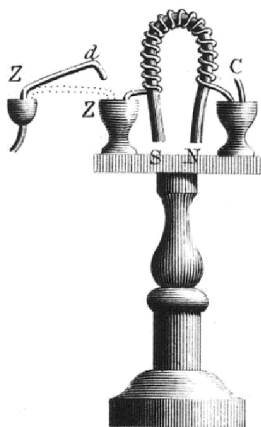
Křemíkové oceli se v praxi používají nejvíce, neboť křemík zvyšuje rezistivitu, ale naopak zmenšuje koercitivitu a měrné ztráty [9, 10]. Vysoký obsah křemíku má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti – materiál se stává tvrdý a křehký, špatně se tvaruje i stříhá. Také snižuje elektrickou vodivost slitin [5].

## 2. ELEKTROMAGNET

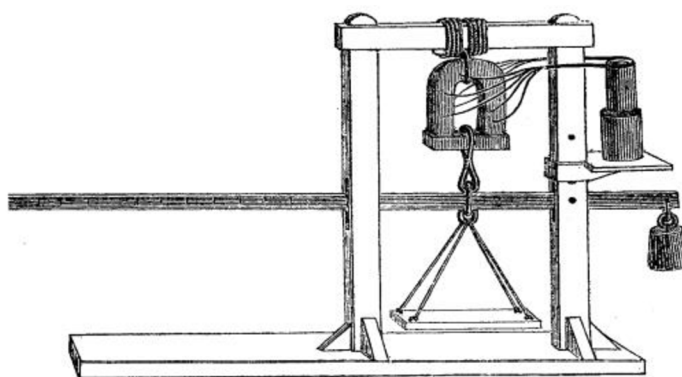
Elektromagnetem nazýváme zařízení, které vytváří v určitém prostoru magnetický tok [15]. Jedná se v podstatě o elektromechanický měnič energie. Z hlediska třídění se označuje jako elektrický stroj [16]. Elektromagnet se skládá z pohyblivé kotvy a cívky (izolované dráty), jež je obtočena kolem železného feromagnetického jádra. Prochází-li drátem elektrický proud, kolem jádra cívky se vytváří silné magnetické pole, které je zabezpečeno použitím feromagnetika [17].

### 2.1 Historie elektromagnetu

První elektromagnet vynalezl britský vědec William Sturgeon ve 20. letech 19. století. Jednalo se o kus lakovaného železa ve tvaru podkovy, obalený závity holého měděného drátu. Procházel-li proud cívkou elektromagnetu, přitahoval kousky železa (až 4 kg) [18, 19]. Na práci Williama Sturgeona navázal vědec Joseph Henry. Ten elektromagnet zdokonaloval a popularizoval. Experimentoval s izolovanými dráty, aby mohl navinout více vrstev na jádro. Také zkoušel cívky propojovat paralelně a sériově. Díky zdokonalování dokázal elektromagnet uzvednout okolo 1,5 tuny [20, 21].



Obrázek 2.1:  
Elektromagnet  
Sturgeona [18]



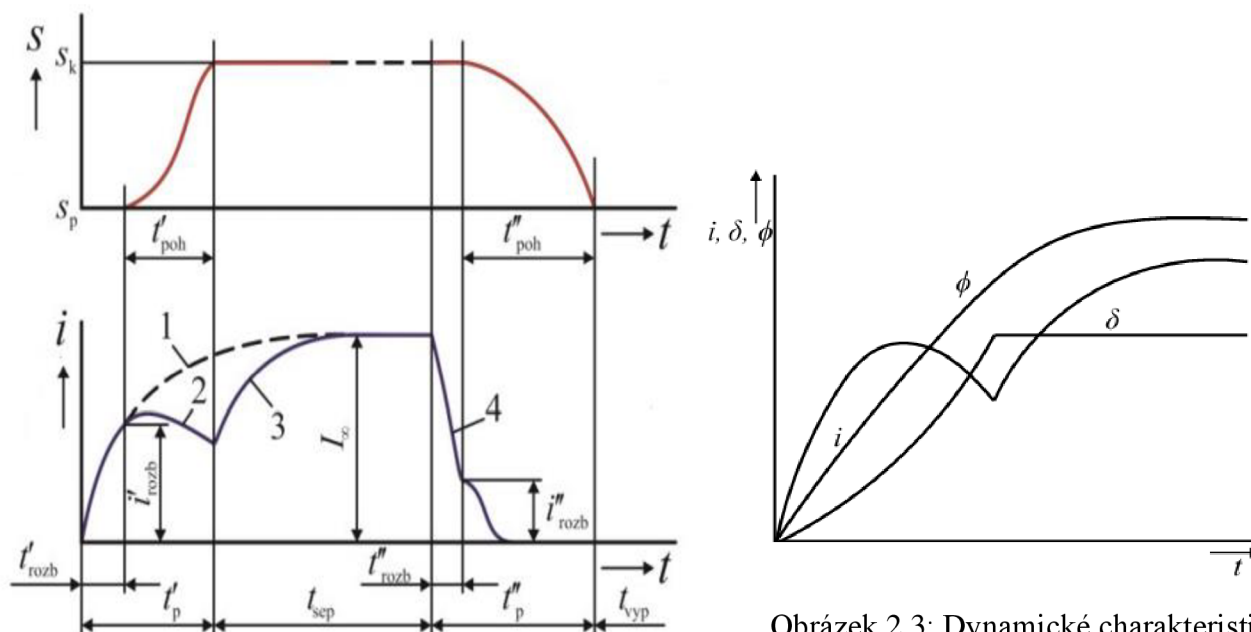
Obrázek 2.2: Elektromagnet J. Henryho [21]

## 2.2 Vlastnosti elektromagnetu

Elektromagnety se používají jak ve střídavé, tak i stejnosměrné aplikaci. Jsou vhodné zejména u stykačů nízkého napětí (dále jen nn) pro malé síly. Používanějšími jsou elektromagnety stejnosměrné, protože z hlediska proudových poměrů a jejich vlivu na silové poměry, rozměry a využití magnetických obvodů jsou výhodnější.

Vlastnosti všech elektromagnetů vyjadřuje pracovní charakteristika (tahová charakteristika), která znázorňuje závislost tahové síly na zdvihu kotvy. Důležitý parametr u elektromagnetu je také doba přitahu kotvy [22].

### 2.2.1 Cyklus stejnosměrného elektromagnetu



Obrázek 2.3: Dynamické charakteristiky elektromagnetu [16]

Obrázek 2.4: Pracovní cyklus elektromagnetu [15]

Pracovní cyklus elektromagnetu je cyklický. Cyklus začíná připojením vinutí ke zdroji, kotva je v počáteční poloze ( $s_p$ ) a končí, jakmile kotva dosáhne přitažení – konečné polohy ( $s_k$ ). Doba působení  $t_p$  se dělí na dobu rozběhu  $t_{rozb}$  a dobu pohybu  $t_{poh}$ .

Proud ve vinutí elektromagnetu a magnetický tok se během rozběhu zvětšuje  $i'_{rozb}$ ,  $\Phi$ . Při dosažení tohoto proudu jsou si mechanické a elektromagnetické síly rovné a směřují proti sobě. Doba  $t'_{rozb}$  závisí nejenom na způsobu zapojení budících cívek elektromagnetu, ale i na jeho zátěži a samotném konstrukčním řešení. V průběhu pohybu kotvy vykonává elektromagnet práci, pro niž je určen. Během tohoto pohybu se proud v budící cívce mění (křivka 2 Obrázek 2.4). Časová změna je způsobena přechodným jevem, jenž probíhá po připojení cívky na stejnosměrné napětí (křivka 1 Obrázek 2.4) a indukovaným napětím, které vzniká pohybující se kotvou. Po přitažení nastává sepnutí (kotva se nepohybuje a cívka je trvale připojena ke zdroji), jejíž doba



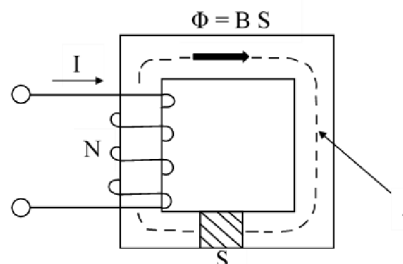
závisí na konkrétních provozních požadavcích. Proud se na počátku zvětšuje do hodnoty ustáleného stavu (křivka 3 Obrázek 2.4) a zůstává konstantní, nedojde-li ke změně obvodu elektromagnetu, zůstává konstantní i magnetický tok [15].

Navrácení kotvy do původní polohy probíhá ve dvou krocích:

1. Proud a magnetický tok se po odepnutí od zdroje zmenšuje. Proud se zmenšuje do hodnoty  $i''_{roz}$ , kde dochází k vyrovnání elektromagnetické (vytvořena magnetickým tokem) a mechanické síly, jež působí opačným směrem a kotva tak začíná odpadávat. Doba odpadu ( $t''_{roz}$ ) závisí na vícero faktorech, např. na zátěži elektromagnetu či způsobu vypínání cívky. Doba pohybu s dobou odpadu dávají dobu vypínací.
2. Cyklus končí odpojením elektromagnetu od zdroje a jeho následným ochlazováním [15].

## 2.2.2 Hopkinsonův zákon a lineární diskretní magnetický obvod

Diskretní obvod je popisován tehdy, zanedbá-li se rozptylový tok, a v němž je magnetický tok  $\Phi$  vyznačen cestou, která je ohraničená v prostoru. Mezi diskretní obvod patří feromagnetická jádra jednoduchých tvarů. Je-li feromagnetikum v nasyceném stavu, dochází k prudkému klesání permeability (měrná magnetická vodivost) [6].



Obrázek 2.5: Diskretní lineární magnetický obvod [6]

Je-li obvod homogenní, můžeme psát následující magneticko-elektrické analogie [6].

$$U_m = N \cdot I = H \cdot l \quad (2.1)$$

Kde  $U_m$  magnetické napětí (magnetomotorické napětí) [A]  
 $N$  počet závitů  
 $I$  proud [A]  
 $H$  intenzita magnetického pole [ $\text{Am}^{-1}$ ]  
 $l$  délka [m].

$$I_m \equiv \Phi = B \cdot S \quad (2.2)$$

Kde	$I_m$	magnetický proud [Wb]
	$\Phi$	magnetický tok [Wb]
	$B$	magnetická indukce [T]
	$S$	průřez feromagnetika [m <sup>2</sup> ].

Pro řešení magnetických obvodů se využívá Hopkinsonův zákon, který je analogií Ohmova zákona [6, 23].

$$U_m = R_m \cdot \Phi = \frac{\Phi}{\lambda_m} \quad (2.3)$$

Hopkinsonův zákon: 
$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} \quad (2.4)$$

$$\lambda_m = G_m = \frac{B}{H} \cdot \frac{S}{l} = \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (2.5)$$

Kde	$R_m$	magnetický odpor jádra v diskrétním lineárním mag. obvodu (reluktance) [H <sup>-1</sup> ]
	$\lambda_m, G_m$	magnetická vodivost [H].

Pokud upravíme Hopkinsonův zákon a vynásobíme jej počtem závitů  $N$ , dostaneme tento vztah [6]:

$$N \cdot I \cdot \lambda_m = \Phi \quad (2.6)$$

$$N^2 \cdot I \cdot \lambda_m = N \cdot \Phi \cong \Psi = L \cdot I$$

Kde  $L$  [H] je indukčnost lineárního diskrétního magnetického obvodu

## 3. STYKAČE

Stykače jsou spínací zařízení, které se využívají pro časté spínání provozních proudů elektrických spotřebičů. Spínají jmenovité proudy a proudy v oblasti provozního přetížení (až cca 6–8násobek jmenovitého proudu). Stykače spínají pomocí samočinného řídicího ústrojí nebo obsluhy. Vypínají díky čidlům, která obvykle hlídají určitou veličinu, anebo nadproudovému jistícímu relé. Kontaktní a zhášecí ústrojí stykače není dimenzováno na vypínání zkratových proudů, proto se musí předřadit jistící prvek pro oblast těchto proudů (např. pojistka). Stykač má dvě polohy – vypnuto a zapnuto. Stabilní polohou pro stykač je zpravidla vypnuto. Do druhé polohy (zapnuto) se dostává přes strojní mechanismus, který může být například: vačkový, pneumatický nebo elektromagnetický [22, 24].

### 3.1 Konstrukce elektromagnetického stykače

Stykač má tři hlavní části: spínací, ovládací a jistící ústrojí.

#### 1. Spínací ústrojí

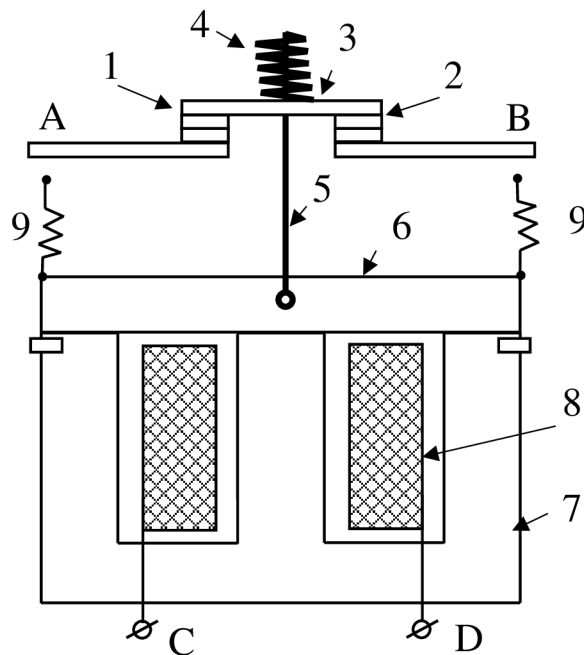
Spínací ústrojí má pouze hlavní kontakty. Oblouk se vytváří přímo mezi nimi a zháší se buďto nejčastěji ve vzduchu, ve vakuu anebo vodíku s příměsí dalších plynů. Stejnoseměrné stykače a stykače pro velké proudy mají zhášecí cívky, permanentní magnety, nebo kombinaci těchto dvou.

#### 2. Ovládací ústrojí

Ovládací ústrojí tvoří elektromagnet (viz. kapitola Elektromagnet). Pohyb kotvy je zprostředkován buď přímo, anebo přes mechanismus.

#### 3. Jistící ústrojí

Jistící ústrojí je konstruováno samostatně a obvykle jej tvoří tepelné relé, jehož kontakt je zařazen do obvodu ovládací cívky stykače [25].



Obrázek 3.1: Schéma elektromagnetického stykače [24]

Popis schéma elektromagnetického stykače (Obrázek 3.1) [24]:

- |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| 1 a 2 – hlavní kontakty  | 7 – elektromagnet       |
| 3 – spínací můstek       | 8 – cívka               |
| 4 – kontaktní pružina    | 9 – vratné pružiny      |
| 5 – izolační člen        | A a B – přívodní svorky |
| 6 – kotva elektromagnetu | C a D – svorky          |

### 3.2 Klasifikace stykačů

Klasifikaci stykačů můžeme rozdělit dle:

- energie pro ovládání;
- zhášecího média;
- proudové soustavy;
- napětí;
- počtu pólů.

#### Energie pro ovládání stykačů

Podle energie pro ovládání dělíme stykače na:

- elektromagnetické:** po zapnutí uvede elektromagnet kontaktní soustavu do zapnuté polohy a po vypnutí se tato soustava vrací do vypnuté polohy vlastní vahou nebo silou vratné pružiny;

- 2) **další ovládání:**                   pneumatické, elektropneumatické, vačkové.

Elektromagnetické stykače jsou nejrozšířenější, neboť umožňují sestavovat složité stykačové kombinace. Pneumatické a elektropneumatické ovládání stykačů se používají především u elektrických vozidel, kde je využito brzd ovládaných stlačeným vzduchem. Dále je používáme také tam, kde je z nějakého důvodu nutné úplné vyloučení elektrické vodivosti ovládací části.

### **Zhášecí média**

Podle zášecího média dělíme stykače na:

- 1) **vzduchové:**           zhášecí ústrojí a hlavní kontakty jsou umístěny ve vzduchu;
- 2) **olejové:**            hlavní kontakty a většinou i celý stykač je ponořen v oleji;
- 3) **vakuové:**           kontakty se vyskytují ve vysoce zředěném prostředí, což stykači dává velkou elektrickou pevnost, dobré zášecí podmínky a nezávislost na okolní prostředí;
- 4) **plyny:**               mezi nejčastější zášecí plyny se řadí například dusík, vodík a SF<sub>6</sub>.

### **Proudové soustavy**

Podle proudové soustavy dělíme stykače na:

- 1) **stejnoseměrné**
- 2) **střídavé**

### **Napětí**

Podle napětí dělíme stykače na:

- 1) **nízké:**               stykače se vyrábějí v úplných typových řadách, vyrábějí se v poměrně velkých sériích;
- 2) **vysoké:**            stykače se vyrábějí v jednotlivých typech pro určité aplikace, obvykle se jedná o trakci.

### **Počty pólů**

Podle počtu pólů dělíme stykače na:

- 1) **jednopolové**           stejnoseměrné obvody
- 2) **dvupólové**
- 3) **trojpolové**            trojfázové střídavé
- 4) **vícepolové**            obvody [24].

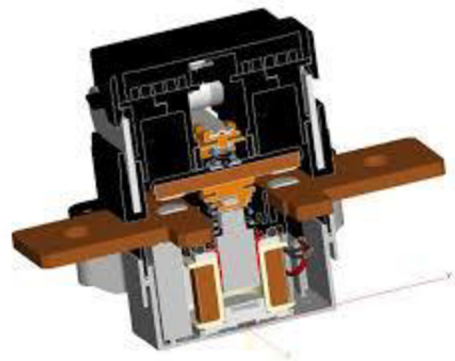
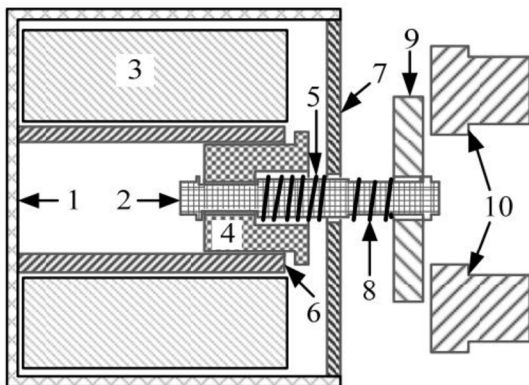
Stykače se pro různé druhy použití rozdělují podle normy ČSN EN 60947-4-1 ed. 3. Příklady lze vidět vypsane v tabulce níže.

Tabulka 3: Kategorie použití stykačů ČSN EN 60947-4-1 ed. 3.

KATEGORIE		TYPICKÁ APLIKACE
AC střídavý proud	AC1	neinduktivní nebo slabé indukční zátěž, např. odporové pece
	AC2	spouštění kroužkových asynchronních motorů včetně zarážení
	AC3	spouštění motorů nakrátko, vypínání za chodu
	AC4	spouštění motoru nakrátko, včetně zarážení a pojíždění
	AC5a	spínání výbojek
	AC5b	spínání žárovek
	AC6a	spínání transformátorů
	AC6b	spínání kondenzátorových baterií
	AC7a	induktivní zátěž v domácích spotřebičích
	AC7b	motorové zátěže v domácnosti
AC8a		řídící zařízení motorů hermetických chladicích kompresorů s ručním opětým nastavováním spouští na přetížení
	AC8b	řídící zařízení motorů hermetických chladicích kompresorů s automatickým opětým nastavováním spouští na přetížení
DC stejnoseměrný proud	DC1	neinduktivní nebo slabě indukční zátěže (odporová pec)
	DC3	zapínání derivačních motorů, zarážení, pojíždění
	DC5	zapínání sériových motorů, zarážení, pojíždění
	DC6	spínání žárovek

## 4. STEJNOSMĚRNÝ STYKAČ

Stejnoseměrné stykače (Obrázek 4.1) jsou díky jednoduše konstrukci, vyspělé technologii a vysoké spolehlivosti široce používány v průmyslových aplikacích [26]. Hojně se používají v ponorkách, elektrických vozidlech, letadlech, vlacích a jiných nízkonapěťových i vysokonapěťových stejnosměrných napájecích systémech. Vzhledem ke svému pracovnímu prostředí je velmi často kladen důraz na omezení objemu a hmotnosti stykače, což vyžaduje, aby kontaktní systém stykače měl vynikající absorpční a vypínací schopnost [27, 28].



- 1- plášť, 2- tyč, 3- cívka, 4- kotva, 5- vratná pružina,  
6- objímka ze železného jádra, 7- třmen, 8- tlumicí pružina,  
9- pohyblivé kontakty, 10- pevné kontakty

Obrázek 4.1: Struktura stejnosměrného stykače [28, 33]

### 4.1 Nežádoucí vlivy na působení stejnosměrného stykače

#### Teplota

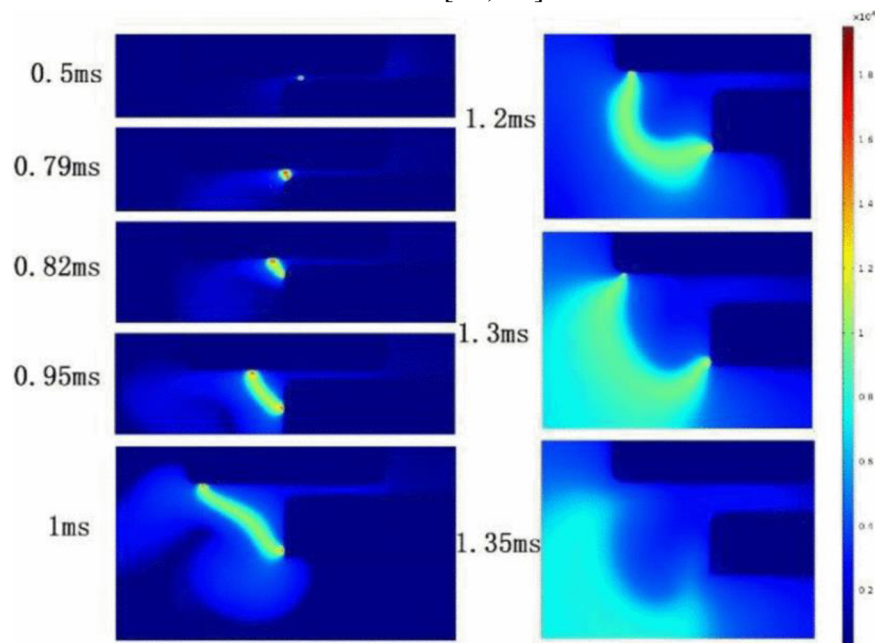
Z termoelektrického hlediska stejnosměrné stykače odpovídají stacionárním stejnosměrným kontaktům ve vodivém stavu, tj. v uzavřené poloze. Při vysokých hodnotách provozní teploty stejnosměrné kontakty obecně trpí během spínání (jiskření) více než střídavé kontakty, zejména kvůli delším dobám přerušení oblouku. Také zde hraje významnou roli absence průchodu proudu nulou, tedy absence vzájemné výměny kladné a záporné elektrody.

U většiny stykačů se používá uspořádání s dvojitým rozpojením se dvěma pevnými kontakty a pohyblivým můstkem. Toto uspořádání má výhody pro jejich elektrické chování, protože použití více proudových přerušení znamená, že celková délka oblouku nutná pro jeho uhašení je menší než u jediného proudového přerušení. Nevýhodou vícenásobného přerušení proudu je nárůst tepla generovaného v důsledku kontaktního odporu obou kontaktů a také zhoršený odvod tepla z kontaktního můstku. Přehřátí je však vážným problémem všech elektrických kontaktů a ohrožuje jejich funkčnost. To se děje hlavně kvůli oxidům kovů vytvořených v kontaktním styku, což vede ke zvýšení kontaktního odporu

a následně ke zvýšení teploty během vedení. Zvýšení kontaktní teploty dále urychluje proces oxidace na kontaktních površích a následně způsobuje větší zvýšení kontaktního odporu. Tento proces může kontakt až zničit [27].

### Hoření oblouku

Doba trvání oblouku a energie oblouku je důležitý parametr, který ovlivňuje změnu hmotnosti elektrod. Když je napájecí napětí velké, energie oblouku roste. Podobně energie v oblouku roste, je-li elektrický proud velký. Působení oblouku má za následek opálení kontaktů a také může způsobovat „krátery“ na elektrodách. Obloukový výboj se pohybuje nejenom na kontaktní ploše, ale také vytváří povrchové cesty. Z tohoto důvodu u stejnosměrného elektromagnetického stykače je důležitá nejenom část elektrického kontaktu, ale také struktura základního kovu [29, 30].



Obrázek 4.2: Příklad hoření oblouku [30]

## 4.2 Remanentní magnetizace jader stykače

Vzhledem k hystereznímu účinku vnějšího magnetického pole na elektromagnetický mechanismu stykače, je v magnetickém obvodu zbytkový magnetismus, kterému nelze zabránit. Pokud je zbytková magnetizace příliš velká, železné jádro se po vypnutí cívky ihned neuvolní. Hlavní obvod se tedy po určitou dobu zpozdí, což může mít mnoho nepříznivých účinků na reléové ochranné zařízení a primární zařízení.

Jestliže budíme stejnosměrným proudem o určité velikosti magnetický obvod, bude mít danou remanentní indukci, která bude mít určitou sílu. Zbytkový magnetický tok elektromagnetického mechanismu stykače lze získat za různých podmínek buzení [31].



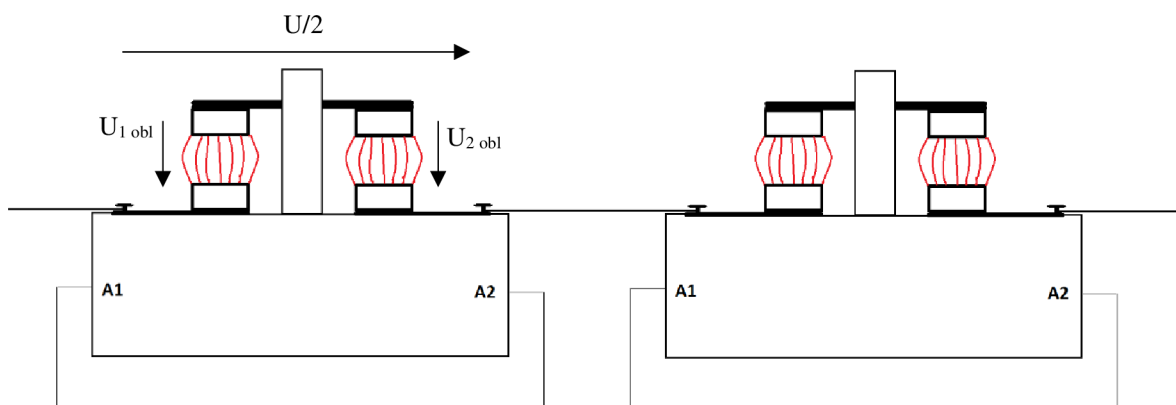
## Hypotézy

- Vypínání kontaktů DC stykače ovlivňuje jeho digitální, výkonová, silová a mechanická část.
- Digitální řízení stykače zahrnuje dopravní zpoždění, zejména od mikroprocesorů, které se pohybuje kolem jednotek až desítek nanosekund.
- U výkonové části je řízení zajištěno například výkonovým tranzistorem. Tranzistor disponuje svou vypínací dobou  $t_{off}$ , která přispívá do dopravního zpoždění, které vzniklo už u digitální části.
- Silová část ovlivňuje rozepínání kontaktů cívky stykače. Napětí na cívce klesá (odbuzuje se pomalu) z důvodu bránění se změnám proudu.
- Posledním faktorem je mechanická část, kterou elektrotechnik nemá možnost ovlivnit. Jedná se například o výrobní technologii magnetického obvodu (remanentní indukce) nebo vypínací mechanismus.

Majoritní dopravní zpoždění vzniká u odbuzování cívky (pohybuje se řádově kolem desítek mikrosekund). Toto dopravní zpoždění je zapotřebí řešit, neboť může stykač zničit. Příkladem může být zapojení dvou stykačů do série. Bude-li mít jeden dopravní zpoždění menší než druhý, na pomalejším stykači nebude skoro žádný výkon. Z toho vyplývá, že při vypínání se objeví elektrický oblouk, který může způsobovat lokální destrukce, jakou jsou například opalování kontaktů, vypařování materiálu atd. (viz hoření oblouku výše).

## Sériové zapojení

Jsou-li stykače zapojené sériově, je na obou stykačích, v ideálním případě, poloviční napětí a výkon, nejen z tohoto důvodu se mohou stykače dimenzovat na menší napětí (dalšími důvody mohou být například: izolační hladina ve vypnutém stavu je výrazně vyšší, elektrická životnost, neboť se výkon oblouku rozdělí). Tento fakt lze považovat za výhodu tohoto zapojení. Nevýhodou je, že v sepnutém stavu jsou u jednoho stykače dva odpory v kontaktu, což způsobuje ztráty. Další nevýhodou je, že vypíná-li jeden ze stykačů dříve, vzniká nesoudobost. Nesoudobost způsobí delší hoření (než je potřeba) oblouku na jednom ze stykačů (na tom, u kterého dojde k otevření kontaktů dříve), což může způsobit, že se zhášení, respektive izolační médium u stykačů znehodnotí a nebude tak splňovat, například,

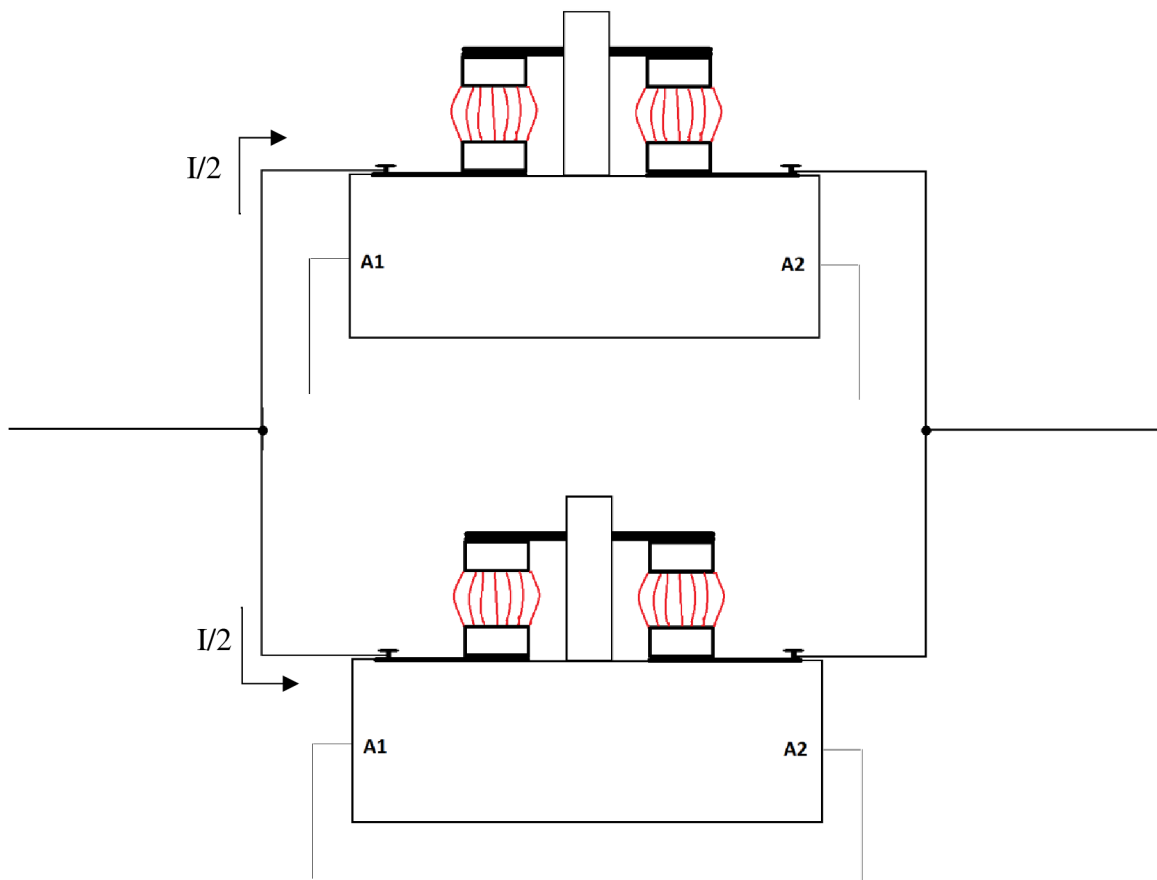


Obrázek 4.3: Sériové zapojení DC stykače

dielektrické vlastnosti. DC stykače jsou obvykle navrženy pro zhášení oblouku do několika milisekund až desítek milisekund.

### Paralelní zapojení

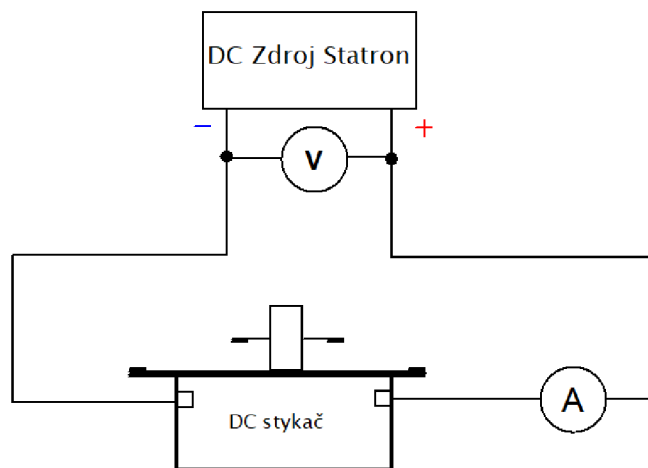
Paralelní zapojení se v praxi moc nevyužívá, dá se však využít na nízké napětí. Výhodou tohoto zapojení je, že v ideálním případě v sepnutém stavu se proudy rozdělí na polovinu. Problém nastává v tom, že stykače jsou tepelně dimenzovány na poloviční proud, z čehož sice vyplývá úspora proudovodné dráhy, avšak vypínací kapacita bude muset být nastavena na plný proud a napětí v obvodu, respektive plný výkon. Stejně jako u sériového zapojení může jeden ze stykačů díky nesoudobosti vypnout dříve, což u paralelního zapojení způsobí zatížení opožděného stykače plným napětím a proudem obvodu.



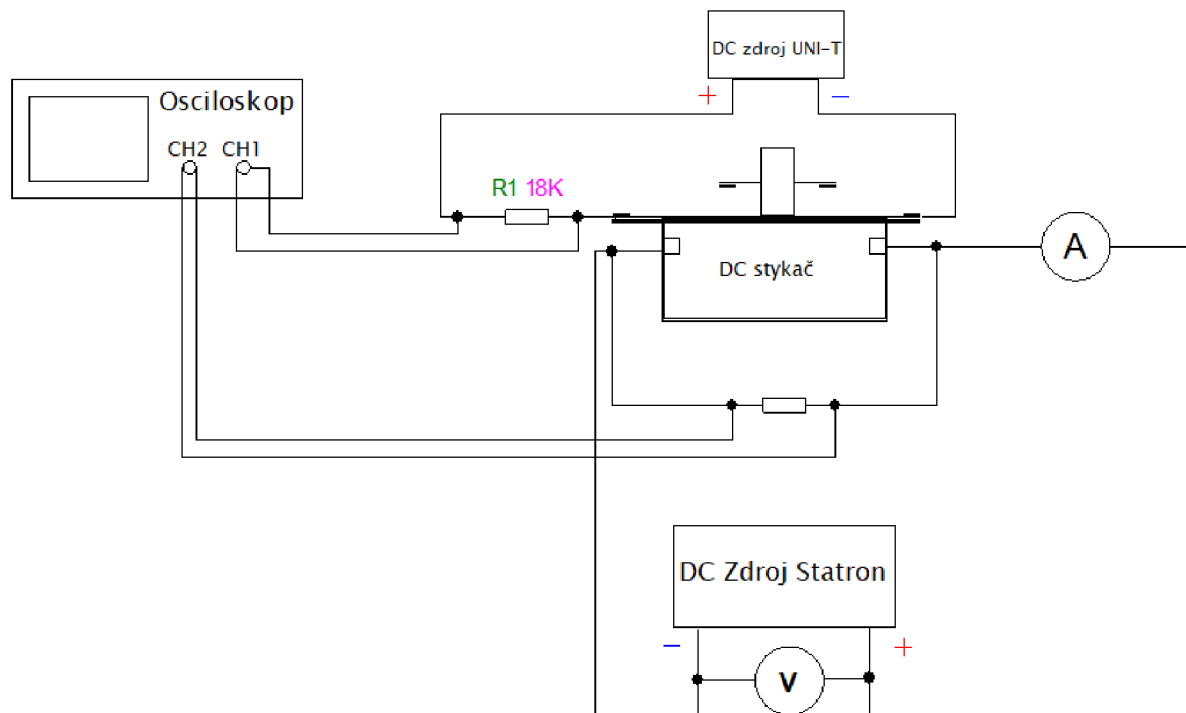
Obrázek 4.4: Paralelní zapojení DC stykače

## 5. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce se zabývá měřením přitahu kotvy a reakčních časů při vypínání na stejnosměrném stykači. Pro potřeby měření byly sestaveny obvody, jejichž schéma zapojení lze vidět na obrázcích níže (Obrázek 5.1 a Obrázek 5.2). První schéma (Obrázek 5.1) se sestává ze stejnosměrného zdroje a měřících prvků jako je voltmetr a ampérmetr. Do druhého schématu (Obrázek 5.2) bylo pro účely měření potřebné přidat stejnosměrný zdroj a osciloskop, za účelem sledování průběhů napětí na hlavních kontaktech a budící cívky stykače.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení pro měření přitahu kotvy



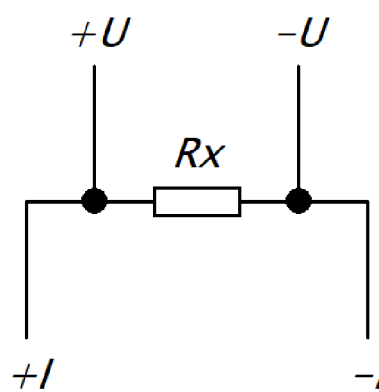
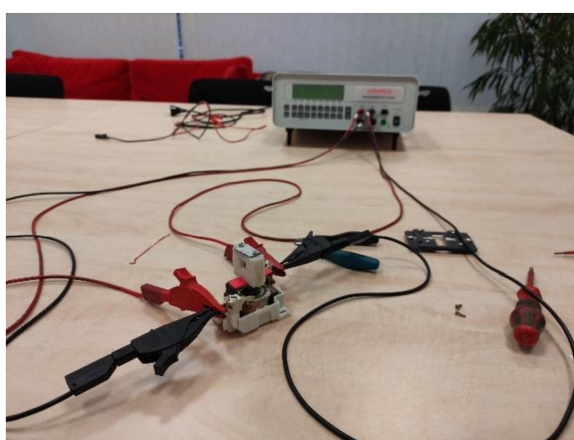
Obrázek 5.2: Schéma zapojení pro měření reakčních časů

## 5.1 Měření odporů cívky stejnosměrného stykače

Pro měření byly použity stejnosměrné stykače, které budou zobrazeny dále. Pracoviště pro měření odporu cívky DC stykače se sestává ze čtyř pomocných vodičů. Nejprve se zapojí proudovodná dráha a až poté mohou být připojeny vodiče pro napětí.

Pro stanovení hodnoty odporu cívky byl využit měřicí přístroj mikroohmmetr. Podrobné zapojení lze vidět níže (Obrázek 5.3).

Měření na DC stykači-vzorek 1 probíhalo dvakrát a výsledná hodnota byla získána zprůměrováním obou hodnot. Vzhledem k tomu, že výsledky odporů se lišily pouze v tisícinách, jak lze vidět v Tabulka 4, bylo usouzeno, že odpor na DC stykači-vzorek 1 a 2 bude měřen pouze jednou (viz. Tabulka 5 a Tabulka 6).



Obrázek 5.3: Měření odporu cívky

Tabulka 4: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 1

Počet měření	$R$ [ $\Omega$ ]	$\bar{R}$ [ $\Omega$ ]
1.	24,264	24,262
2.	24,260	

Tabulka 5: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 2

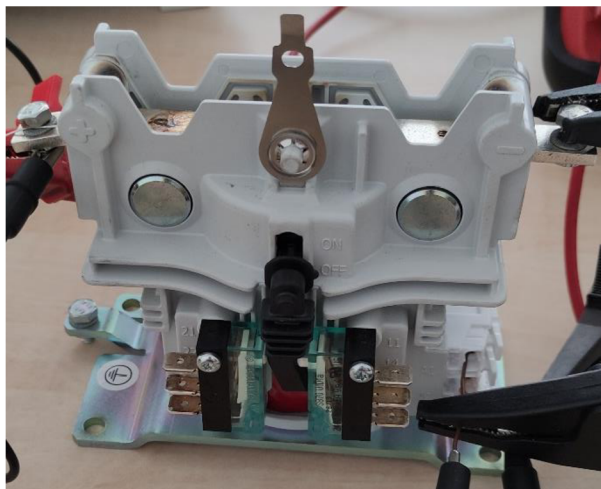
Počet měření	$R$ [ $\Omega$ ]
1.	1,85

Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu cívky pro stykač-vzorek 3

Počet měření	$R$ [ $\Omega$ ]
1.	69,8

## 5.2 Měření DC stykačů

### 5.2.1 Měřený DC stykač trakční – vzorek 1



Obrázek 5.4: DC stykač-vzorek 1

#### Měření přídržného napětí

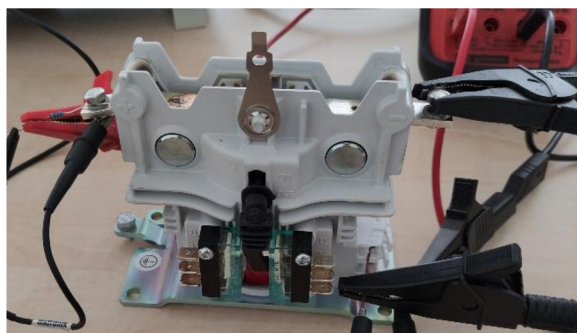
Měření probíhalo ve dvou polohách stykače, a to ve vertikální (Obrázek 5.5 a)) a v horizontální (Obrázek 5.5 b)). Pro měření bylo použito zapojení ze schématu uvedeného výše (Obrázek 5.1).

#### **Měření v poloze horizontální:**

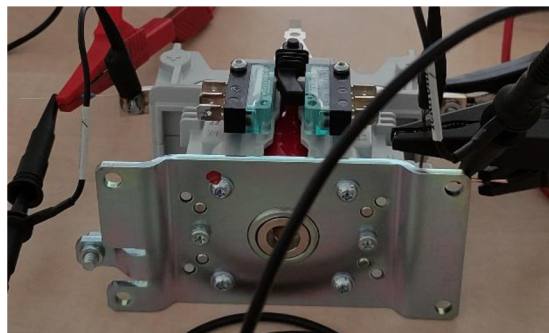
V tomto měření bylo nejprve experimentálně zjišťováno minimální přídržné napětí, při kterém stykač nerozepne. Na stejnosměrném zdroji byla nastavena taková hodnota napětí, při které stykač spolehlivě sepne. Postupně se snižovalo napětí na zdroji až na hodnotu, při které zůstal stykač sepnut. V tomto případě je hodnota minimálního přídržného napětí **6,1 V**.

#### **Měření v poloze vertikální:**

Zde, v poloze vertikální, probíhalo měření naprosto shodně jako v případě horizontální polohy. Hodnota minimálního přídržného napětí měla velikost **6 V**.



a)



b)

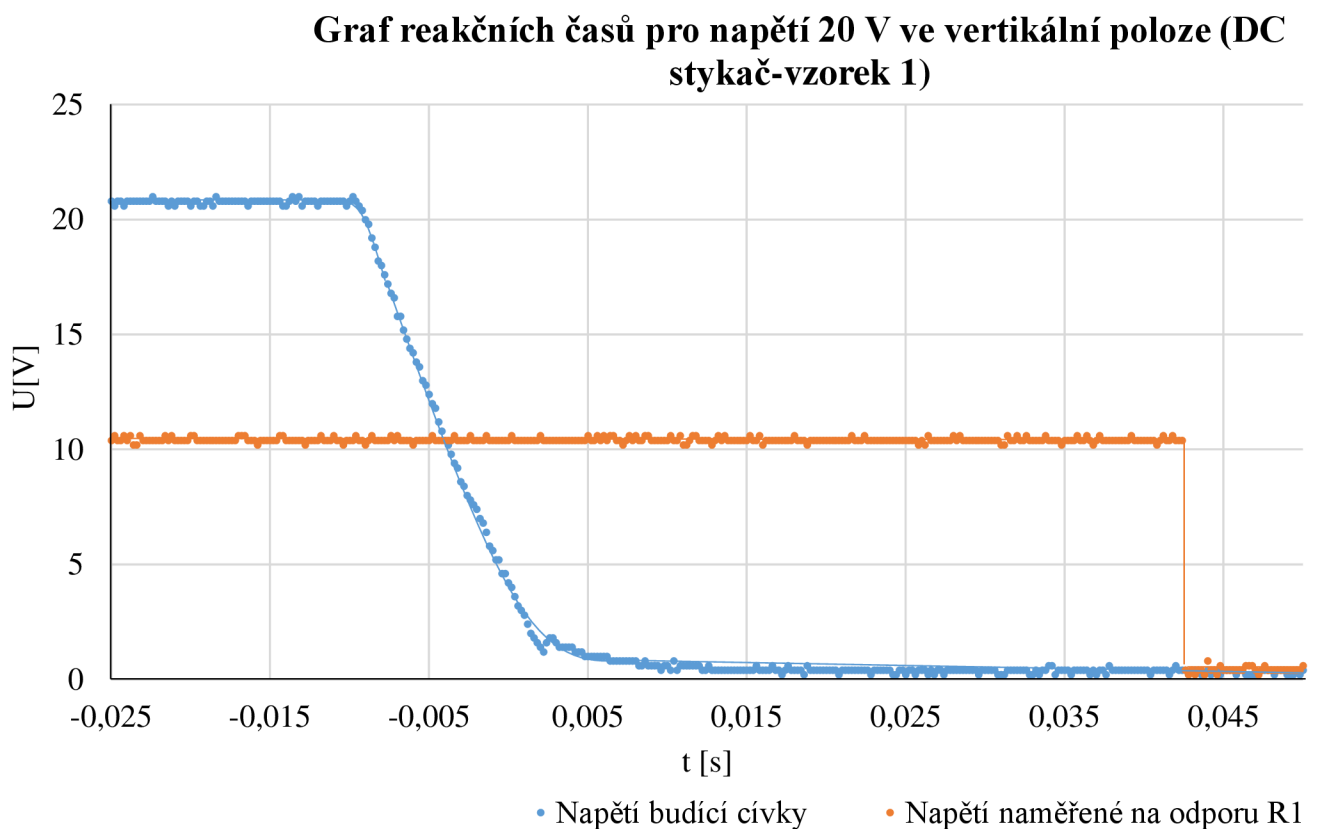
Obrázek 5.5: a) vertikální poloha b) horizontální poloha

Jedno z možných vysvětlení, proč je hodnota přídržného napětí ve vertikální poloze menší, je že na magnetický obvod působí gravitační síla.

### Měření reakčních časů

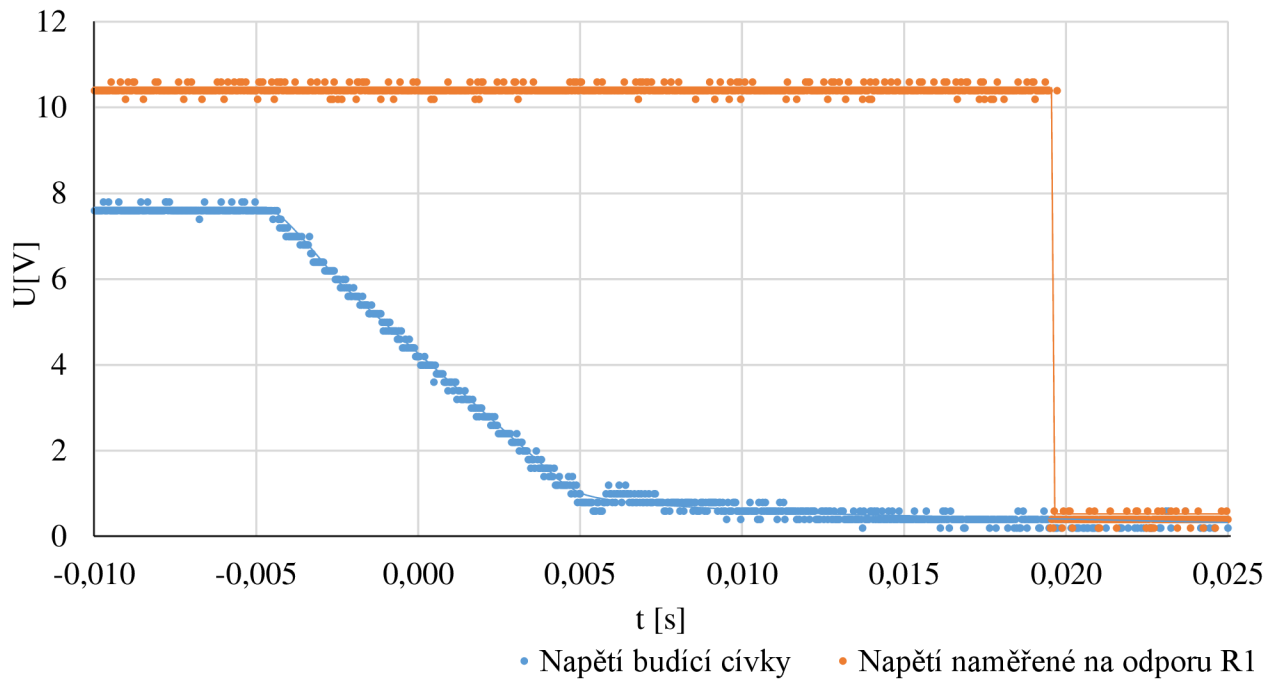
Tímto měřením byla zkoumána reakce, za jak dlouho se odpojí hlavní kontakty stykače od doby, co bylo přerušeno napájení cívky stykače. Pro měření byl využit obvod ze schématu uvedeného výše (Obrázek 5.2). Po zapojení bylo na stejnosměrném zdroji, který byl připojen na hlavní kontakty stykače, nastavena hodnota napětí 10 V. Poté, na stejnosměrném zdroji, kterým byla napájena cívka stykače, byla nastavena hodnota napětí (např. 20 V), která se zapsala do tabulky a spustil se zdroj. Z multimetru byla odečtena hodnota proudu (0,8 A), která byla zapsána do tabulky pro DC stykač-vzorek 1 (viz. příloha A.1). Až po těchto krocích byl zdroj napájení cívek vypnut. Sestupné hrany rozpojování kontaktů byly sledovány na osciloskopu. Hodnoty reakčních časů byly nejprve hrubě odhadnuty pomocí funkce kurzorů na osciloskopu. Poté, při vykreslení průběhů reakčních časů do grafu, byly tyto hodnoty odečteny přesněji z naměřených dat. Takto měření probíhalo jak pro vertikální polohu, tak pro polohu horizontální.

Reakční časy pro vyšší hodnoty napětí (např. 20 V a vyšší) byly mnohem větší než při změřeném minimálním přídržném napětí. O čemž také vypovídá Graf 5.1 a Graf 5.2.



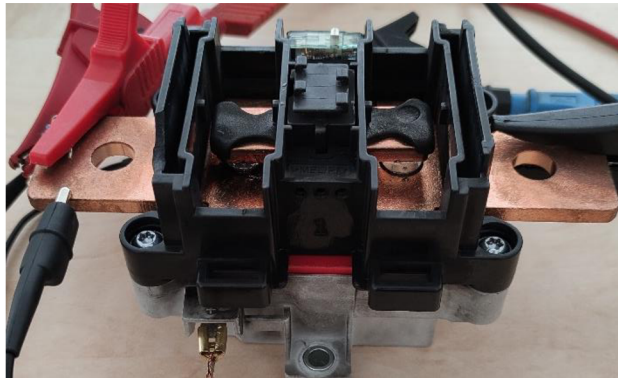
Graf 5.1: Reakční časy DC stykače-vzorek 1 pro 20 V

### Graf reakčních časů pro napětí 7 V ve vertikální poloze (DC stykač-vzorek 1)



Graf 5.2: Reakční časy DC stykače-vzorek 1 pro 7 V

#### 5.2.2 Měření DC stykač trakční – vzorek 2



Obrázek 5.6: DC stykač-vzorek 2

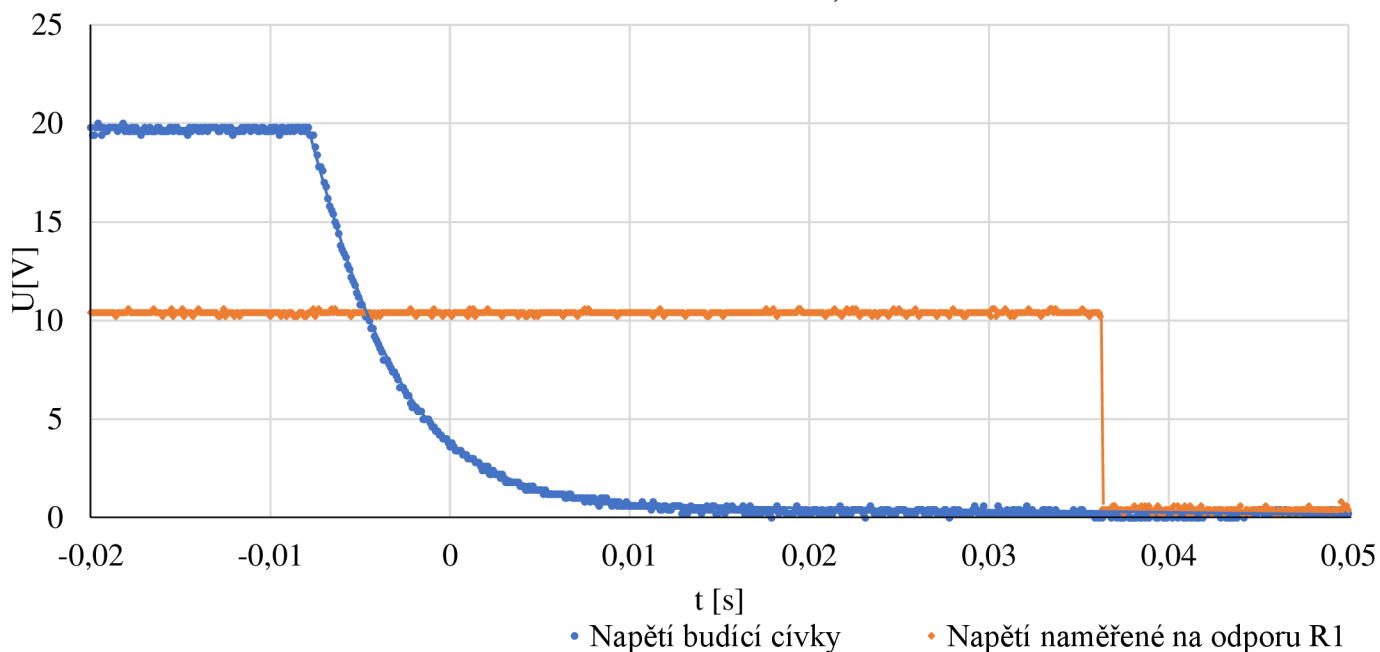
#### Měření přídržného napětí

V tomto případě probíhalo měření naprosto shodně jako u předešlého DC stykače vzorku 1. Jediný rozdíl mezi stykači vzorkem 1 a 2 je v hodnotě přídržného napětí. Minimální přídržné napětí u DC stykače-vzorku 2 ve vertikální poloze byl 1 V. Co se týkalo hodnoty pro horizontální polohu, ta vyšla stejně jako u vertikální 1 V.

### Měření reakčních časů

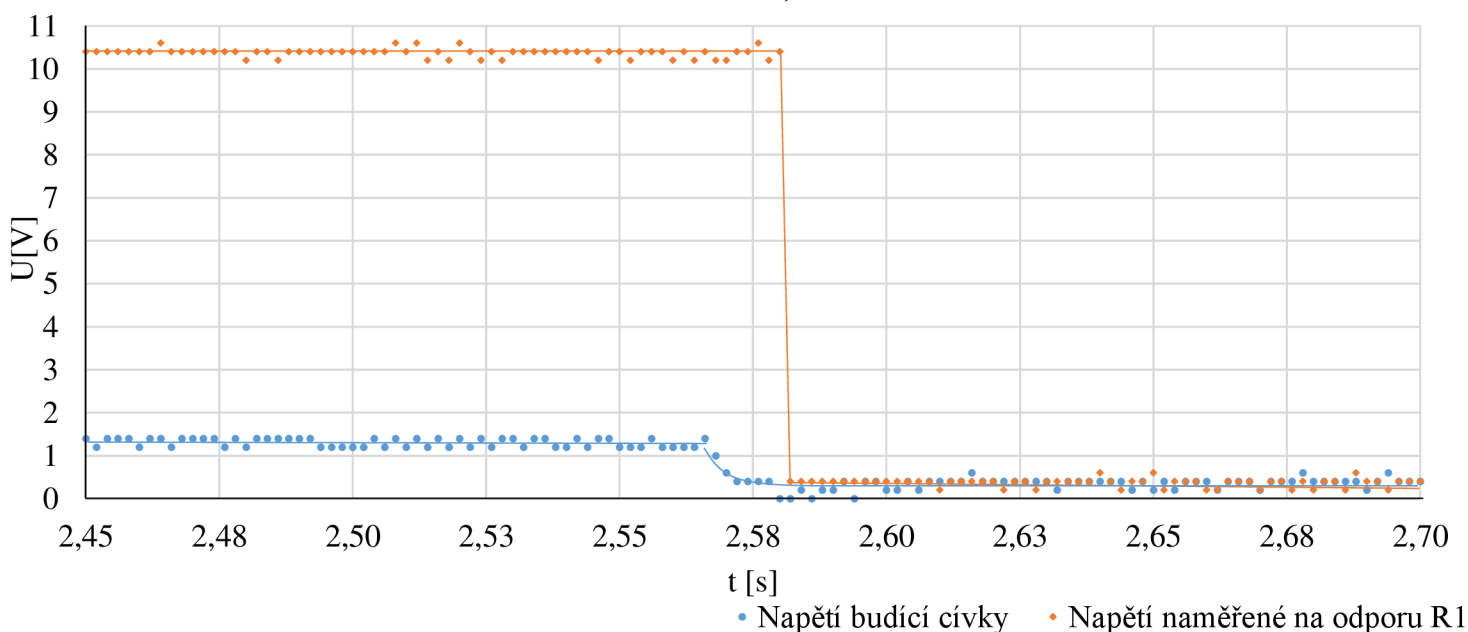
Měření probíhalo totožně jako u DC stykače-vzorku 1, výrazným rozdílem jsou hodnoty reakčních časů. Všechny hodnoty reakčních časů společně s proudy byly sepsány do tabulky (viz. příloha A.2). Reakční časy byly opět rozdílné, pokud bylo na zdroji nastaveno napětí velké a menší, o čemž také vypovídá Graf 5.4 a Graf 5.3.

**Graf reakčních časů pro napětí 20 V ve vertikální poloze (DC stykač-vzorek 2)**



Graf 5.4: Reakční časy DC stykače-vzorek 2 pro 20 V

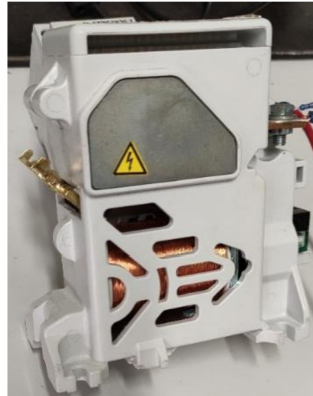
**Graf reakčních časů pro napětí 1 V ve vertikální poloze (DC stykač-vzorek 2)**



Graf 5.3: Reakční časy DC stykače-vzorek 2 pro 1 V



### 5.2.3 Měření DC stykač trakční – vzorek 3



Obrázek 5.7: DC stykač-vzorek 3

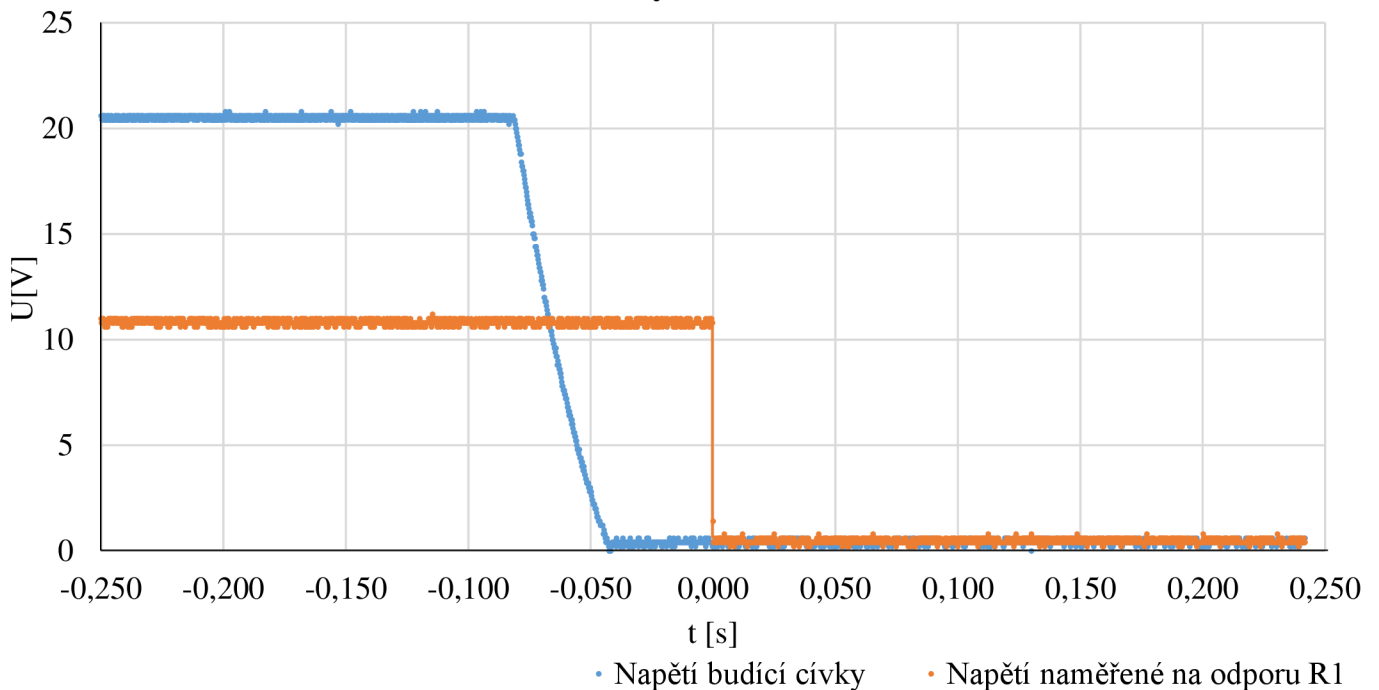
#### Měření přídržného napětí

Měření opět bylo totožné jako u předchozích dvou. Zde hodnota napětí ve vertikální poloze měla velikost **4,3 V** a v horizontální poloze velikost **4 V**.

#### Měření reakčních časů

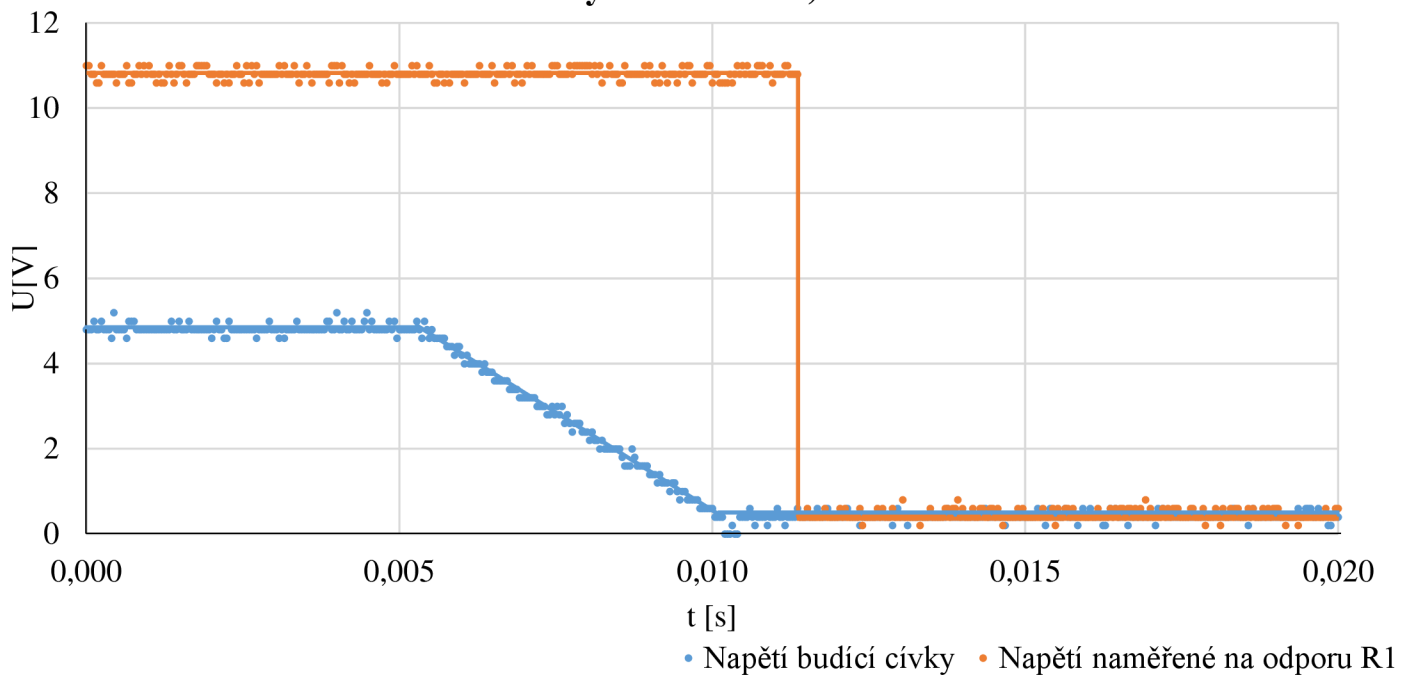
U tohoto stykače byly časy měřeny pouze pro polohu vertikální a všechna data byla zapsána do tabulky (viz. příloha A.3). Reakční časy se opět lišily od předešlých dvou stykačů. Výsledky měření lze pozorovat níže na grafech (Graf 5.5 a Graf 5.6).

**Graf reakčních časů pro napětí 20 V ve vertikální poloze (DC stykač-vzorek 3)**



Graf 5.5: Reakční časy DC stykače-vzorek 3 pro 20 V

### Graf reakčních časů pro napětí 4,3 V ve vertikální poloze (DC stykač-vzorek 3)



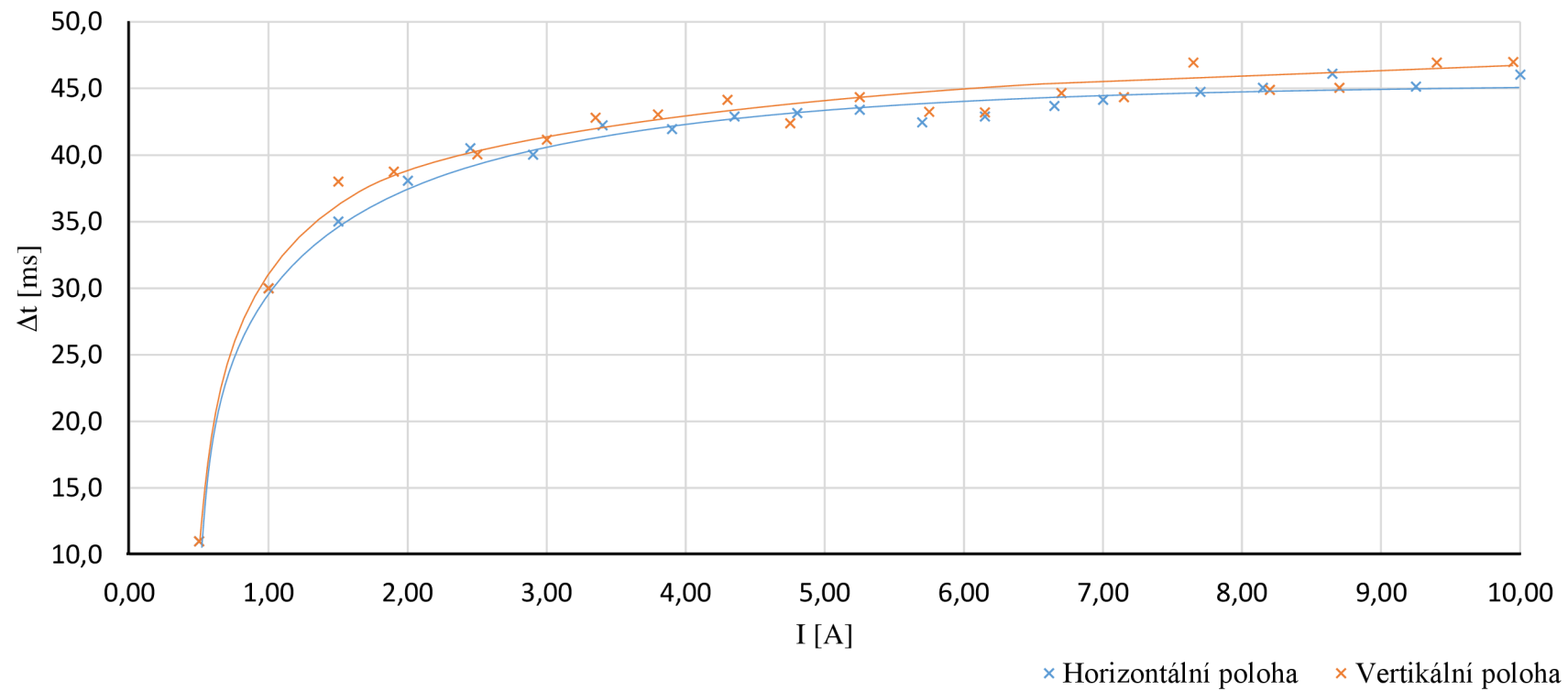
Graf 5.6: Reakční časy DC stykače-vzorek 3 pro 4,3 V

### 5.3 Reakční časy v závislosti na proudu

Porovnáme-li Graf 5.7, Graf 5.8 a Graf 5.9 zjistíme, že reakční časy značně závisí na právě odebíraném proudu. Pokud je odbíraný proud velký (záleží na počtu závitů cívky, průměru drátu cívky, odporu cívky...), výsledkem bude velký reakční čas mezi hlavními kontakty a cívkou stykače. Naopak, je-li proud malý, výsledné reakční časy jsou také menší. Tento fakt lze pozorovat i na zmíněných grafech.

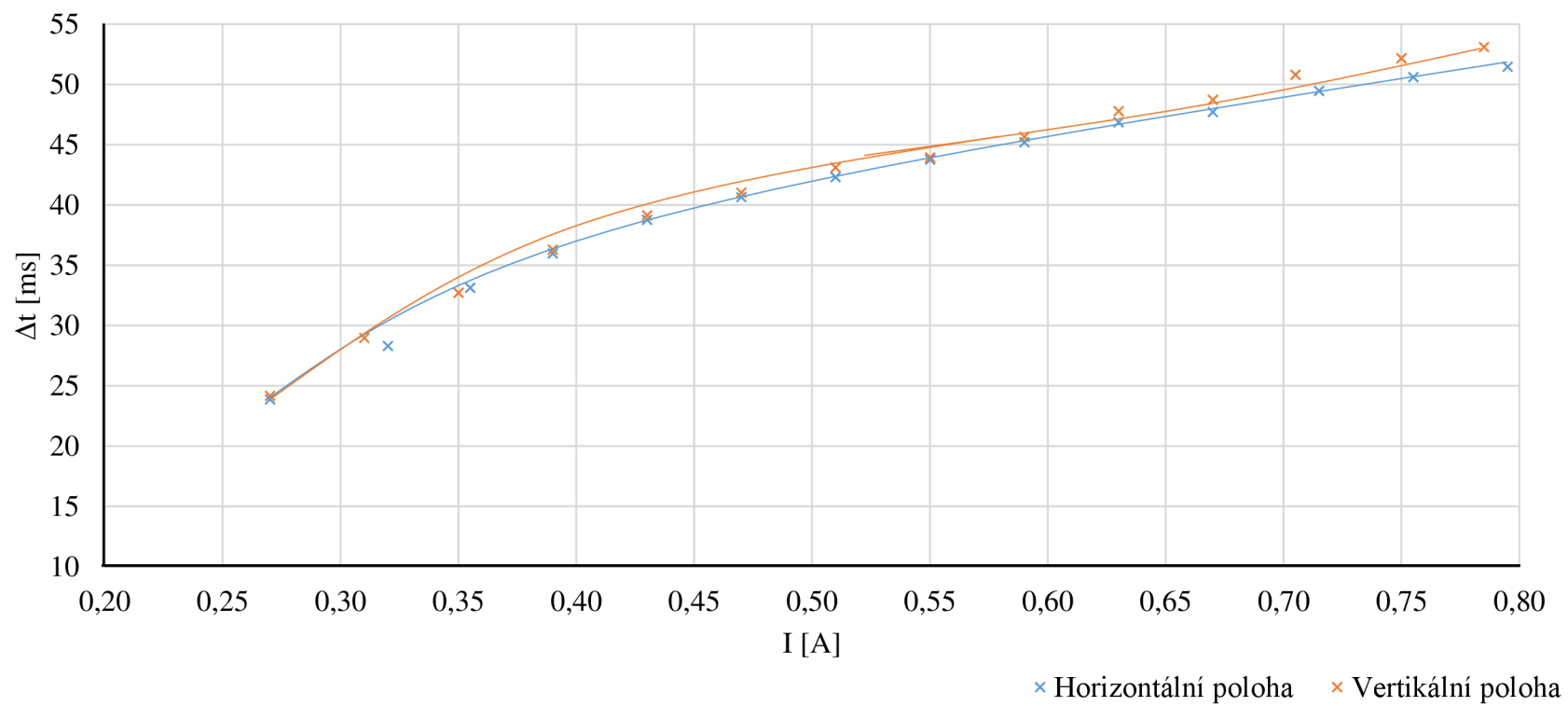
Navrhne-li se obvod pro držení kontaktů stykače na minimální napětí, bude také odebíraný proud menší. Z tohoto důvodu vznikne ekonomičtější varianta, oproti variantě, kdy jsou stykače zapojeny na plné napětí, které vede k velkým časům a velkému odběru proudu.

### Průměrné reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu (DC stykač-vzorek 2)



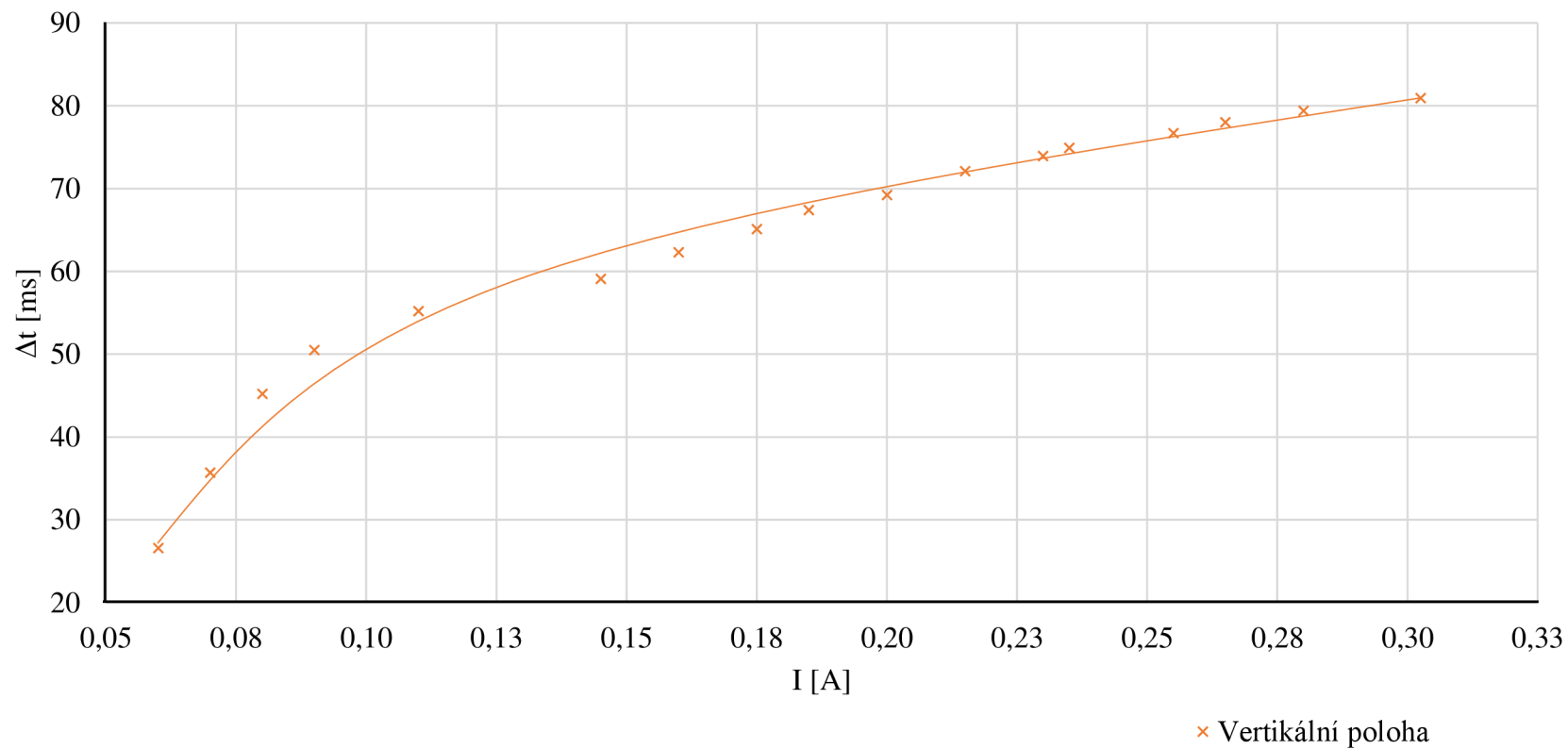
Graf 5.7: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro dvě polohy DC stykače-vzorek 2

### Průměrné reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu (DC stykač-vzorek 1)



Graf 5.8: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro dvě polohy DC stykače-vzorek 1

### Průměrné reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu (DC stykač-vzorek 3)



Graf 5.9: Reakční časy v závislosti na aplikovaném proudu pro DC stykače-vzorek 3

## 5.4 Návrh obvodu pro minimalizaci rozdílu spínacích časů

Aby stykače mohly vypínat v co nejrychlejší čas, bylo zapotřebí sestavit přípravek (obvod), kterým by bylo možné sepnout stykače, nastavit jejich minimální přídržné napětí, dále zmenšit vstupní napětí na minimální přídržné napětí stykačů a zaručit jejich synchronní vypnutí.

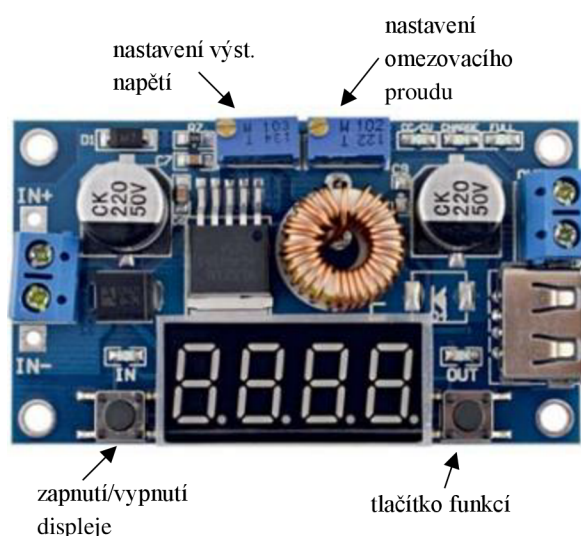
Počáteční návrh obvodu byl oproti koncovému značně odlišný. K potlačení remanence byl nejprve uvažován omezovač napětí sestávající se ze stabilizátorů, zenerových diod a tranzistorů. Zapojení bylo sice účinné, ale výstupní napětí se muselo nastavovat na potenciometru. Navíc bylo výstupní napětí regulovatelné pouze od 0 V až 16 V. Z výše uvedených důvodů bylo přistoupeno k hledání jiné varianty měniče. Jednou z možných variant byl PWM regulátor napětí ARN4224. Nevýhodou regulátoru bylo výstupní napětí nastavitelné pouze od 8 V do 42 V, přičemž přídržné napětí stykačů se pohybovalo pod hodnotou 8 V. Další nevýhodou byla cena – regulátor napětí byl příliš drahý a do obvodu byly zapotřebí dva. Z důvodu těchto nedostatků byl pro potlačení remanence nakonec vybrán Modul DC/DC step down, pro jeho jednoduchost (zhotovená stavebnice), výrazně nižší cenu, větší regulovatelnosti výstupního napětí (od 1,25 V do 32 V) a z důvodu možnosti nastavení omezovacího proudu.

Do obvodu bylo také zapotřebí zakomponovat zpoždění k synchronizaci stykačů. Původní návrh zvažoval přepínatelný časovač s monostabilním obvodem 555. V tomto obvodu bylo zpoždění nastavováno kondenzátorem, potenciometrem a řadou rezistorů přes časovou konstantu. Toto uvažované zapojení pro zpoždění bylo však zbytečně složité, avšak inspirativní pro další postup. V konečném návrhu obvodu je časová konstanta regulovatelná pouze pomocí potenciometru, rezistoru a kondenzátoru bez obvodu s 555. Tento návrh je mnohem jednodušší než původní myšlenka. Navíc se díky této jednoduchosti dalo myslet i trochu ekonomičtěji.

### 5.4.1 Části navrhovaného obvodu

Tabulka 7: Seznam součástek

Značka	Název součástky
Přep. 1,2,3	Přepínač
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>	Spínače
DC/DC step down	Snižující měnič napětí
D <sub>1</sub> , ..., D <sub>8</sub>	Diody 1N4007
ZD <sub>1</sub> , ZD <sub>2</sub> , ZD <sub>3</sub>	Zenerovy diody
C <sub>1</sub> , ..., C <sub>4</sub>	Kondenzátory
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	Rezistory
P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub>	Potenciometry
T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub>	Tranzistory MOS-FET
V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub>	Voltmetry



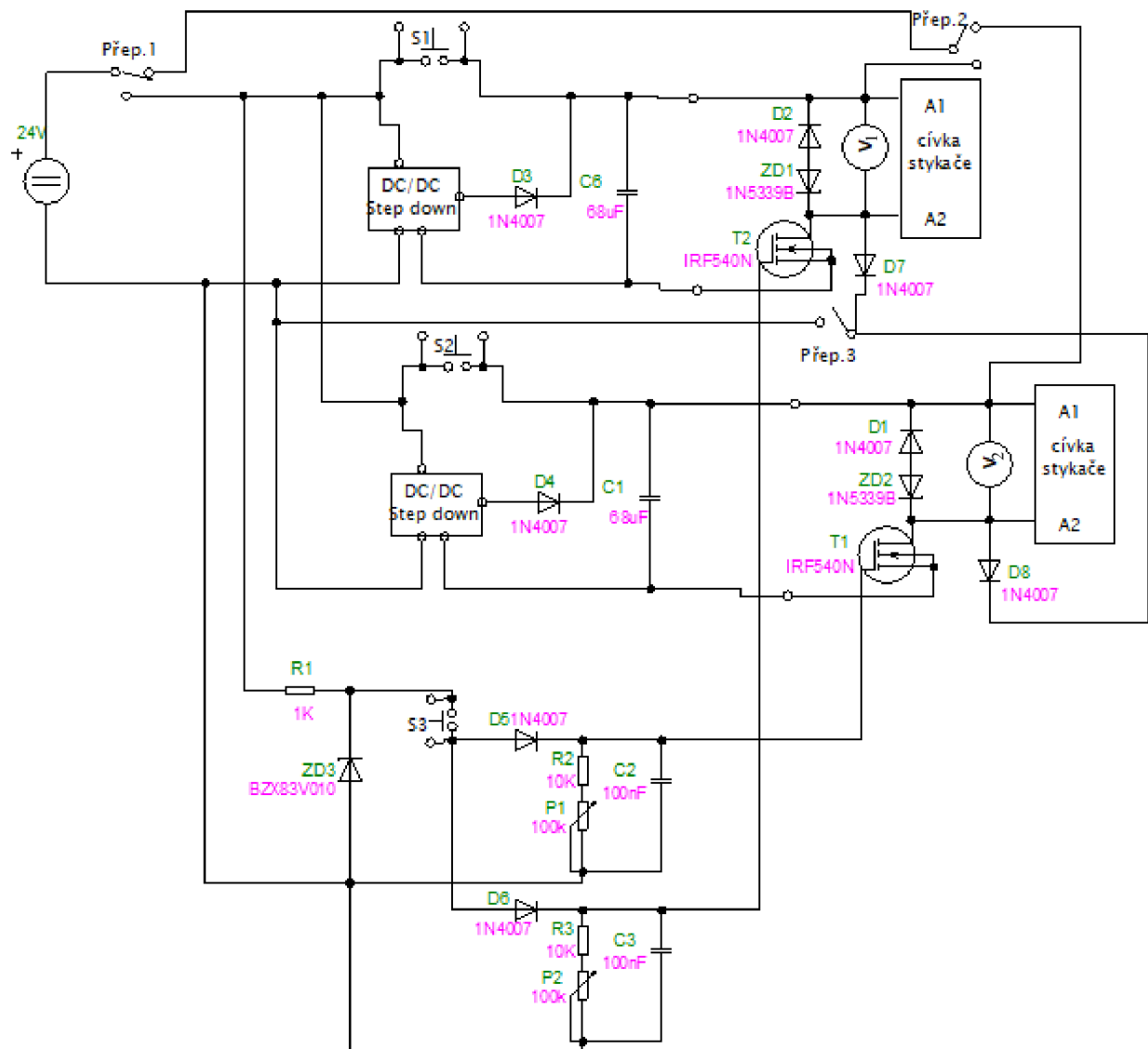
Obrázek 5.8: Modul DC/DC step down [32]

## DC/DC step down:

Displej zapneme tlačítkem zapnutí/vypnutí. Pomocí tlačítka funkcí se při prvním stlačení nastaví výstupní napětí (rozsvítí se LED OUT), druhým stlačení výstupní proud, třetím stlačení vstupní napětí (rozsvítí se LED IN), další stlačení nastaví nabíjecí napětí, které ukazuje o kolik je větší výstupní napětí oproti připojeném zdroji (v desetínách – 1,50P je tedy 150mV) a posledním stlačení se cyklicky přepíná mezi všemi parametry.

Pro kalibraci zobrazeného vstupního a výstupního napětí nebo proudu, se podrží na 2 s tlačítko funkcí. Zobrazená hodnota se rozblíká. Pravým nebo levým tlačítkem se nastaví požadovaná hodnota. Potvrzení hodnoty se provede opět 2 s stisknutím tlačítka funkcí [32].

Díky vypsáním součástkám v tabulce (Tabulka 7) a modulu DC/DC měniče mohl být sestaven obvod, který lze vidět na obrázku níže (Obrázek 5.9).



Obrázek 5.9: Návrh obvodu pro minimalizaci rozdílu spínacích časů

## 5.4.2 Popis funkce obvodu

Obvod se skládá ze dvou částí. První část slouží k zjištění minimálního přídržného napětí na stykači a druhá část pro měření minimalizace rozdílu reakčních časů.

Jestliže měříme minimální přídržné napětí, musí být přepínač 3 v poloze zapnuto. Přepínač 1 se nastaví do polohy pro měření U. Po těchto krocích se přepínač 2 nastaví na jednu polohu a zdroj stejnosměrného napětí se může pustit. Na voltmetru 1 se ukáže napětí na stykači a díky regulovatelnému stejnosměrnému zdroji postupně snižujeme napětí až do doby, kdy stykač rozepne. Tato hodnota napětí se zapíše nebo zapamatuje. Dále se vypne zdroj, aby se mohlo nastavit měření pro druhý stykač. Tedy přepínač 2 se přepne do druhé polohy a zapne se zdroj. Opět se na zdroji snižuje napětí až do doby, kdy stykač rozepne a minimální přídržné napětí se zapíše nebo zapamatuje. Vypne se napájení ze zdroje a rozepne se přepínač 3.

Pro druhé měření, eliminaci rozdílu časů, se přepne přepínač 1 na opačnou polohu, zapne se zdroj napětí a spínač  $S_3$  se sepne. Pomocí vhodné pomůcky (např. šroubovák) se nastaví hodnota výstupního napětí z DC/DC měniče (na přípravku: volba výst. napětí), tedy napětí změřené z prvního měření. Je třeba sledovat napětí na voltmetrech, protože display na DC/DC měniči je pouze orientační. Pokud je nastaveno minimální přídržné napětí pro oba stykače, sepne se postupně spínač  $S_1$  a následně  $S_2$ . Tyto spínače přivedou plné napětí zdroje na stykače, protože minimální přídržné napětí nedokáže přitáhnout kotvu stykače. Pro vypnutí stykačů se rozepne spínač  $S_3$  a přeruší se napájení pro cívky stykačů. Výsledné průběhy se sledují na osciloskopu a orientačně se zjistí rozdíl vypínacích časů obou stykačů. Pokud bude potřeba eliminovat více rozdílné časy, slouží k tomu potenciometry  $P_1$  a  $P_2$ . Díky nastavení těchto potenciometrů se ještě více eliminují rozdílné časy vypínání stykačů.

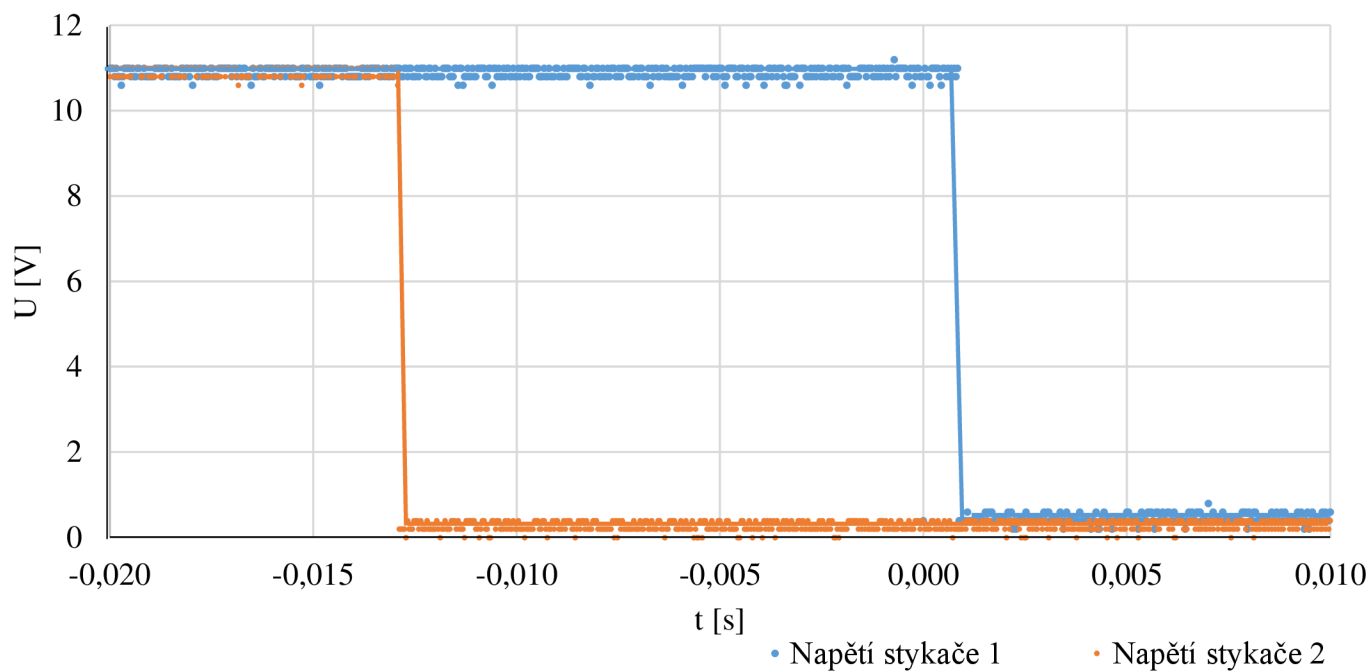
## 5.4.3 Minimalizace rozdílných časů

Zapojí-li se pracoviště, dle schématu pro měření těchto časů (Obrázek 5.11), nejdříve bez přípravku (Obrázek 5.12 a)), je výsledek zpoždění vypínacích reakčních časů pro měřené stykače **14 ms**. Popsanou situaci znázorňuje průběh grafu (Graf 5.10).

Jestliže pozměníme schéma vložením zhotoveného přípravku (Obrázek 5.12 b)), dosáhne se mnohem kratších časů než v předešlém případě. Z měření vyplynulo, že zpoždění reakčních časů vypínacích stykačů dosahovalo **166  $\mu$ s**, viz. Graf 5.11.

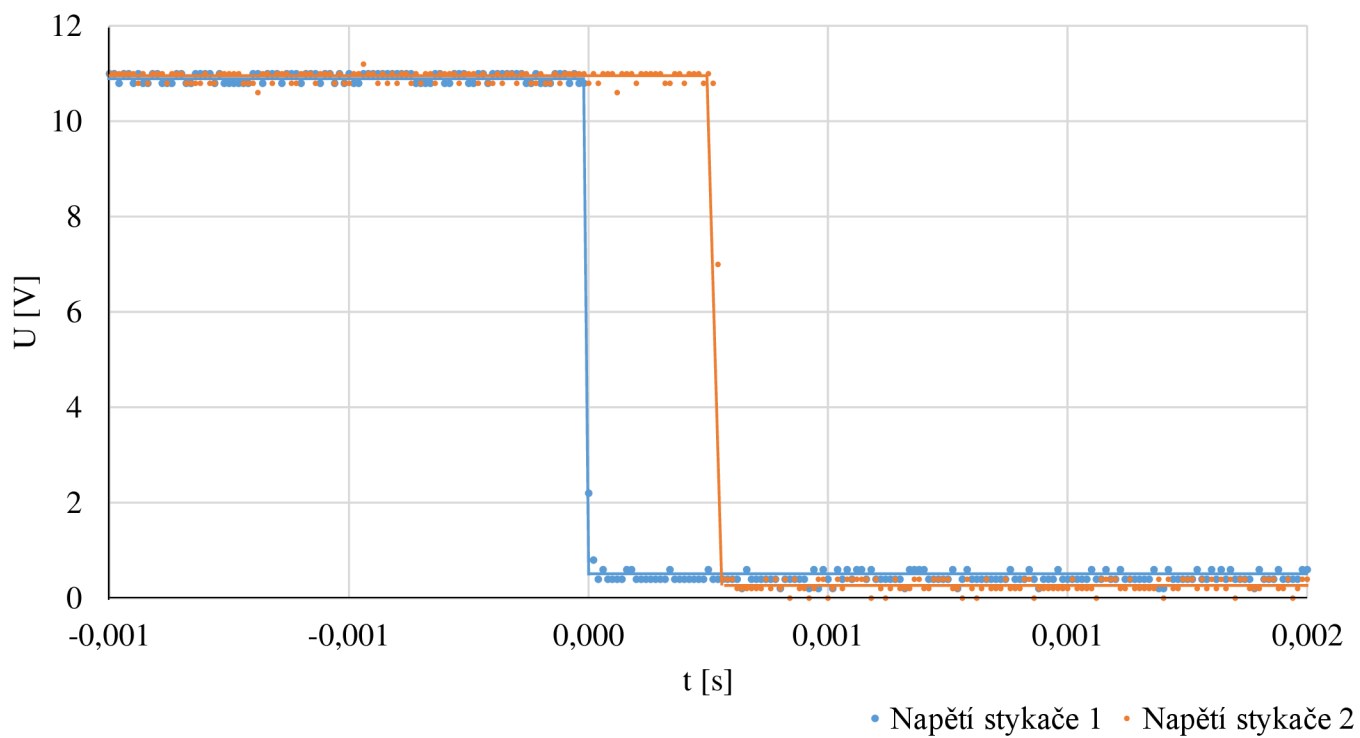


### Minimalizace rozdílných časů bez přípravku



Graf 5.10: Minimalizace rozdílných časů bez přípravku

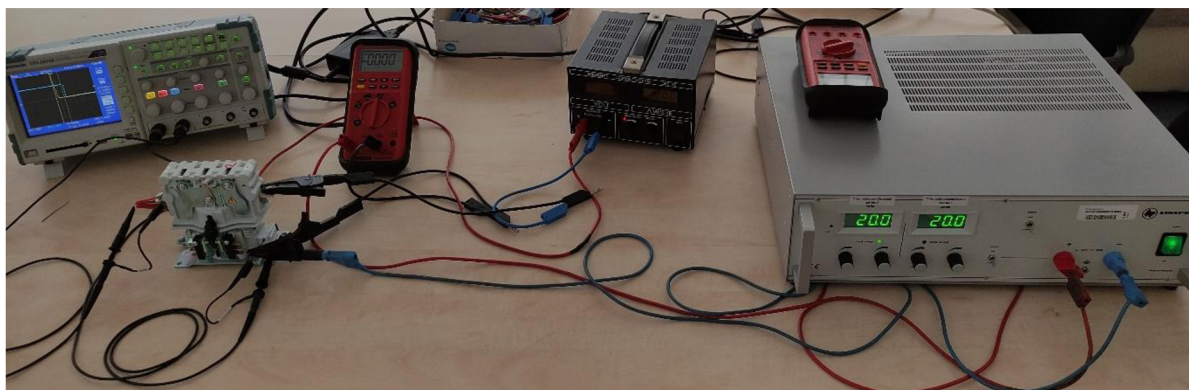
### Minimalizace rozdílných časů s přípravkem



Graf 5.11: Minimalizace rozdílných časů s přípravkem

## 5.5 Vizuální materiály

Na obrázku (Obrázek 5.10) lze vidět skutečné zapojení pracoviště pro měření reakčních časů ve vertikální a horizontální poloze. Pro účely měření byl použit zdroj stejnosměrného napětí, multimetr pro měření proudu do cívek stykače, stejnosměrný zdroj připojený na hlavní kontakty stykače, samotné zkoušené stykače a osciloskop, na kterém se zobrazovaly průběhy napětí a jejich zpoždění.



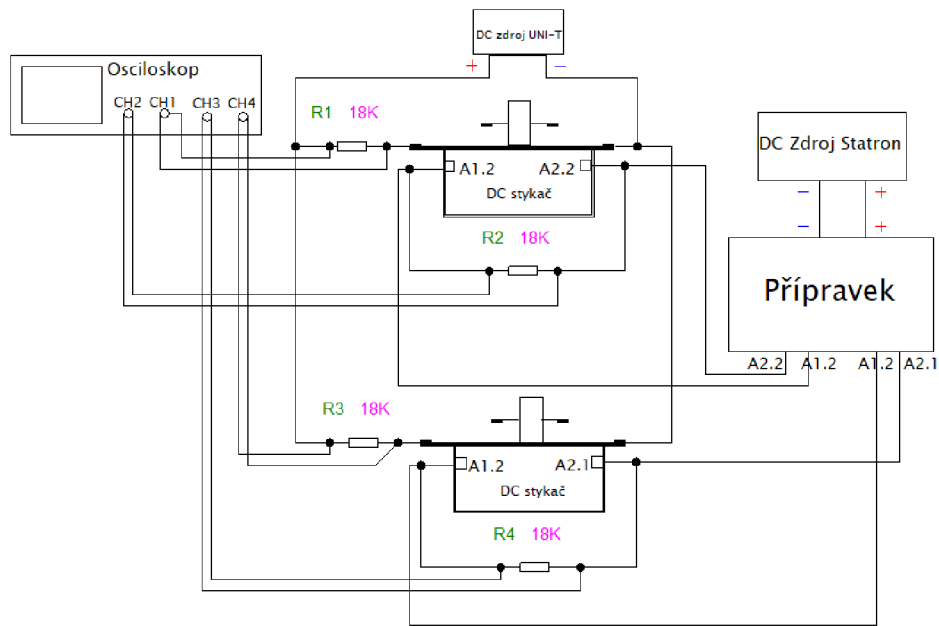
a)



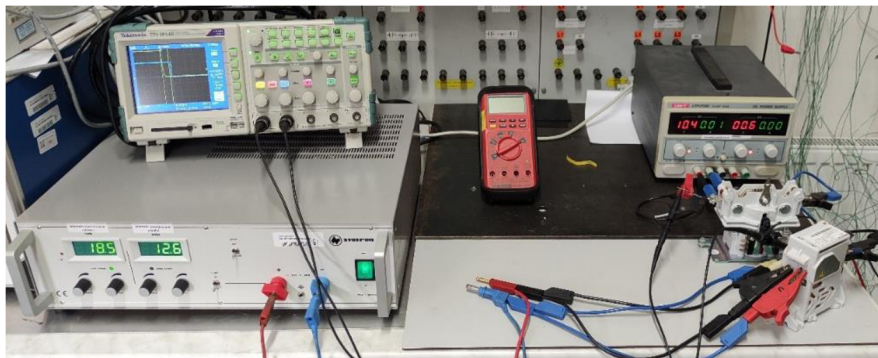
b)

Obrázek 5.10: Pracoviště na měření reakčních časů a) ve vertikální a b) v horizontální poloze

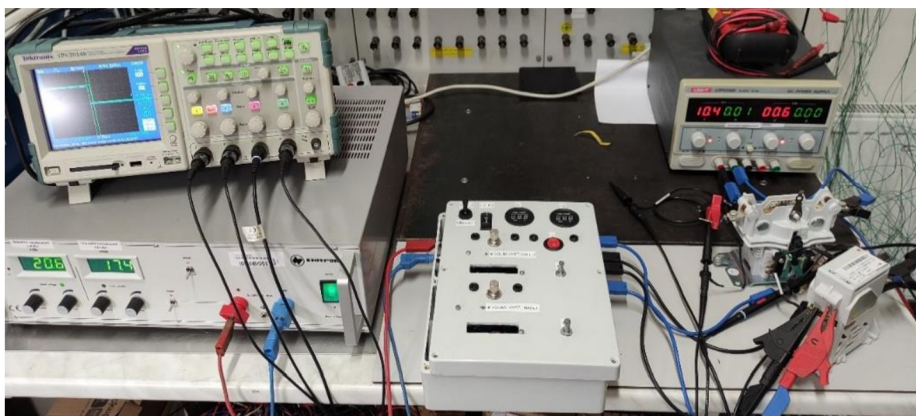
Na obrázku (Obrázek 5.11) lze vidět zapojení pracoviště pro eliminaci remanentní magnetizace a minimalizaci rozdílů vypínacích časů. Byly použity stejné přístroje, jako pro měření reakčních časů. Rozdíl je pouze v tom, že místo dvou napěťových sond pro osciloskop bylo potřeba sond čtyř, a to z důvodu měření hlavních kontaktů a cívek u obou stykačů. Na toto schéma navazuje Obrázek 5.12, který ukazuje skutečné zapojení – nejdříve bez zhotoveného přípravku a níže se zhotoveným přípravkem.



Obrázek 5.11: Schéma zapojení pracoviště pro minimalizaci časů



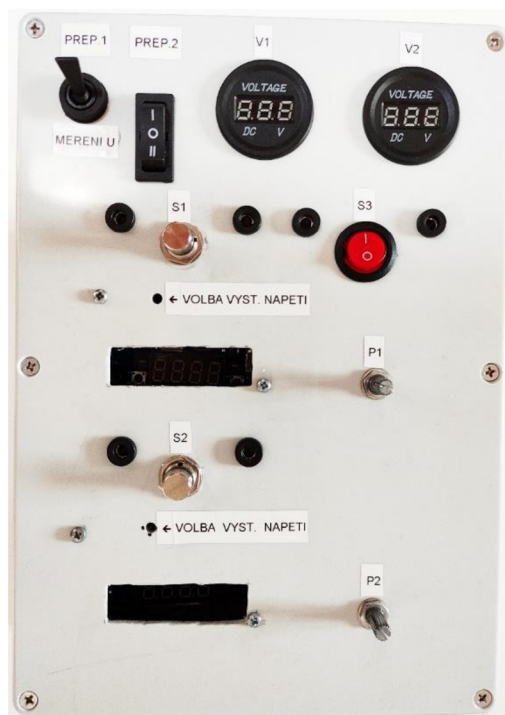
a)



b)

Obrázek 5.12: Pracoviště pro měření minimalizace časů a) bez přípravku, b) s přípravkem

Obrázek 5.13 a Obrázek 5.14 znázorňují zhotovený přípravek pro minimalizaci rozdílných časů vypínaných napětí. Na přední straně přípravku lze vidět přepínače (přep.1, přep.2), spínače ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) a jejich možné externí přemostění, potenciometry pro nastavení zpoždění a displeje obou DC/DC step down měničů. Na jedné z bočních stran jsou přívodní svorky pro napojení stejnosměrného zdroje. Na druhé straně se nacházejí svorky pro napojení cívek stykačů společně se spínačem 3, který spíná/rozepíná přímé zapojení cívek A2.1 a A2.2 společně se zápornou svorkou stejnosměrného zdroje.



Obrázek 5.13: Čelní strana zhotoveného přípravku



Obrázek 5.14: Boční strany zhotoveného přípravku

V tabulce (Tabulka 8) byly sepsány všechny použité měřicí přístroje, které byly použity ve všech zmíněných obvodech. Tabulka 9 společně s Tabulka 10 obsahuje možné podmínky okolního prostředí.

Tabulka 8: Seznam použitých přístrojů

Název	Typ	Výrobní číslo	Poznámka
Osciloskop	Tektronix TPS 2014B	C010968	čtyř kanálový
Multimetr digitální	Hexagon	SAP:001000216826-0000	
DC zdroj UNIT-T	UTP3705S	SAP:001000252182-0000	32 V, 5 A
DC zdroj Voltgraft	DIGI35	433020/2962	
Ohm-metr CROPICO	Microhmmeter DO5001	24E-0405	

Tabulka 9: Podmínky okolního prostředí pro měření DC stykačů-vzorek 1 a 2

<b>Teplota</b>	25,2 °C
<b>Tlak</b>	991,7 hPa
<b>Relativní vlhkost</b>	22,8 %

Tabulka 10: Podmínky okolního prostředí pro měření DC stykače-vzorek 3 a rozdílných časů

<b>Teplota</b>	23 °C
<b>Tlak</b>	979 hPa
<b>Relativní vlhkost</b>	35,4 %
<b>Rosný bod</b>	7,3

## 6. ZÁVĚR

Diplomová práce nabízí čtenáři stručný vhled do problematiky stejnosměrných stykačů, které hrají nezastupitelnou roli ku příkladu v nabíjecích stanicích, systémech vyrábějící fotovoltaickou energii a automobilovém průmyslu. V úvodní části práce byly popsány základní informace, které čtenáři pomohou k pochopení tématu. Z tohoto důvodu byly vypsány magnetické vlastnosti látek, typy stykačů, konstrukční části stykačů atd.

Cílem této diplomové práce bylo vyřešit problém nesynchronizace vypínání dvou stejnosměrných stykačů. První polovina praktické části se zabývá měřením reakčních časů v závislosti na aplikovaném proudu budící cívkou. Z naměřených hodnot a jejich vyhodnocení byla ověřena hypotéza, že máme-li jakýkoliv stykač, jeho remanentní magnetizace bude vždy jiná. Tento fakt lze pozorovat na grafech v kapitole 5.2. Hodnoty reakčních časů byly pro každý stykač individuální (v řádech desítek milisekund) z důvodu remanentní magnetizace, ale také pravděpodobně kvůli mechanickému působení pružin, tvaru magnetického obvodu, či z důvodu počtu závitů.

Závěrečná část práce se zabývá navrhováním elektronického obvodu, který je sestaven mimo jiné z DC/DC step down měniče, potenciometrů a tranzistorů MOS-FET. Pomocí tohoto obvodu bylo dosaženo splnění stěžejního cíle diplomové práce, tj. minimalizovat rozdíly reakčních časů daných stykačů. Tento výsledek demonstrují grafy v kapitole 5.3. Porovnáme-li výsledky měření bez navrženého obvodu, hodnoty reakčních časů byly v desítkách milisekund, zatímco použil-li se navržený obvod, hodnoty reakčních časů byly pouze v řádech mikrosekund. Negativum tohoto obvodu je nutnost manuální obsluhy. Pro použití v praxi by bylo vhodné obvod zautomatizovat.

# LITERATURA

- [1] GIGAVAC. *MIL & Heavy Duty DC Contactors* [online]. Dostupné z: <https://www.gigavac.com/catalog/power-products/mx-series>
- [2] *Stavba atomu* [online]. [vid. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://www.zschemie.euweb.cz/atomy/atom3.html?fbclid=IwAR04CTHYL6j5eg4YdfE1gLQGANJr60V2ARsG5DtZHcvTfirmfRFvDA9hcGk>
- [3] BALATKA, Josef. *Tepelná závislost permanentních magnetů*. 2017, 53.
- [4] REINBOTH, Hermann. *Vlastnosti a použití magnetických materiálů*. Přel. Zdeněk TISCHER. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, nedatováno.
- [5] BOUDA, Václav, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, a ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA. *Materiály pro elektrotechniku*. Praha: České vysoké učení technické, 2003. ISBN 978-80-01-02232-0.
- [6] PATOČKA, Miroslav a VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [7] *Magnetické látky | Eduportál Techmania* [online]. [vid. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magneticke-latky>
- [8] *Fyzika I (strana 283/327)* [online]. [vid. 2020-10-30]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_ekniha-001/pages-img/283.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/283.html)
- [9] JAROMÍR DRÁPALA a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály* [online]. 1. vyd. 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
- [10] MUDRUŇKOVÁ, Alena. *Magnetické materiály* [online]. 2016 [vid. 2020-10-31]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [11] *R. L. Carlin Magnetochemistry 1986 - Free Download PDF* [online]. [vid. 2020-10-31]. Dostupné z: [https://kupdf.net/download/r-l-carlin-magnetochemistry-1986\\_58c9f745ee34352a7763762f\\_pdf](https://kupdf.net/download/r-l-carlin-magnetochemistry-1986_58c9f745ee34352a7763762f_pdf)
- [12] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR, Pavel RIPKA, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, a ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA. *Magnetické prvky a měření*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-01909-2.
- [13] MCLYMAN, Colonel William T. *Transformer and inductor design handbook*. 3rd ed., rev.expanded. New York: Marcel Dekker, 2004. Electrical and computer engineering, 121. ISBN 978-0-8247-5393-1.
- [14] *Magnetic Materials: Soft Magnets* [online]. [vid. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/metallurgy/research/Magnetic-Materials-Background/Magnetic-Materials->

Background-10-Soft-Magnets.pdf?fbclid=IwAR1v8q3xvwJHOM-lzTHPpdniy\_4PPwqvHyCE5-nvOmjOjlm1A3ks\_8xSeYw

- [15] BUL, B.K. a A KOL. *Elektrické přístroje Základy teorie*. 1. vyd. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, nedatováno.
- [16] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. *Elekromagnetické přístroje*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1984.
- [17] MERZOUKI, Rochdi, Arun Kumar SAMANTARAY, Pushparaj Mani PATHAK a Belkacem Ould BOUAMAMA. *Intelligent Mechatronic Systems: Modeling, Control and Diagnosis* [online]. 27. listopad 2012. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=k81ECeMxyk8C&q=ferromagnetic%20electromagnet&pg=PA404&redir\\_esc=y&fbclid=IwAR2ZS6yy12xFoFocmZ5KYqE3Ksh7RRiN0P UZ36KFnrkhubFVgPmMboJtyYk#v=onepage&q&f=true](https://books.google.cz/books?id=k81ECeMxyk8C&q=ferromagnetic%20electromagnet&pg=PA404&redir_esc=y&fbclid=IwAR2ZS6yy12xFoFocmZ5KYqE3Ksh7RRiN0P UZ36KFnrkhubFVgPmMboJtyYk#v=onepage&q&f=true)
- [18] *Electromagnet* [online]. 2020 [vid. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electromagnet&oldid=985345552>
- [19] SILVANUS PHILLIPS THOMPSON. *Lectures on the Electromagnet* [online]. B.m.: The W.J. Johnston company, ltd., 1891 [vid. 2020-11-01]. Dostupné z: <http://archive.org/details/lecturesonelect00thomgoog>
- [20] CHASED. Electromagnetism. *Smithsonian Institution Archives* [online]. 21. březen 2012 [vid. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://siarchives.si.edu/history/featured-topics/henry/electromagnetism>
- [21] CAVICCHI, Elizabeth. *Series and Parallel Experimenting with Electromagnets* [online]. Dostupné z: <http://ppp.unipv.it/Collana/Pages/Libri/Saggi/Volta%20and%20the%20History%20of%20Electricity/V%26H%20Sect4/V%26H%20387-407.pdf?fbclid=IwAR2kmKtOkIgdXIQhKIZ6Q9PIX6PHKvdhAYJyyT3jCXCe2oPIOC87VNIY8P0>
- [22] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1985.
- [23] HLÁVKA, Jan a A KOL. *Elektrotechnika 1: fyzikální základy část 1*. 1. vyd. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, nedatováno.
- [24] NOVOTNÝ, Vladimír, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, a ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA. *Elektrické přístroje*. Praha: České vysoké učení technické, 2001. ISBN 978-80-01-02306-8.
- [25] ZEMAN, Stanislav. *Jističe a stykače*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1963. ISBN L25-B2-V-31/5574.
- [26] FANG, Shuhua, Yong CHEN a Yanju YANG. Optimization design and energy-saving control strategy of high power dc contactor. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [online]. 2020, **117**, 105633. ISSN 01420615. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijepes.2019.105633](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105633)



- [27] PAISIOS, M.P., C.G. KARAGIANNPOULOS a P.D. BOURKAS. Model for temperature estimation of dc-contactors with double-break main contacts. *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. 2007, **15**(5), 503–512. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2007.01.001
- [28] YOU JIAXIN, LIANG HUIMIN, MA GUANGCHENG, CHEN SHUQING, a CAI ZHAOWEN. Research on the dynamic calculation model for a dc solenoid electromagnetic contactor and its contact characteristics in break process. In: *2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm): 2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)* [online]. San Diego, CA, USA: IEEE, 2015, s. 191–194 [vid. 2020-11-22]. ISBN 978-1-4673-9341-6. Dostupné z: doi:10.1109/HOLM.2015.7355096
- [29] YOSHIDA, Kiyoshi, Koichiro SAWA, Kenji SUZUKI, Masaaki WATANABE a Hideki DAIJIMA. Influence of Voltage and Current on Arc Duration and Energy of DC Electromagnetic Contactor. In: *2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2011): 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)* [online]. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2011, s. 1–5 [vid. 2020-11-22]. ISBN 978-1-61284-650-7. Dostupné z: doi:10.1109/HOLM.2011.6034775
- [30] HAN, Y., W. SHANG, C. HOU, A. LI a Y. CAO. Study on factors influencing the characteristics of arc in DC contactors. In: *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST): 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)* [online]. 2017, s. 406–410. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPE-ST.2017.8188886
- [31] LI, B., S. MA, Z. CAI a Y. ZHENG. A Novel Method for Calculating Residual Magnetic Flux of DC Contactors. In: *2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST): 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)* [online]. 2019, s. 535–538. ISSN 2643-9816. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPE-ST.2019.8928892
- [32] GM ELEKTRONIC. *Modul DC/DC step down 1,25 - 32V 5A, USB, LED displej* [online]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.775-058.1.pdf>
- [33] DC contactors Schaltbau [online]. [vid. 2020-12-22]. Dostupné z: <https://www.schaltbau.com/en/products/contactors/>

## Seznam symbolů a zkratek

### Zkratky:

$A_1, A_2$	cívky stykače
MTM	magneticky tvrdý materiál
MMM	magneticky měkký materiál
nn	nízké napětí
mag.	magnetický
DC	stejnoseměrný
vyst.	výstupní
přep.	přepínač
$S_1, S_2, S_3$	spínače
$D_1, D_2, \dots, D_n$	diody
$ZD_1, \dots, ZD_n$	zenerova dioda
$P_1, P_2$	potenciometry
$T_1, T_2$	tranzistory
$C_1, \dots, C_n$	kondenzátory
$R_1, \dots, R_n$	rezistory
PWM	pulsně šířková modulace

### Symbols:

Ag	stříbro	
Al	hliník	
$B_0$	vnější magnetické pole	[T]
$B$	magnetická indukce	[T]
$B_r$	remanentní indukce	[T]
$B_s$	indukce nasycení	[T]
Co	kobalt	
Cu	měď	
Dy	dysprosium	
$d$	průměr	[mm]
Fe	železo	
Gd	gadolinium	
$H$	intenzita magnetického pole	[Am <sup>-1</sup> ]
$H_c$	koercitivní síla	[Am <sup>-1</sup> ]
$H_m$	největší intenzita pole	[Am <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub>	vodík	
$i, I$	elektrický proud	[A]
$J$	proudová hustota	[Amm <sup>-2</sup> ]

Ni	nikl	
O <sub>2</sub>	kyslík	
Pb	olovo	
<i>R</i>	elektrický odpor	[Ω]
<i>R<sub>x</sub></i>	měřený elektrický odpor	[Ω]
S	síra	
<i>S</i>	průřez jádra	[mm <sup>2</sup> ]
<i>U</i>	napětí	[V]
<i>U<sub>1,2 obl.</sub></i>	obloukové napětí	[V]
<i>W</i>	mechanická práce	[W]
Zn	zinek	
<i>μ<sub>r</sub></i>	relativní permeabilita	[-]
<i>μ</i>	permeabilita	[Hm <sup>-1</sup> ]
<i>ψ</i>	spřažený tok	[Vs]
<i>sp</i>	počáteční poloha	
<i>sk</i>	koncová poloha	
<i>s, δ</i>	vzduchová mezera	[mm]
<i>tp</i>	doba působení	[s]
<i>t<sub>off</sub></i>	doba vypínání	[s]
<i>Δt</i>	rozdíl časů	[s]
<i>t<sub>rozb</sub></i>	doba rozběhu	[s]
<i>t<sub>poh</sub></i>	doba pohybu	[s]
<i>i<sub>rozb</sub></i>	rozběhový proud	[A]
<i>t<sub>rozb</sub></i>	doba rozběhu	[s]
<i>Φ, φ</i>	magnetický tok	[Wb]
<i>l</i>	délka střední siločáry	[m]

# Seznam příloh

Příloha A - Naměřené hodnoty .....	61
------------------------------------	----

## Příloha A - Naměřené hodnoty

### A.1 Naměřené hodnoty reakčních časů (DC stykač-vzorek 1)

Stykač v horizontální poloze							Stykač ve vertikální poloze						
1. měření			2. měření			$\bar{\Delta t}$ [ms]	3. měření			4. měření			$\bar{\Delta t}$ [ms]
U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]		U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	
20	0,80	51,4	20	0,79	51,5	51,46	20	0,79	53,2	20	0,78	53,0	53,1
19	0,76	51,2	19	0,75	50,0	50,6	19	0,75	52,3	19	0,75	52,0	52,1
18	0,72	49,6	18	0,71	49,3	49,45	18	0,71	50,3	18	0,70	51,3	50,8
17	0,67	47,8	17	0,67	47,6	47,7	17	0,67	48,8	17	0,67	48,6	48,7
16	0,63	47,0	16	0,63	46,7	46,85	16	0,63	48,1	16	0,63	47,4	47,8
15	0,59	45,4	15	0,59	45,0	45,2	15	0,59	45,4	15	0,59	45,8	45,6
14	0,55	43,7	14	0,55	43,8	43,75	14	0,55	44,0	14	0,55	43,9	43,9
13	0,51	41,7	13	0,51	42,9	42,3	13	0,51	42,8	13	0,51	43,4	43,1
12	0,47	40,6	12	0,47	40,7	40,65	12	0,47	40,9	12	0,47	41,2	41,0
11	0,43	38,7	11	0,43	38,8	38,75	11	0,43	39,1	11	0,43	39,1	39,1
10	0,39	35,8	10	0,39	36,1	35,95	10	0,39	34,9	10	0,39	37,7	36,3
9	0,36	32,4	9	0,35	33,8	33,123	9	0,35	32,8	9	0,35	32,6	32,7
8	0,32	28,6	8	0,32	28,0	28,28	8	0,31	28,2	8	0,31	29,7	29,0
7	0,27	24,0	7	0,27	23,8	23,86	7	0,27	24,4	7	0,27	23,9	24,2

## A.2 Naměřené hodnoty reakčních časů (DC stykač-vzorek 2)

Stykač v horizontální poloze							Stykač ve vertikální poloze						
1. měření			2. měření			$\bar{\Delta t}$ [ms]	3. měření			4. měření			$\bar{\Delta t}$ [ms]
U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]		U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	
20	10,0	48,2	20	10,0	43,9	46,1	20	10,0	47,0	20	9,9	47,0	47,0
19	9,7	46,8	19	8,8	43,5	45,2	19	9,5	47,6	19	9,3	46,3	47,0
18	9,0	48,6	18	8,3	43,6	46,1	18	8,8	45,6	18	8,6	44,5	45,1
17	8,5	47,0	17	7,8	43,1	45,1	17	8,3	45,2	17	8,1	44,6	44,9
16	8,0	45,9	16	7,4	43,6	44,8	16	7,8	47,1	16	7,5	46,8	47,0
15	7,0	44,3	15	7,0	44,0	44,2	15	7,3	44,6	15	7,0	44,1	44,4
14	6,8	45,9	14	6,5	41,5	43,7	14	6,8	44,9	14	6,6	44,4	44,7
13	6,3	43,7	13	6,0	42,1	42,9	13	6,2	43,3	13	6,1	43,1	43,2
12	5,9	43,2	12	5,5	41,7	42,5	12	5,8	43,8	12	5,7	42,7	43,3
11	5,4	44,5	11	5,1	42,3	43,4	11	5,3	43,4	11	5,2	45,3	44,4
10	5,0	44,5	10	4,6	41,8	43,2	10	4,8	42,7	10	4,7	42,1	42,4
9	4,5	43,7	9	4,2	42,1	42,9	9	4,3	44,0	9	4,3	44,3	44,2
8	4,0	42,8	8	3,8	41,1	42,0	8	3,8	43,7	8	3,8	42,4	43,1
7	3,5	43,3	7	3,3	41,2	42,2	7	3,3	42,0	7	3,4	43,6	42,8
6	3,0	41,6	6	2,8	38,5	40,0	6	3,0	39,6	6	3,0	42,7	41,2
5	2,5	40,7	5	2,4	40,3	40,5	5	2,5	41,0	5	2,5	39,1	40,1
4	2,0	39,0	4	2,0	37,2	38,1	4	1,9	37,1	4	1,9	40,4	38,8
3	1,5	35,0	3	1,5	35,0	35,0	3	1,5	38,0	3	1,5	38,0	38,0
2	1,0	30,0	2	1,0	30,0	30,0	2	1,0	30,0	2	1,0	30,0	30,0
1	0,5	12,0	1	0,5	10,0	11,0	1	0,5	8,0	1	0,5	14,0	11,0

### A.3 Naměřené hodnoty reakčních časů (DC stykač-vzorek 3)

Stykač ve vertikální poloze						
1. měření			2. měření			$\bar{\Delta t}$ [ms]
U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	U [V]	I [A]	$\Delta t$ [ms]	
20	0,33	80,8	20	0,28	81,0	80,9
19	0,30	79,4	19	0,26	79,4	79,4
18	0,28	78,0	18	0,25	78,0	78,0
17	0,27	76,8	17	0,24	76,6	76,7
16	0,25	74,4	16	0,22	75,4	74,9
15	0,25	73,8	15	0,21	74,0	73,9
14	0,24	71,8	14	0,19	72,4	72,1
13	0,22	69,2	13	0,18	69,2	69,2
12	0,21	67,6	12	0,16	67,2	67,4
11	0,20	65,0	11	0,15	65,2	65,1
10	0,18	61,8	10	0,14	62,8	62,3
9	0,17	59,0	9	0,12	59,2	59,1
8	0,11	55,0	8	0,11	55,4	55,2
7	0,09	50,4	7	0,09	50,6	50,5
6	0,08	44,6	6	0,08	45,8	45,2
5	0,07	35,4	5	0,07	36,0	35,7
4,3	0,06	28,2	4,3	0,06	25,0	26,6