



# 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

## BRZDĚNÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE

BRAKING OF AN INDUCTION MACHINE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Mareček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Šimon Mareček

**ID:** 221246

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV  
TÉMATU:**

## Brzdění asynchronního stroje

### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte měření elektrických a mechanických veličin při brzdění asynchronního motoru.
2. Proveďte simulace brzdění asynchronního motoru metodou konečných prvků.
3. Výsledky měření a simulací porovnejte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. Teorie elektrických strojů. Praha: SNTL, 1968. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] LYÓCSA, Štefan a Jozef GÜTTLER. Měření na asynchronním motoru. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1972. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493- 0004-5.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Mach, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Práce je zaměřena na brzdění asynchronního motoru a rizika s ním spojené. V první části se čtenáři seznámí s technickými parametry motoru, který je použit pro simulace. Druhá část se zaměřuje na simulační program Ansys Maxwell a metodu konečných prvků. Ve třetí části je čtenářům představen obecný popis asynchronního stroje. Čtvrtou část tvoří brzdění protiproudem. Předposlední část je věnována dynamickému brzdění. Poslední část obsahuje krátké seznámení s generátorickým brzděním. Kapitoly zaměřené na brzdění jsou doplněny simulovanými průběhy.

## **Klíčová slova**

Brzdění, asynchronní motor, brzdění protiproudem, dynamické brzdění, generátorické brzdění, Ansys Maxwell, metoda konečných prvků

## **Abstract**

The work is focused on the braking of an induction engine and the risks associated with it. In the first part, there are readers acquainted with the technical parameters of the induction engine, which is used for simulations. The second part focuses on the simulation program Ansys Maxwell and the finite element method. In the third part, there are readers introduced to a general description of the induction machine. The fourth part consists of countercurrent braking. The penultimate part is devoted to dynamic braking. The last part contains a brief introduction to generator braking. The chapters focused on braking are supplemented by simulated waveforms.

## **Keywords**

Braking, induction engine, countercurrent braking, dynamic braking, generator braking, Ansys Maxwell, finite element method

# Bibliografická citace

## Citace tištěné práce:

MAREČEK, Šimon. *Brzdění asynchronního stroje*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142765>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

## Citace elektronického zdroje:

MAREČEK, Šimon. *Brzdění asynchronního stroje* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142765>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Šimon Mareček</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>221246</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Brzdění asynchronního motoru</i>

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:

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat útvarům R&D a QM Siemens Frenštát pod Radhoštěm za ochotu a spolupráci při poskytování materiálů potřebných pro simulování průběhů a také za provedená měření.

V Brně dne:

-----

podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ANSYS MAXWELL A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>12</b>
1.1 ANSYS MAXWELL .....	12
1.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	12
<b>2. OBECNÝ POPIS ASYNCHRONNÍHO STROJE .....</b>	<b>13</b>
2.1 MOMENT STROJE .....	14
2.2 SPOUŠTĚNÍ .....	16
2.3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU .....	17
2.3.1 Ztráty při zatíženém motoru .....	17
2.3.2 Ztráty při chodu naprázdno .....	17
2.3.3 Ztráty při chodu nakrátko .....	17
<b>3. TECHNICKÉ PARAMETRY SIMULOVANÉHO MOTORU.....</b>	<b>18</b>
3.1 ZÁTĚŽOVÝ TEST .....	20
3.2 ROZBĚH MOTORU .....	22
<b>4. BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM .....</b>	<b>24</b>
4.1 PRINCIP .....	24
4.2 RIZIKA SPOJENÁ S PROVOZEM ASYNCHRONNÍ BRZDY .....	24
4.3 SIMULACE BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI JMENOVITÝCH PARAMETRECH.....	26
4.4 BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI POLOVIČNÍM NAPÁJECÍM NAPĚTÍ .....	28
4.5 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM – BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI 160 V .....	30
4.5.1 Simulace.....	30
4.5.2 Měření.....	31
4.6 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM – BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM PŘI 100 V .....	33
4.6.1 Simulace.....	33
4.6.2 Měření.....	34
<b>5. DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ .....</b>	<b>36</b>
5.1 PRINCIP .....	36
5.2 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 400$ V .....	38
5.3 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 200$ V .....	39
5.4 DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI $U_{DC} = 400$ V A $J_S = 19,91$ KG.M <sup>2</sup> .....	40
5.5 OVĚŘENÍ MĚŘENÍM - DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ PŘI 5 V .....	41
5.5.1 Simulace.....	41
5.5.2 Měření.....	42
<b>6. BRZDĚNÍ V REŽIMU GENERÁTOR.....</b>	<b>44</b>
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>46</b>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	49

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1:</b> Asynchronní motor rozdělený na konečné prvky podle metody konečných prvků .....	12
<b>Obrázek 2:</b> Pracovní stavy asynchronního stroje, [7] .....	13
<b>Obrázek 3:</b> Náhradní obvodový model asynchronního stroje přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, [7].....	14
<b>Obrázek 4:</b> Momentová charakteristika, převzato z [5].....	16
<b>Obrázek 5:</b> Rozdělení ztrát v AM podle [6] .....	17
<b>Obrázek 6:</b> Asynchronní motor použitý pro měření, [8].....	18
<b>Obrázek 7:</b> Řez motorem .....	19
<b>Obrázek 8:</b> Rozběh motoru.....	22
<b>Obrázek 9:</b> Příklad prohození dvou fází .....	24
<b>Obrázek 10:</b> Úhlová rychlost v pracovních stavech AM, [7] .....	25
<b>Obrázek 11:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech .....	26
<b>Obrázek 12:</b> Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí.....	28
<b>Obrázek 13:</b> Simulace brzdění protiproudem při 160 V .....	30
<b>Obrázek 14:</b> Měření brzdění protiproudem při 160 V .....	31
<b>Obrázek 15:</b> Simulace brzdění protiproudem při 100 V .....	33
<b>Obrázek 16:</b> Měření brzdění protiproudem při 100 V .....	34
<b>Obrázek 17:</b> Zapojení AM pro dynamické brzdění; a) stator zapojen do hvězdy; b) stator zapojen do trojúhelníka; převzato z [3] .....	36
<b>Obrázek 18:</b> Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V .....	38
<b>Obrázek 19:</b> Dynamické brzdění při napájecím napětí 200 V .....	39
<b>Obrázek 20:</b> Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V a momentu setrvačnosti 19,91 kg.m <sup>2</sup> .....	40
<b>Obrázek 21:</b> Simulace dynamického brzdění při 5 V .....	41
<b>Obrázek 22:</b> Měření dynamického brzdění při 5 V .....	42
<b>Obrázek 23:</b> Rozběh - otáčky .....	50
<b>Obrázek 24:</b> Rozběh - moment.....	51
<b>Obrázek 25:</b> Rozběh - proud.....	51
<b>Obrázek 26:</b> Rozběh – ztráty v železe .....	52
<b>Obrázek 27:</b> Rozběh – ztráty v kleci rotoru.....	52
<b>Obrázek 28:</b> Rozběh – Jouleovy ztráty.....	53
<b>Obrázek 29:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech - .....	54
<b>Obrázek 30:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech - moment .....	55
<b>Obrázek 31:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech - proud.....	55
<b>Obrázek 32:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – ztráty v železe .....	56
<b>Obrázek 33:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – ztráty v kleci rotoru .....	56
<b>Obrázek 34:</b> Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – Jouleovy ztráty .....	57
<b>Obrázek 35:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V - otáčky.....	58
<b>Obrázek 36:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V - moment.....	59
<b>Obrázek 37:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V - proud .....	59
<b>Obrázek 38:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V – ztráty v železe.....	60
<b>Obrázek 39:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V – ztráty v kleci rotoru .....	60
<b>Obrázek 40:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=200$ V – Jouleovy ztráty .....	61



<b>Obrázek 41:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V - otáčky.....	62
<b>Obrázek 42:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V - moment.....	63
<b>Obrázek 43:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V - proud .....	63
<b>Obrázek 44:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V – ztráty v železe.....	64
<b>Obrázek 45:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V – ztráty v kleci rotoru .....	64
<b>Obrázek 46:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=160$ V – Jouleovy ztráty .....	65
<b>Obrázek 47:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V - otáčky.....	66
<b>Obrázek 48:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V - moment.....	67
<b>Obrázek 49:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V - proud .....	67
<b>Obrázek 50:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V – ztráty v železe.....	68
<b>Obrázek 51:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V – ztráty v kleci rotoru .....	68
<b>Obrázek 52:</b> Brzdění protiproudem při $U_n=100$ V – Jouleovy ztráty .....	69
<b>Obrázek 53:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V - otáčky.....	70
<b>Obrázek 54:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V - moment .....	71
<b>Obrázek 55:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V - proud .....	71
<b>Obrázek 56:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V – ztráty v železe.....	72
<b>Obrázek 57:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V – ztráty v kleci rotoru .....	72
<b>Obrázek 58:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400$ V – Jouleovy ztráty .....	73
<b>Obrázek 59:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V - otáčky.....	74
<b>Obrázek 60:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V - moment .....	75
<b>Obrázek 61:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V - proud .....	75
<b>Obrázek 62:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V – ztráty v železe.....	76
<b>Obrázek 63:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V – ztráty v kleci rotoru .....	76
<b>Obrázek 64:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200$ V – Jouleovy ztráty .....	77
<b>Obrázek 65:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> - otáčky.....	78
<b>Obrázek 66:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> - moment .....	79
<b>Obrázek 67:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> - proud .....	79
<b>Obrázek 68:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – ztráty v železe .....	80
<b>Obrázek 69:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – ztráty v kleci rotoru .....	80
<b>Obrázek 70:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – Jouleovy ztráty .....	81
<b>Obrázek 71:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – otáčky.....	82
<b>Obrázek 72:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – moment.....	83
<b>Obrázek 73:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – proud.....	83
<b>Obrázek 74:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – ztráty v železe .....	84
<b>Obrázek 75:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – ztráty v kleci rotoru..	84
<b>Obrázek 76:</b> Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5$ V a $J_s=19,91$ kg.m <sup>2</sup> – Jouleovy ztráty ve vinutí statoru.....	85

# SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1:</b> Technické parametry motoru.....	18
<b>Tabulka 2:</b> Rozměry kompletního motoru.....	18
<b>Tabulka 3:</b> Rozměry motoru bez vnější kostry.....	19
<b>Tabulka 4:</b> Porovnání proudů - Zátěžový test.....	20
<b>Tabulka 5:</b> Porovnání momentů - Zátěžový test.....	20
<b>Tabulka 6:</b> Porovnání ztrát v železe - Zátěžový test.....	20
<b>Tabulka 7:</b> Porovnání ztrát rotorové klece - Zátěžový test.....	21
<b>Tabulka 8:</b> Porovnání Jouleových ztrát ve vinutí statoru - Zátěžový test.....	21
<b>Tabulka 9:</b> Nejvyšší dosažené parametry při rozběhu motoru.....	22
<b>Tabulka 10:</b> Nejvyšší dosažené parametry při brzdění protiproudem ve jmenovitém stavu .....	27
<b>Tabulka 11:</b> Nejvyšší dosažené parametry - brzdění při polovičním napětí.....	28
<b>Tabulka 12:</b> Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 160 V .....	32
<b>Tabulka 13:</b> Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 100 V .....	35
<b>Tabulka 14:</b> Celkové srovnání brzdění protiproudem při různých napájecích napětí.....	35
<b>Tabulka 15:</b> Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 400 V .....	38
<b>Tabulka 16:</b> Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V .....	39
<b>Tabulka 17:</b> Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V a momentu setrvačnosti 19,91 kg.m <sup>2</sup> .....	40
<b>Tabulka 18:</b> Celkové srovnání stejnosměrného brzdění při různých vstupních parametrech .....	43
<b>Tabulka 19:</b> Ztráty třením a větrem.....	86
<b>Tabulka 20:</b> Měření brzdění protiproudem při 160 V.....	86
<b>Tabulka 21:</b> Měření brzdění protiproudem při 100 V.....	89
<b>Tabulka 22:</b> Měření brzdění stejnosměrným proudem .....	97

# ÚVOD

Podle [7] patří indukční stroje k hojně používanému typu elektrických motorů v oblasti silnoproudé elektrotechniky i energetiky. Asynchronní motor je stroj, který mění elektrickou energii na energii mechanickou nebo případně mění elektrickou energii na energii elektrickou ale o jiných parametrech. Pokud motor pracuje v režimu jako generátor, pak mění mechanickou energii na energii elektrickou.

Z [5] je jasné, že podobně jako v případě spouštění asynchronních motorů se snažíme co nejvíce snížit hodnotu záběrného proudu, tak i při brzdění asynchronních motorů vznikají rizikové proudy, které mají za následek velké tepelné namáhání konstrukčních prvků motoru jako např. vinutí statoru, rotoru. Problematikou brzdění asynchronních motorů je dobré se zabývat hlavně proto, aby zkrácení doby doběhu motoru bylo co nejrychlejší a nejefektivnější. Další důvod co nejrychlejšího zabrzdění je bezpečnost práce a to např. v případě zdvihacích zařízení (jeřáby).

Podle [7] existuje více možností, jak v praxi realizovat brzdění asynchronních motorů, přičemž se jedná buď o brzdění mechanické nebo elektronické. Brzdění protiproudem není energeticky příliš výhodné. Generátorické brzdění je takový pracovní stav stroje, kdy otáčky rotoru dosahují vyšších hodnot než otáčky magnetického pole statoru. U dynamického brzdění se k zastavení stroje využívá přivedeného stejnosměrného napětí. S brzděním se dá setkat i u jiných typů točivých strojů jako jsou např. stejnosměrné stroje. U tohoto typu strojů závisí způsob brzdění na principu jejich buzení. Zatímco u derivačně buzených jsou možné všechny tři způsoby brzdění stejně jako u asynchronních strojů, tak u sériově buzených se uplatňuje pouze dynamické brzdění a protiproud. Generátorické brzdění zde nemůže nikdy nastat. Vychází to z toho principu, že jakmile se po připojení motoru ke zdroji v kotvě začne indukovat napětí, tak proud začne klesat. Ale tento proud nikdy neklesne až na nulu.

Práce je zaměřena na princip brzdění asynchronních motorů, problémy spojené s brzděním a také jejich řešení. Pro řešení a modelování je použit program Ansys Maxwell a metoda konečných prvků.

Grafy ve větší velikosti jsou součástí přílohy.

# 1. ANSYS MAXWELL A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Součástí práce je také simulování brzdění asynchronního stroje a výpočty prováděné metodou konečných prvků.

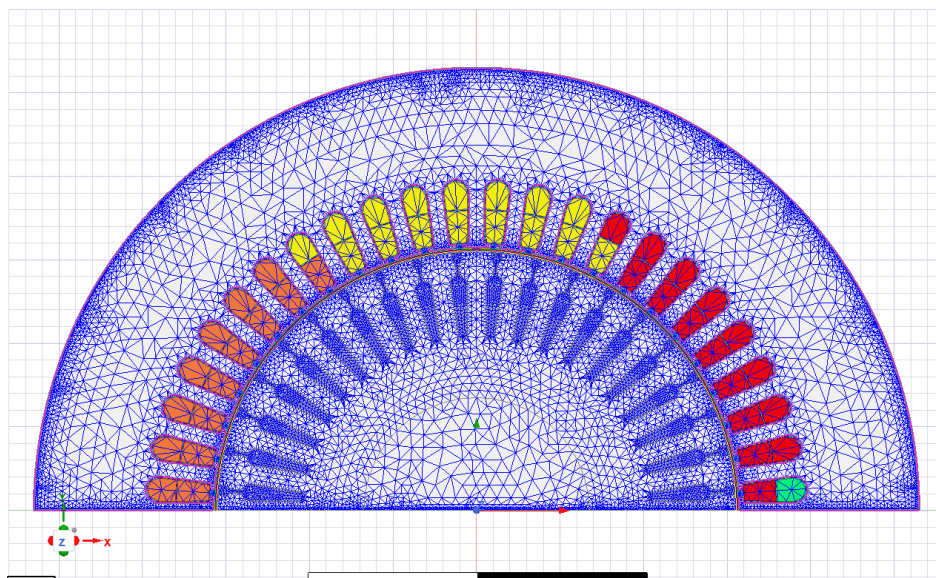
## 1.1 Ansys Maxwell

Podle [1] se jedná o program, který modeluje elektrické přístroje a elektrické stroje točivé i netočivé a umožňuje jejich elektromagnetický výpočet. Program umožňuje modelovat buď ve 2D i 3D rovině. Při řešení je využívána nízkofrekvenční elektromagnetická simulace. Díky simulování je možné předvídat, jak bude např. elektrický stroj pracovat v praxi. V náročnějších početních úlohách by byly ruční matematické výpočty příliš dlouhé a složité, proto se využívá různých počítačových programů jako např. Ansys Maxwell, které za pomoci metody konečných prvků provádějí výpočty.

## 1.2 Metoda konečných prvků

Z [2] je jasné, že díky metodě konečných prvků můžeme numericky řešit a vyhodnocovat parciální diferenciální rovnice. Princip této metody vychází z diskretizace oblasti řešení. Podstatou je rozdělit požadovanou oblast na mnoho prvků. Tyto rozdělené prvky mají jednoduché tvary a označují se jako konečné prvky. Vrchol každého prvku se nazývá uzel.

Tato práce je postavená na vytvoření fyzikálního a matematického modelu asynchronního stroje v programu Ansys Maxwell a následných výpočtech pomocí metody konečných prvků.



**Obrázek 1:** Asynchronní motor rozdělený na konečné prvky podle metody konečných prvků

## 2. OBECNÝ POPIS ASYNCHRONNÍHO STROJE

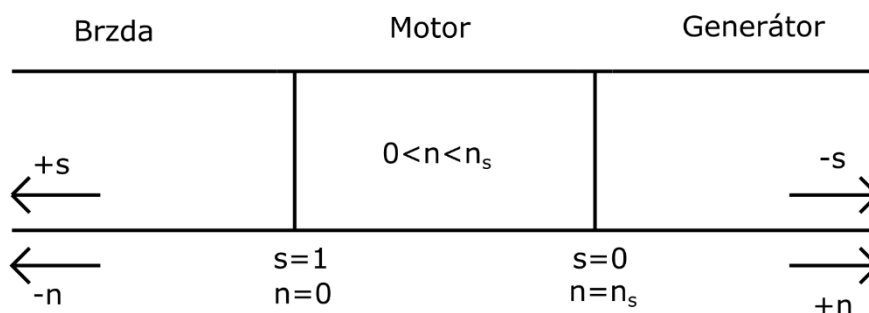
Kapitola je založena na teorii podle [7].

Asynchronní stroje se řadí mezi stroje točivé. Po připojení na elektrickou síť vznikne otáčivé magnetické pole statoru, díky kterému se začne mechanicky otáčet rotor stroje. Ale na rozdíl od synchronních strojů jsou zde otáčky rotoru zpožděny za otáčkami magnetického pole statoru o určitou hodnotu skluzu.

Díky tomu, že je jednoduchý na výrobu, nemá složitou údržbu, je ekonomicky výhodný a spolehlivý se jedná o nejrozšířenější typ točivého stroje. S příchodem frekvenčních měničů se také stal nejlépe regulovatelným v oblasti otáček, kdy do té doby byly za nejvíce regulovatelné považovány především stroje stejnosměrné.

Indukční stroje pracují tak, že energie akumulovaná ve vinutí statoru je přenesena na vinutí rotoru principem elektromagnetické indukce, tzn. nejsou vodivě spojeny.

Asynchronní stroj se ve většině případů používá jako poháněcí motor ( $n < n_1$ ;  $s = 0-100\%$ ), ale můžou nastat i případy, kdy se používá jako generátor ( $n > n_1$ ;  $-s$ ). Pokud se rotor otáčí stejnými otáčkami jako magnetické pole statoru, tak se jedná o synchronní stav, kdy  $s = 0\%$ .



**Obrázek 2:** Pracovní stavy asynchronního stroje, [7]

Kotvou je u asynchronních strojů vinutí v drážkách rotoru. Podle typu rotoru jsou asynchronní stroje rozděleny na stroje s kotvou nakrátko a kotvou kroužkovou. V případě kotvy nakrátko tvoří vinutí rotoru tyče, které jsou uloženy v drážkách. Všechny tyče jsou spojeny nakrátko na koncích rotoru. Naopak u kroužkové kotvy je uložení vinutí v drážkách rotoru podobné statorovému vinutí. Vývody tohoto vinutí jsou pak spojeny s kroužky na hřídeli.

## 2.1 Moment stroje

Podle [5] působí točivé magnetické pole spolu s rotorovými proudy, čímž vzniká moment stroje, který má za následek otáčení rotoru v takovém směru, v jakém se toto magnetické pole otáčí. Z [7] jde odvodit moment stroje:

$$P = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

$$P_\delta = M \cdot \omega_1 = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \quad (2)$$

$$P_{mech} = M \cdot \omega = M \cdot \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (3)$$

$$P_{el} = P_\delta - P_{mech} = M \cdot (\omega_1 - \omega) \quad (4)$$

Elektrický výkon spotřebovaný na činných odporech rotoru se nazývá také skluzový výkon, jelikož platí:

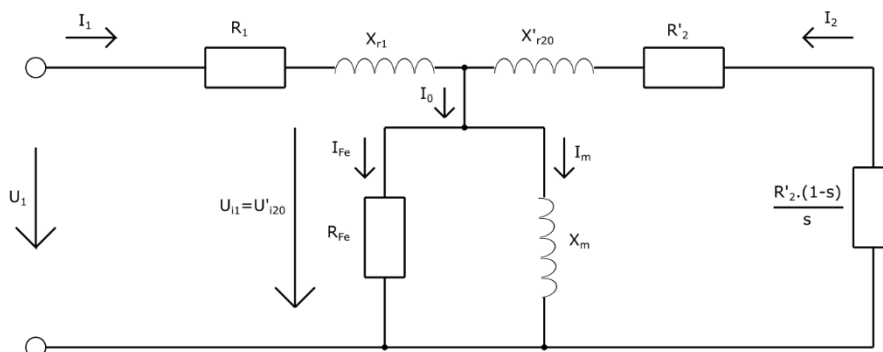
$$\frac{P_{el}}{P_\delta} = \frac{M \cdot (\omega_1 - \omega)}{M \cdot \omega_1} = s \quad (5)$$

$$P_{el} = s \cdot P_\delta \quad (6)$$

Jednou z možností řízení otáček asynchronního stroje je změna skluzového výkonu. Výkon na hřídeli se pak nebude rovnat celkovému mechanickému výkonu vytvářenému strojem, protože zde hrají roli také ztráty dodatečné a vlastní mechanické:

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (7)$$

K výpočtu mechanického výkonu potřebujeme znát náhradní schéma asynchronního stroje:



**Obrázek 3:** Náhradní obvodový model asynchronního stroje přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, [7]

$$P_{mech} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot (1 - s) \quad (8)$$

Obecně je mechanický moment zapsán následovně:

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad (9)$$

Úhlová rychlost točivého pole statoru se vypočte jako:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (10)$$

Úhlová rychlost rotoru se vypočítá jako rozdíl úhlových rychlostí točivých magnetických polí statoru a rotoru:

$$\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (11)$$

Z náhradního obvodu asynchronního stroje jde pak určit hodnota proudu:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2}} \quad (12)$$

Z vyjádřeného proudu je možné určit celkový mechanický moment stroje:

$$M_{mech} = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot \frac{R_2'}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2 \right]} \quad (13)$$

Záběrný moment je další veličina, kterou je potřeba definovat. Tento moment vzniká, jakmile je motor připojen k síti. V tomto okamžiku je skluz  $s=1$  a tím pádem otáčky dosahují nulových hodnot:

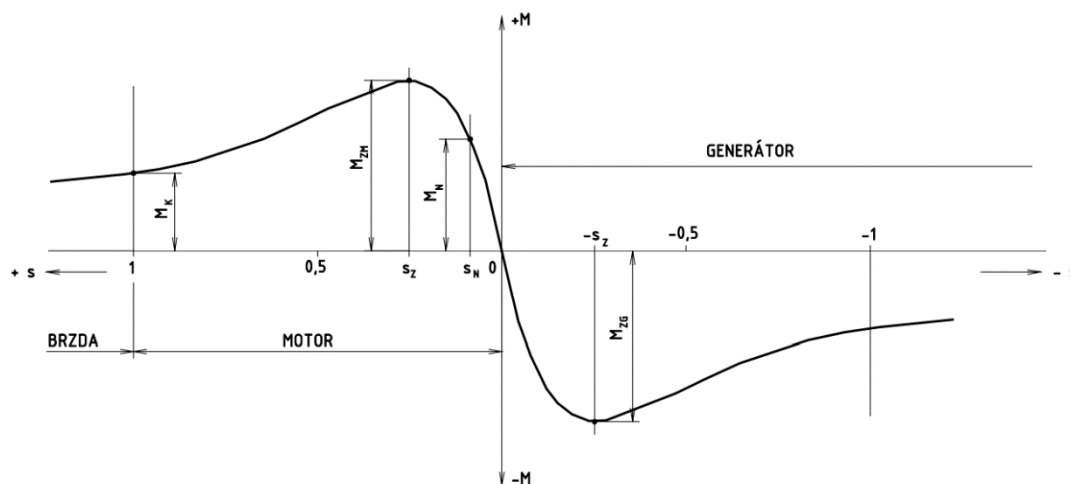
$$M_z = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot R_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R_2')^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2]} \quad (14)$$

Při určitých otáčkách dosáhne moment stroje své maximální hodnoty. Takovému momentu odpovídá i maximální hodnota skluzu:

$$s_{max} = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2}} \quad (15)$$

$$M_{max} = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{(R_1)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2} \right]} \quad (16)$$

Maximální moment se nazývá také moment zvratu. Pokud zátěž motoru překročí hodnotu momentu zvratu, tak se motor zastaví. Moment zvratu se dá ovlivňovat změnou odporu fáze rotoru  $R'_2$ . Moment zvratu nám rozděljuje momentovou charakteristiku na dvě části. Levá část se nazývá nestabilní a pravá část stabilní, někdy označována jako pracovní.



**Obrázek 4:** Momentová charakteristika, převzato z [5]

Nakonec je definována veličina momentová přetížitelnost, přičemž se jedná o poměr momentu zvratu ku jmenovitému momentu:

$$\frac{M_n}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s_{max}}{s} + \frac{s}{s_{max}}} \quad (17)$$

Momentová přetížitelnost podle [5] se v případě motorů s kroužkovým rotorem pohybuje v hodnotách od 1,6 – 2,5 a v případě motorů s kotvou nakrátko dosahuje až hodnoty 4. Jedná se tedy o veličinu závislou na konstrukci stroje, resp. jeho rotoru.

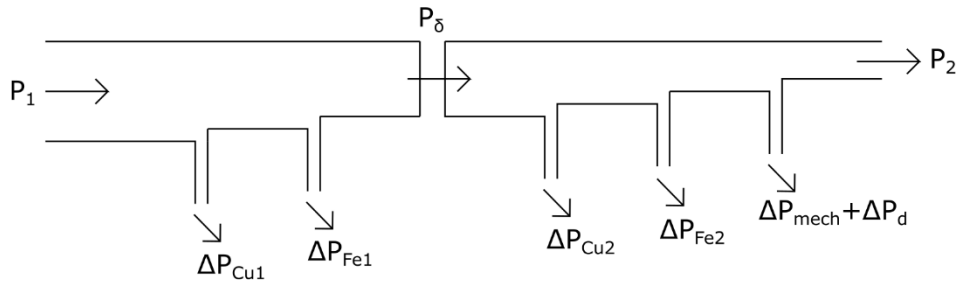
## 2.2 Spouštění

Spouštění asynchronních motorů se dost podobá brzdění. Podle [5] se opět jedná o přechodný děj. Tento přechodný děj je charakterizován rostoucími otáčkami z nuly (tedy od okamžiku připojení k síti) až do doby, kdy se dostane na své jmenovité otáčky. Nejrizikovější spouštění je u strojů, které mají vysokou frekvenci zapínání (např. jeřáby 600 – 900 spouštění během hodiny). Spouštění s sebou totiž nese velké výkyvy proudů a momentů, které ohrožují jednak motor a jednak také připojené poháněné zařízení.



## 2.3 Ztráty v asynchronním motoru

### 2.3.1 Ztráty při zatíženém motoru



Obrázek 5: Rozdělení ztrát v AM podle [6]

Jak uvádí [6], ztráty v motoru můžeme rozdělit na ztráty ve statoru a v rotoru, přičemž vždy se jedná o ztráty ve vinutí (Jouleovy ztráty) a také ztráty v železe. Konkrétně ztráty v železe rotoru by se daly zanedbat, protože jsou závislé na rotorové frekvenci, která je díky skluzu značně menší oproti síťové frekvenci. **Obrázek 5** ukazuje jednotlivé ztráty, které mohou v motoru vznikat. Například výkon přenesený přes vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem je zde označený jako  $P_\delta$  a lze ho vyjádřit jako příkon odebíraný ze sítě zmenšený o ztráty ve statoru. V rotoru se pak vyskytují ještě mechanické a dodatečné ztráty. Jedná se například o ztráty třením nebo ztráty v ložiskách.

Podle [5] jsou ztráty v režimu generátor stejné jako v případě motoru. Rozdíl je akorát v tom, že jsou obrácené. Do sítě se dodává výkon, který je v tomto případě vyjádřen jako příkon hřídele zmenšený o výše uvedené ztráty.

### 2.3.2 Ztráty při chodu naprázdno

Z [6] je jasné, že motor není zatížen, takže má nulový výkon na hřídeli. Hlavní jsou ztráty v železe statoru. Ztráty v železe rotoru se dají opět zanedbat kvůli nízké rotorové frekvenci. Další neméně důležité jsou ztráty ve vinutí statoru způsobené proudem naprázdno, který se pohybuje kolem 20-60 % z proudu jmenovitého u malých strojů, u velkých strojů i pod 20 %. Nakonec se zde vyskytují ještě ztráty v ložiskách nebo ventilační ztráty.

### 2.3.3 Ztráty při chodu nakrátko

Podle [6] má rotor při tomto zapojení nulové otáčky, takže skluz je roven 1. A protože je skluz  $s=1$ , tak je rotorová frekvence stejná jako síťová frekvence ve statoru. Opět je zde nulový výkon na hřídeli. Hlavní ztrátovou složku zde tvoří ztráty ve vinutí statoru a rotoru. Důležité jsou také ztráty v železe statoru a tentokrát i rotoru. Nakonec je ohrožena ještě kostra, hřídel a také ložiska kvůli ztrátám, které vznikají v důsledku vířivých proudů. Proud nakrátko se nazývá proud záběrný a zejména při rozběhu motoru dosahuje 3 až 7 násobku jmenovitého proudu (za předpokladu přímého připojení na napájecí síť).

### 3. TECHNICKÉ PARAMETRY SIMULOVANÉHO MOTORU

**Tabulka 1:** Technické parametry motoru

<b>Typ motoru</b>	1CV3317A	<b>Počet pólů</b>	2p = 2
<b>Jmenovité napětí [V]</b>	400	<b>Jmen. příkon [kW]</b>	326,019
<b>Zapojení<sup>1</sup></b>	D	<b>Jmenovitý výkon [kW]</b>	315
<b>Jmenovitý proud [A]</b>	550	<b>Jmen. moment [N.m]</b>	1007
<b>Jmenovitý kmitočet [Hz]</b>	50	<b>Hmotnost [kg]</b>	1510
<b>Účinnost [-]</b>	0,87	<b>Stupeň krytí</b>	IP55
<b>Účinnost [%]</b>	96,62	<b>Druh zatížení</b>	S1
<b>Jmenovité otáčky [ot/min]</b>	2988	<b>Typ konstrukce</b>	IMB3

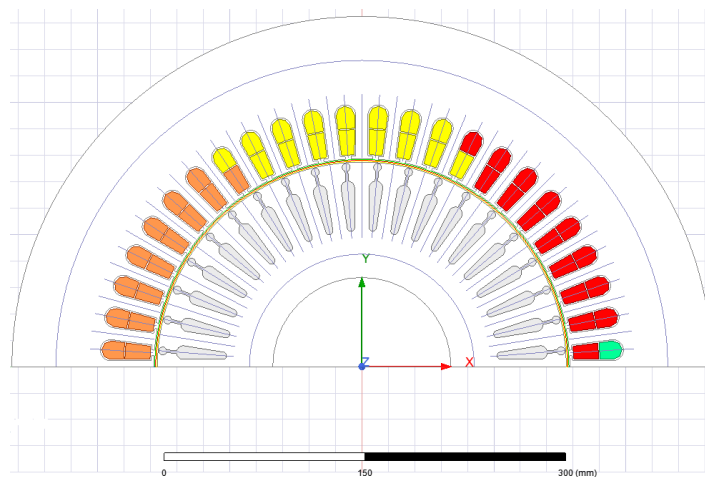
**Tabulka 2:** Rozměry kompletního motoru

Délka [mm]	1220
Šířka [mm]	620
Výška [mm]	720



**Obrázek 6:** Asynchronní motor použitý pro měření, [8]

<sup>1</sup> Motor je napájen z frekvenčního měniče



**Obrázek 7:** Řez motorem

**Tabulka 3:** Rozměry motoru bez vnější kostry

Průměr motoru bez vnější kostry [mm]	530,0
Výška statorových plechů [mm]	107,5
Průměr rotorových plechů [mm]	309,6

Simulování průběhů brzdění probíhalo na motoru zvoleném útvarem R&D a QM Siemens Frenštát pod Radhoštěm, kde bude probíhat i ověřování simulací brzdění pomocí měření. Simulace probíhaly při různých vstupních parametrech, kdy docházelo ke změnám vstupního napětí nebo momentu setrvačnosti. Z důvodu výskytu velkých proudů při brzdění bude měření realizováno při menším vstupním napětí v podsyceném stavu.

### 3.1 Zátěžový test

Simulace byly vytvořeny v programu Ansys Maxwell. Výsledná nasimulovaná data byla následně zaznamenána a pak vložena do programu Matlab, kde probíhalo vykreslování grafů.

Výsledky simulací ukazují pouze fázové hodnoty proudu, proto bylo potřeba je přepočítat na hodnoty sdružené, aby se daly porovnávat s hodnotami měřenými.

**Tabulka 4:** Porovnání proudů - Zátěžový test

Výsledné hodnoty proudu po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [A]	Měření [A]	Rozdíl [%]
125 % $P_n$	2983,7	668,9	664,4	0,67
115,1 % $P_n$	2985,1	618,8	616,2	0,42
99,9 % $P_n$	2987,2	544,9	543,4	0,28
75 % $P_n$	2990,5	429,0	428,3	0,16
50,1 % $P_n$	2993,7	324,1	323,4	0,22
25,2 % $P_n$	2996,8	242,3	237,6	1,94

**Tabulka 5:** Porovnání momentů - Zátěžový test

Výsledné hodnoty momentu po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [N.m]	Měření [N.m]	Rozdíl [%]
125 % $P_n$	2983,7	1309,6	1260,3	3,8
115,1 % $P_n$	2985,1	1204,6	1160,2	3,7
99,9 % $P_n$	2987,2	1042,8	1006,7	3,5
75 % $P_n$	2990,5	781,0	754,6	3,4
50,1 % $P_n$	2993,7	520,1	503,4	3,2
25,2 % $P_n$	2996,8	261,1	253,2	3,0

**Tabulka 6:** Porovnání ztrát v železe - Zátěžový test

Výsledné ztráty v železe po ustálení				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % $P_n$	2983,7	3531,1	3944,2	-11,70
115,1 % $P_n$	2985,1	3539,4	3951,9	-11,65
99,9 % $P_n$	2987,2	3540,3	3972,6	-12,21
75 % $P_n$	2990,5	3558,6	3983,2	-11,93
50,1 % $P_n$	2993,7	3575,0	4030,4	-12,74
25,2 % $P_n$	2996,8	3580,1	4069,0	-13,66

**Tabulka 7:** Porovnání ztrát rotorové klece - Zátěžový test

<b>Výsledné ztráty v rotorové kleci po ustálení</b>				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % $P_n$	2983,7	2639,9	2178,3	17,49
115,1 % $P_n$	2985,1	2226,4	1831,3	17,75
99,9 % $P_n$	2987,2	1661,4	1365,6	17,80
75 % $P_n$	2990,5	941,0	754,1	19,86
50,1 % $P_n$	2993,7	433,4	330,7	23,70
25,2 % $P_n$	2996,8	134,1	81,9	38,93

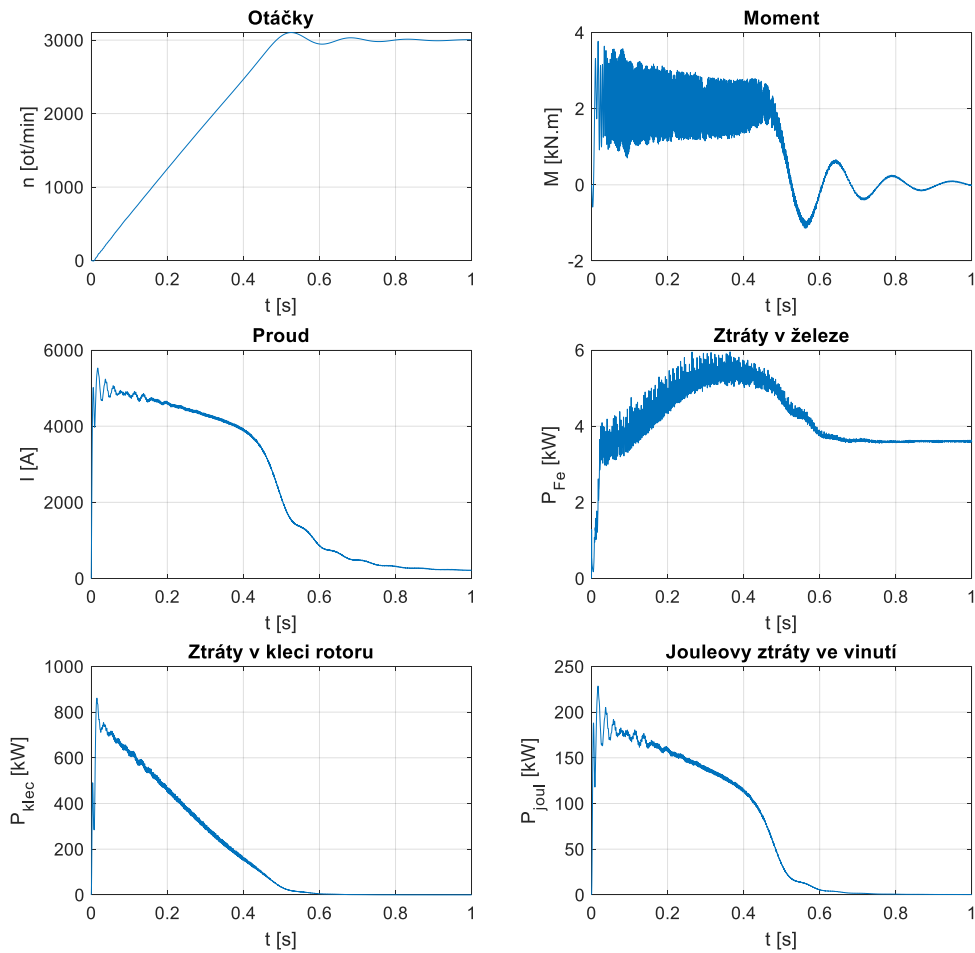
**Tabulka 8:** Porovnání Jouleových ztrát ve vinutí statoru - Zátěžový test

<b>Jouleovy ztráty ve vinutí statoru po ustálení</b>				
Výkon	Otáčky [ot/min]	Simulace [W]	Měření [W]	Rozdíl [%]
125 % $P_n$	2983,7	3315,2	3453,8	-4,18
115,1 % $P_n$	2985,1	2839,0	2965,7	-4,46
99,9 % $P_n$	2987,2	2200,7	2312,3	-5,07
75 % $P_n$	2990,5	1368,1	1435,7	-4,94
50,1 % $P_n$	2993,7	790,9	816,5	-3,24
25,2 % $P_n$	2996,8	446,3	439,2	1,59

Na začátku byla provedena simulace zátěžového testu pro 6 bodů. Tyto body byly zadány otáčkami. Odečítání probíhalo z ustálení v čase 0,9 s až 1 s. Vždy se jedná o násobek jmenovitého výkonu  $P_n = 315$  kW. Z porovnání simulací a měření je znát, že se od sebe hodnoty liší.

V případě momentu se uvažovaly ještě ztráty způsobené třením a větrem, které jsou zde započítány. Tyto ztráty činí po přepočtu na moment asi 6 N.m.

## 3.2 Rozběh motoru



Obrázek 8: Rozběh motoru

Tabulka 9: Nejvyšší dosažené parametry při rozběhu motoru

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
$n$ [ot/min]	3102,9	0,525
$M$ [N.m]	3771,3	0,01725
$I_U$ [A]	4926,9	0,06925
$I_V$ [A]	5562,7	0,01575
$I_W$ [A]	5123,8	0,0225
$P_{Fe}$ [W]	5952,9	0,36425
$P_{klec}$ [kW]	861,2	0,01475
$P_{Joul}$ [kW]	228,5	0,017

Simulace rozběhu motoru probíhaly při jmenovitých provozních parametrech. Z grafů rozběhu motoru se dá vyzorovat, že když se otáčky začnou ustalovat, tak ve stejnou chvíli nastává ten samý proces i v případě ostatních veličin. Jakmile se otáčky ustálí, tak dojde k ustálení i ostatních hodnot. Je vidět, že proud i ztráty při rozběhu dosahují několikanásobně vyšších hodnot než po ustálení. Proud při rozběhu dosahuje efektivní fázové hodnoty 2844,5 A (fáze U), zatímco proud při ustálení má efektivní hodnotu 227,6 A (fáze U).

Jouleovy ztráty, jejichž průběh je zobrazen v grafu rozběhu motoru a taky u simulaci brzdění, představují ztráty pouze ve vinutí statoru.

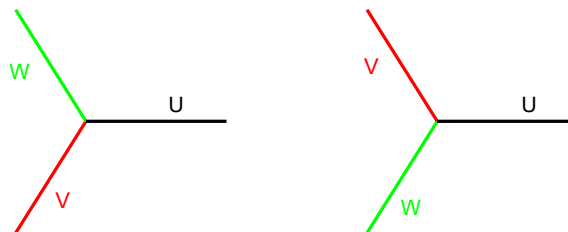
## 4. BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM

Podle [5] tento stav nastává, pokud se rotor začne otáčet proti směru otáčení magnetického pole statoru. V takovém případě je  $s > 1$ . V některých případech po odpojení motoru ze sítě nemůžeme čekat až se rotor dotočí, díky pasivním odporovým ztrátám způsobených třením by to trvalo dlouhou dobu. Takže jej potřebujeme rychle zastavit.

### 4.1 Princip

Z [5] jasně plyne, že se provádí tak, že prohodíme dvě libovolné fáze statoru. Výsledné točivé pole a proud rotoru na sebe navzájem působí a vytváří elektromagnetický moment, který stroj ubrdí. Motor odebírá ze sítě větší proud oproti proudu nakrátko. Stroj se tak dostane do oblasti záporných otáček, což jasně ukazuje **Obrázek 2**.

Je možné také rozšířit rozmezí, ve kterém bude stroj brzdít. Provádí se to zvětšením odporu rotoru, např. vřazením přídavného odporu. Rostoucí brzdná rychlost má za následek stoupání brzdné charakteristiky. Se změnou hodnoty vřazených odporů se dá měnit i výsledný brzdny moment



**Obrázek 9:** Příklad prohození dvou fází

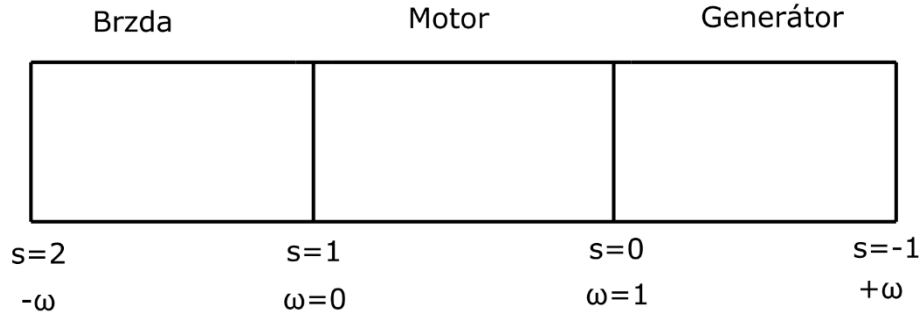
### 4.2 Rizika spojená s provozem asynchronní brzdy

Z [5] je jasné, že brzdění protiproudem je ze všech možností brzdění asynchronních motorů nejméně ekonomickým a kvůli ztrátám i nejhorším typem. Hlavním problémem je velký nárůst proudů jak ve statoru tak i v rotoru oproti proudům protékajícím za jmenovitého chodu. Podle [6] by se dal takový ztrátový proud přirovnat k proudu záběrnému, tedy až pětinasobku proudu jmenovitého. Ve vinutí hlavně rotoru pak vznikají Jouleovy ztráty, které motor zahřívají.

V případě motorů s kroužkovým rotorem je možné snížit tyto proudy vřazením přídavného odporu do obvodu rotoru. Tímto způsobem se dá docílit zkrácení doby brzdění motoru. Zároveň se však sníží i Jouleovy ztráty ve vinutí, které mají vliv na oteplení motoru (menší ztráty znamenají menší oteplení).



Překreslením pracovních stavů viz **Obrázek 2** je možné získat nový obrázek, ze kterého je pak snadnější určit konkrétní úhlovou rychlost:



**Obrázek 10:** Úhlová rychlost v pracovních stavech AM, [7]

Dosazováním příčné úhlové rychlosti a skluzu do vzorce pro velikost ztrát energie se dají podle [5] vyjádřit výsledné ztráty spojené s brzděním jako:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{A-B}^2 \cdot (s_A^2 - s_B^2) \quad (18)$$

S tím, že skluzu se dají vyjádřit jako:

$$s_A = \frac{\omega_{A-B} - \omega_1}{\omega_{A-B}} \quad (19)$$

$$s_B = \frac{\omega_{A-B} - \omega_2}{\omega_{A-B}} \quad (20)$$

Pro rozběh motoru se dá  $\omega_0$  vyjádřit v hodnotách intervalu  $(0, \omega)$  a skluz v hodnotách  $(1, 0)$ , potom dosazením do původního vzorce pro velikost ztrát energie platí:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (21)$$

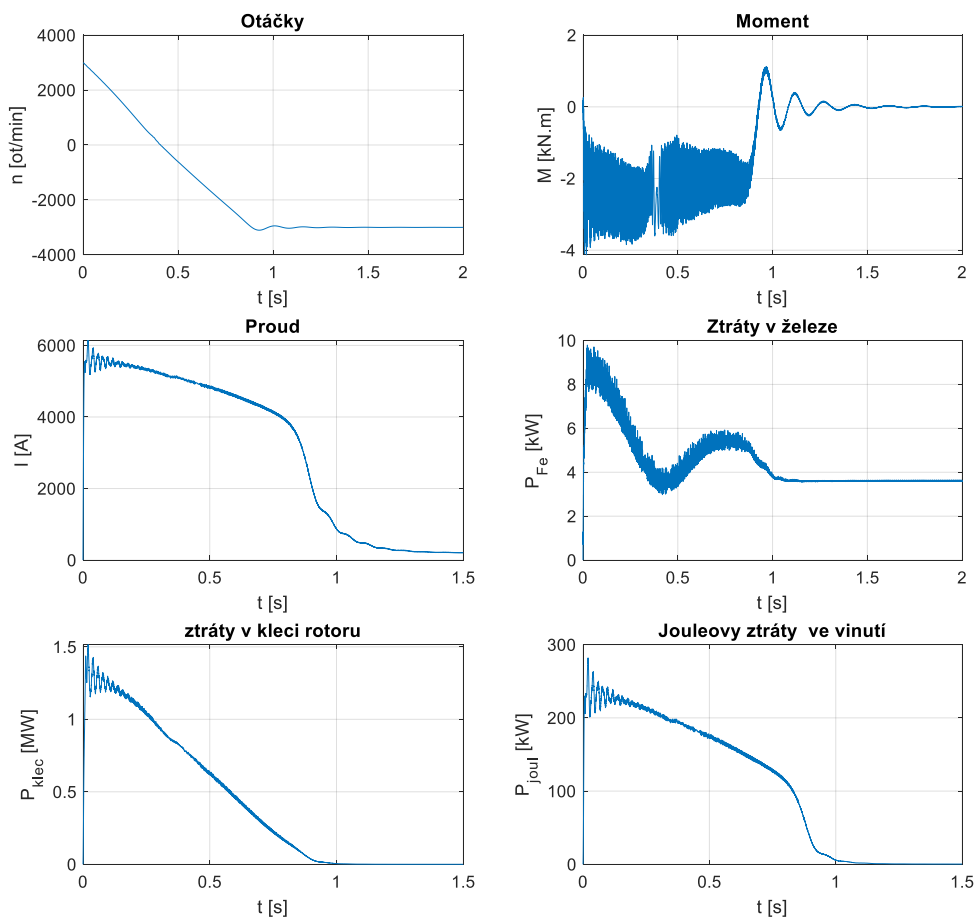
V brzděné oblasti naopak platí, že  $\omega_0 \in (-\omega, 0)$  a  $s \in (2, 1)$ , takže dosazením se dojde ke vztahu:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \cdot (2^2 - 1^2) = \frac{3}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (22)$$

Z vyjádření je jasně vidět, že ztráty v železe rotoru při brzdění protiproudem dosahují třikrát větších hodnot oproti ztrátám při rozběhu motoru. Na tyto ztráty již nemá vliv velikost rotorového odporu.

Další problém s tímto typem brzdění vychází z toho, že jakmile se stroj dostane na nulové otáčky, tak se nezastaví, ale začne se otáčet na opačnou stranu. Přepólováním se tedy motor v podstatě neutlumí, ale pouze zapojí na opačný chod. V době, kdy motor dosáhne nulových otáček, je potřeba jej odpojit od sítě.

### 4.3 Simulace brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech



**Obrázek 11:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech

**Tabulka 10:** Nejvyšší dosažené parametry při brzdění protiproudem ve jmenovitém stavu

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
M [N.m]	-4129,2	0,018
I <sub>U</sub> [A]	5603,3	0,1295
I <sub>V</sub> [A]	6137,8	0,0225
I <sub>W</sub> [A]	5810,9	0,076
P <sub>Fe</sub> [W]	9791,3	0,023
P <sub>klec</sub> [kW]	1514,8	0,0205
P <sub>Joul</sub> [kW]	281,8	0,01975

Při brzdění protiproudem dosáhne motor nulových otáček přibližně za 0,4 s, ale pak se začne točit zápornými otáčkami. Moment, který na motor působí je záporný, neboť se motor v okamžiku sepnutí začíná silou točit opačným směrem. Jedná se tedy o brzdny moment.

Z grafu otáček jde vyčíst, že motor se dostane na opačné otáčky po menším překmitu za přibližně 1,1 s, což je doba, kdy jsou ostatní veličiny opět ustálené.

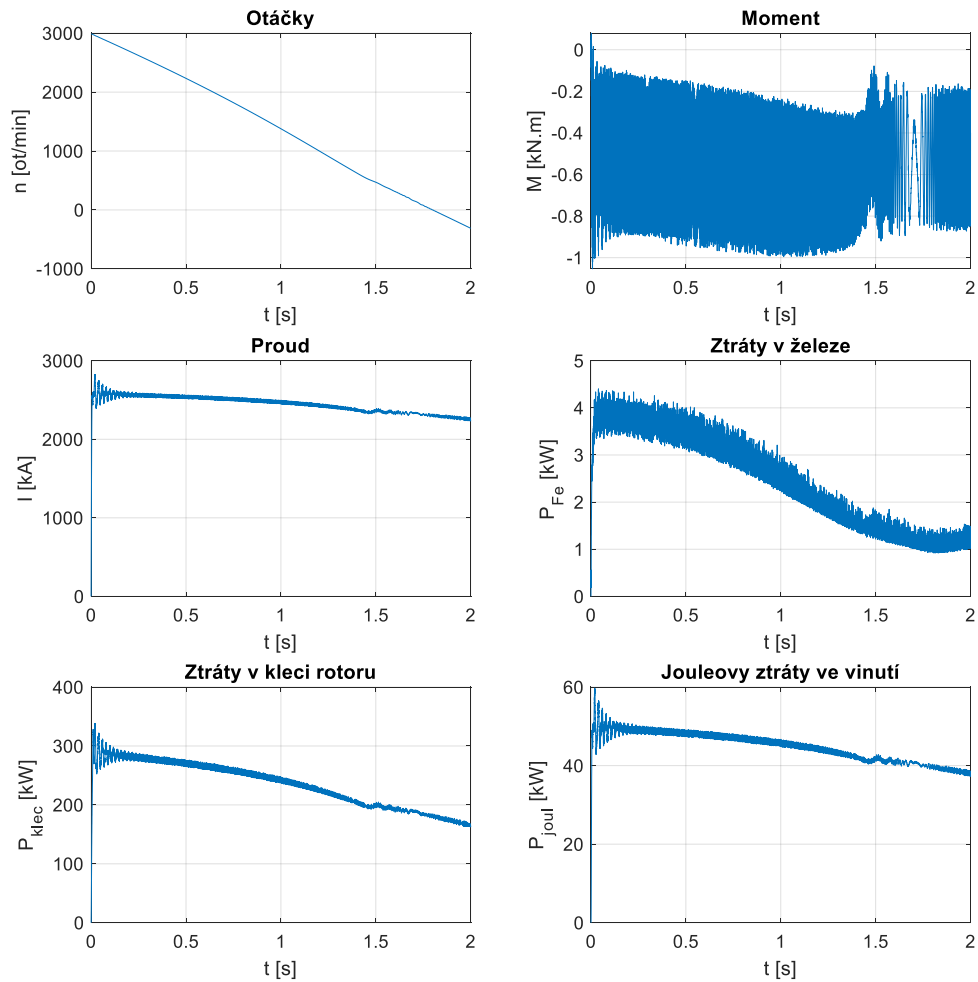
V grafu zobrazujícím moment stroje jde vidět překmit právě v čase 0,4 s, kdy stroj přechází nulové otáčky.

Zajímavý průběh má graf zobrazující ztráty v železe. Zde je vidět, že ztráty postupně padají, ale jakmile motor překoná hranici nulových otáček, tak začnou opět narůstat. Tato část křivky, kdy ztráty narůstají přesně kopíruje křivku při rozběhu motoru. Motor se tedy chová jako při běžném spouštění.

Největší problém a největší ztráty jsou spojeny s rotorovou klecí. Zde je vidět, že kdyby došlo k brzdění motoru při jmenovitých parametrech, tak by mohlo dojít ke zničení motoru, neboť na začátku děje se dostáváme na hodnotu přibližně 5x větší oproti jmenovitému výkonu stroje (tedy až do jednotek MW).

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru nedosahují tak vysokých hodnot jako ztráty v rotorové kleci, ale stejně se pohybují na vysoké úrovni.

## 4.4 Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí



**Obrázek 12:** Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí

**Tabulka 11:** Nejvyšší dosažené parametry - brzdění při polovičním napětí

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
M [N.m]	-1053,7	0,00825
$I_U$ [A]	2649,6	0,20925
$I_V$ [A]	2760,8	0,02275
$I_W$ [A]	2690,2	0,01625
$P_{Fe}$ [W]	4404,0	0,03975
$P_{klec}$ [kW]	338,4	0,0205
$P_{Joul}$ [kW]	59,7	0,02

V této části má na brzdění protiproudem velký vliv kromě momentu setrvačnosti rotoru i změna napájecího napětí. Motor je napájen střídavým polovičním napětím, což je 200 V. V porovnání s brzděním při plném napětí, kdy otáčky dosáhly na nulu za 0,4 s, se zde motor dostane na nulové otáčky až za 1,8 s. Z grafů je taky vidět, že doba 2 sekundy zdaleka nestačí na to, aby došlo k ustálení, resp. aby se motor točil otáčkami opačnými. Brzdný moment stroje je tentokrát přibližně 4x menší s odchylkou 2,1 %. Je zde opět vidět překmit v čase nulových otáček.

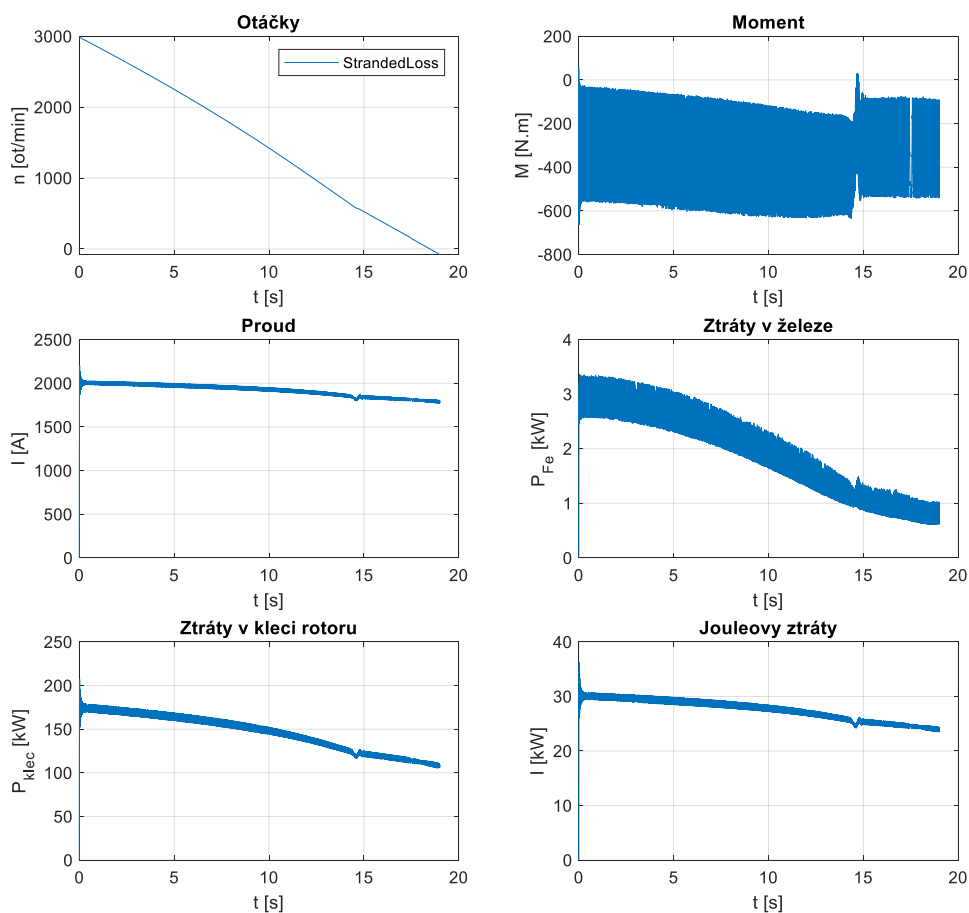
Ztráty v železe jsou taky menší a to asi o polovinu s odchylkou 2 %.

U proudu nastal podobný pokles a to přibližně 2,2x ve všech fázích.

Velký pokles zde zažily ztráty v rotorové kleci, které klesly přibližně 4,5x a Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, které klesly 4,7x. Tedy by se dalo říct, že měly podobný pokles. Změnou napájecího napětí tedy ovlivňujeme dobu ubrzdění i velikost ztrát, což může hrát v praxi důležitou roli.

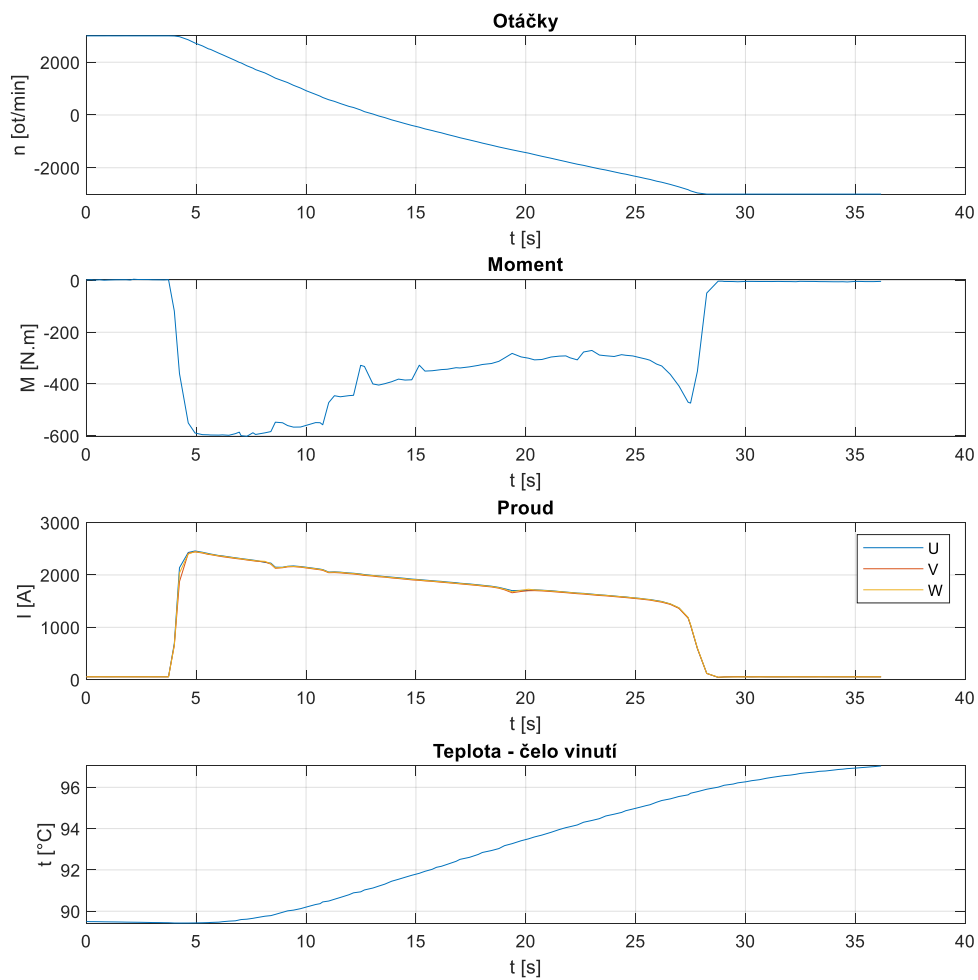
## 4.5 Ověření měřením – brzdění protiproudem při 160 V

### 4.5.1 Simulace



Obrázek 13: Simulace brzdění protiproudem při 160 V

## 4.5.2 Měření



Obrázek 14: Měření brzdění protiproudem při 160 V

**Tabulka 12:** Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 160 V

Parametr	Nejvyšší hodnota - simulace	Nejvyšší hodnota - měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-661,7	-602,2	9,0
I <sub>U</sub> [A]	2071,7	2458,4	-18,7
I <sub>V</sub> [A]	2131,5	2441,4	-14,5
I <sub>W</sub> [A]	2101,9	2443,6	-16,3
P <sub>Fe</sub> [W]	3359,8	-	
P <sub>klec</sub> [kW]	207,0	-	
P <sub>Joul</sub> [kW]	36,2	-	

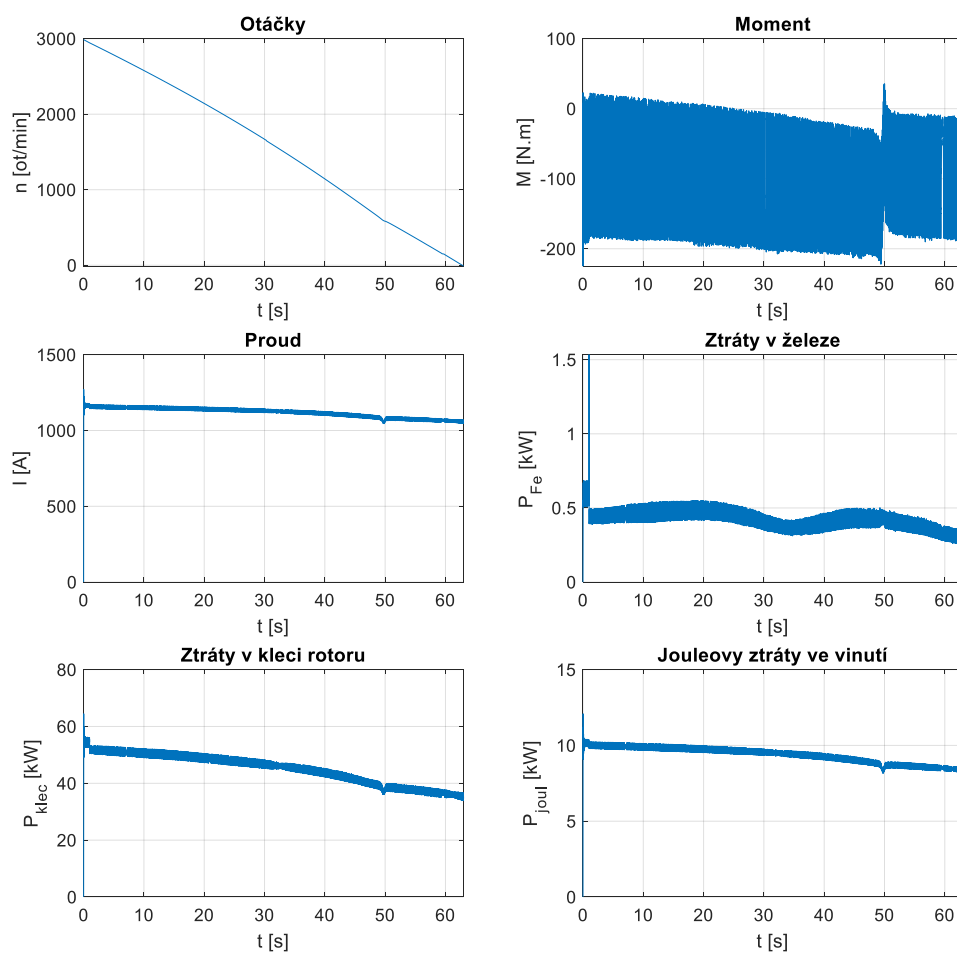
V této části práce proběhlo měření brzdění protiproudem při napájecím napětí 160 V. Porovnáním se dá zjistit, že se grafy liší v době ubrzdění motoru, tedy v čase, kdy motor dosáhne nulových otáček. Podle simulací dojde k ubrzdění za přibližně 18,5 s, zatímco podle měření nastane tento okamžik již za 9 s. Nicméně grafy naměřených hodnot zobrazují průběhy až do doby kompletního opačného chodu. **Tabulka 12** porovnává naměřené hodnoty proudů a momentu s hodnotami simulovanými. Vyšlo najevo, že simulace a měření si s malými odchylkami odpovídají. Opět je zde dokázáno, že simulace se jen přibližují skutečnému měření, neboť zde nejsou uvažovány ještě ztráty uvnitř motoru, které také zrychlují dobu ubrzdění.

Simulace dále ukazují hodnoty ztrát, které opět klesly při srovnání s hodnotami u vyššího napájecího napětí.



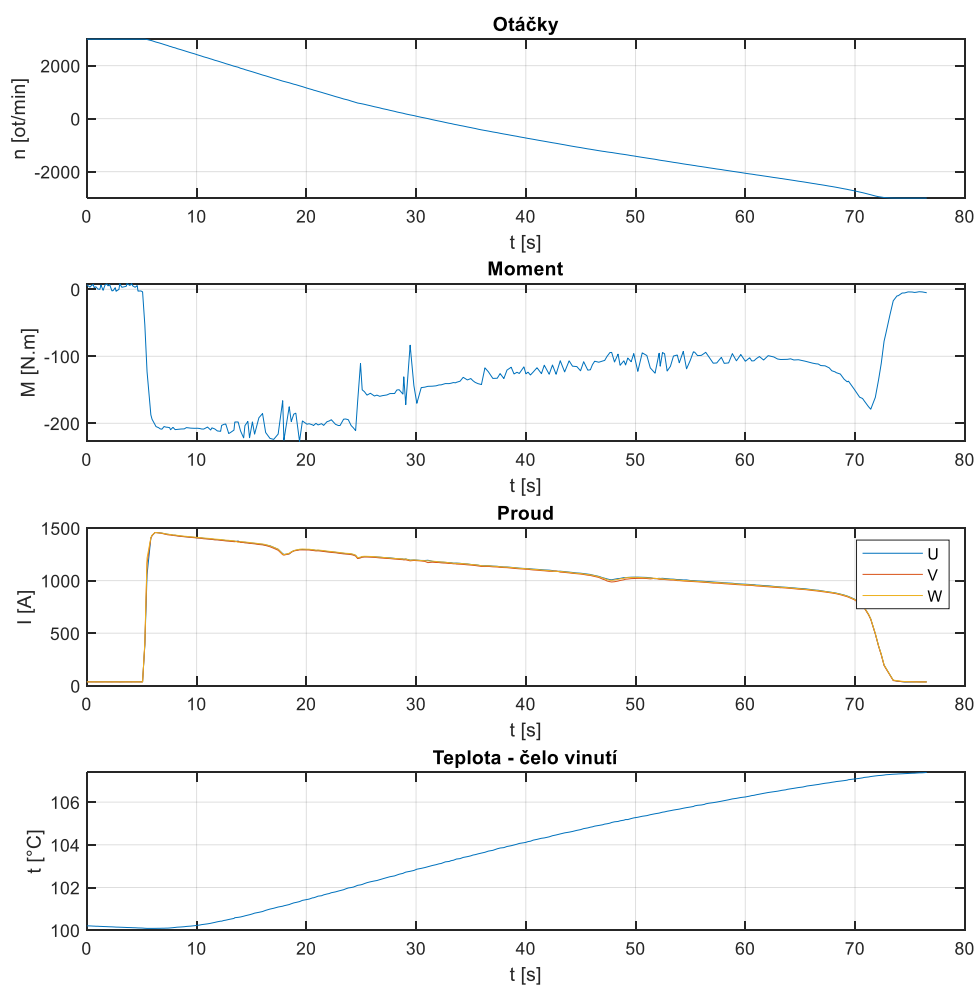
## 4.6 Ověření měřením – brzdění protiproudem při 100 V

### 4.6.1 Simulace



Obrázek 15: Simulace brzdění protiproudem při 100 V

## 4.6.2 Měření



Obrázek 16: Měření brzdění protiproudem při 100 V

**Tabulka 13:** Srovnání měření a simulací - brzdění protiproudem při 100 V

Parametr	Nejvyšší hodnota - simulace	Nejvyšší hodnota - měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-224,7	-226,9	1,0
I <sub>U</sub> [A]	1200,9	1457,3	-21,4
I <sub>V</sub> [A]	1225,0	1457,2	-19,0
I <sub>W</sub> [A]	1212,3	1457,0	-20,2
P <sub>Fe</sub> [W]	1533,5	-	
P <sub>klec</sub> [kW]	64,5	-	
P <sub>Joul</sub> [kW]	12,1	-	

**Tabulka 14:** Celkové srovnání brzdění protiproudem při různých napájecích napětí

Parametr	400 V	200 V	160 V	100 V
M [N.m]	-4129,2	-1053,7	-661,7	-224,7
I <sub>U</sub> [A]	4575,1	2163,4	2071,7	1200,9
I <sub>V</sub> [A]	4848,9	2254,2	2131,5	1225,0
I <sub>W</sub> [A]	4744,6	2196,5	2101,9	1212,3
P <sub>Fe</sub> [W]	9791,3	4404,0	3359,8	1533,5
P <sub>klec</sub> [kW]	1514,8	338,4	207,0	64,5
P <sub>Joul</sub> [kW]	281,8	59,7	36,2	12,1

Nyní došlo ke snížení napětí na 100 V. Lze si všimnout, že moment klesl přibližně 3x oproti napájení při 160 V. Podle simulací dojde k ubrzdění za asi 63 s, zatímco podle měření nastane tento okamžik za 25,5 s. Výrazně se tedy prodloužila doba brzdění, i když došlo k poměrně malému poklesu napájecího napětí.

**Tabulka 13** porovnává naměřené hodnoty proudů a momentu s hodnotami simulovanými a ukazuje, že simulace a měření si podobně jako v předchozím případě odpovídají až na malé odchylky.

Podle simulací klesly ztráty v kleci rotoru a Jouleovy ztráty ve vinutí statoru cca 3x oproti brzdění při 160 V, tedy stejně jako v případě momentu.

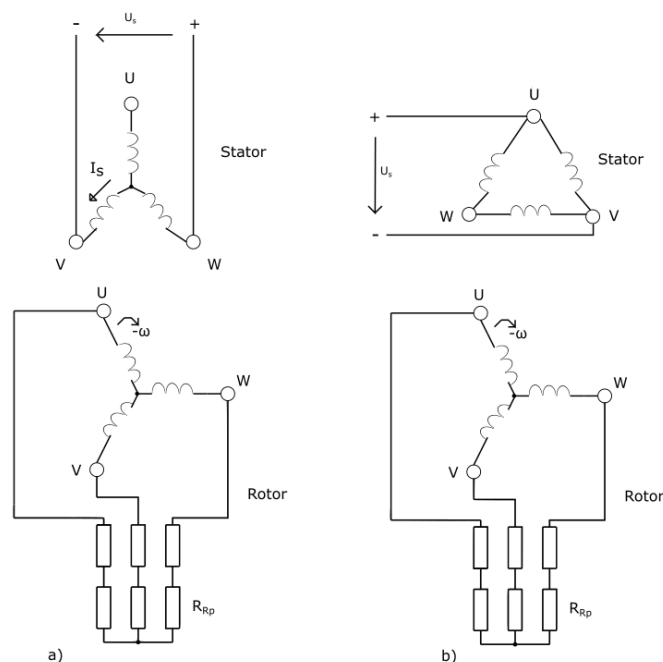
## 5. DYNAMICKÉ BRZDĚNÍ

Je to další možný způsob, jak docílit zastavení motoru. Jedná se o brzdění stejnosměrným proudem. Podle [3] se jedná o elektrický způsob brzdění motoru. [3] Dále říká, že pokud není motor schopen reverzačního chodu (typicky stroje velkých výkonů), tak se jedná o jediné možné řešení, jak ubrzdít asynchronní motor. Tento způsob brzdění se využívá i v případě motorů synchronních. Ve srovnání s brzděním protiproudem vychází dynamické brzdění jako efektivnější a méně ztrátové. Dalším hlavním rozdílem je, že zatímco u protiproudu je nutné motor odpojit od sítě, aby nepřešel na reverzační chod, tak v případě dynamického brzdění se stroj úplně utlumí.

### 5.1 Princip

Z [3] je jasné, že princip dynamického brzdění vychází z toho, že z brzděného asynchronního motoru se stane synchronní generátor, který pohání klesající kinetická energie. Tato energie vzniká brzděním setrvačných hmot stroje. V podstatě dojde ke vzniku záporného brzdného momentu.

V praxi to znamená, že se odpojí motor ze třífázové sítě, přičemž na satorové vinutí se přivede stejnosměrný proud. Vinutí uložené v rotoru je možné buď spojit přes přidavné odpory s kroužky rotoru nakrátko anebo v případě klecové kotvy napřímo bez odporů.



**Obrázek 17:** Zapojení AM pro dynamické brzdění; a) stator zapojen do hvězdy; b) stator zapojen do trojúhelníka; převzato z [3]

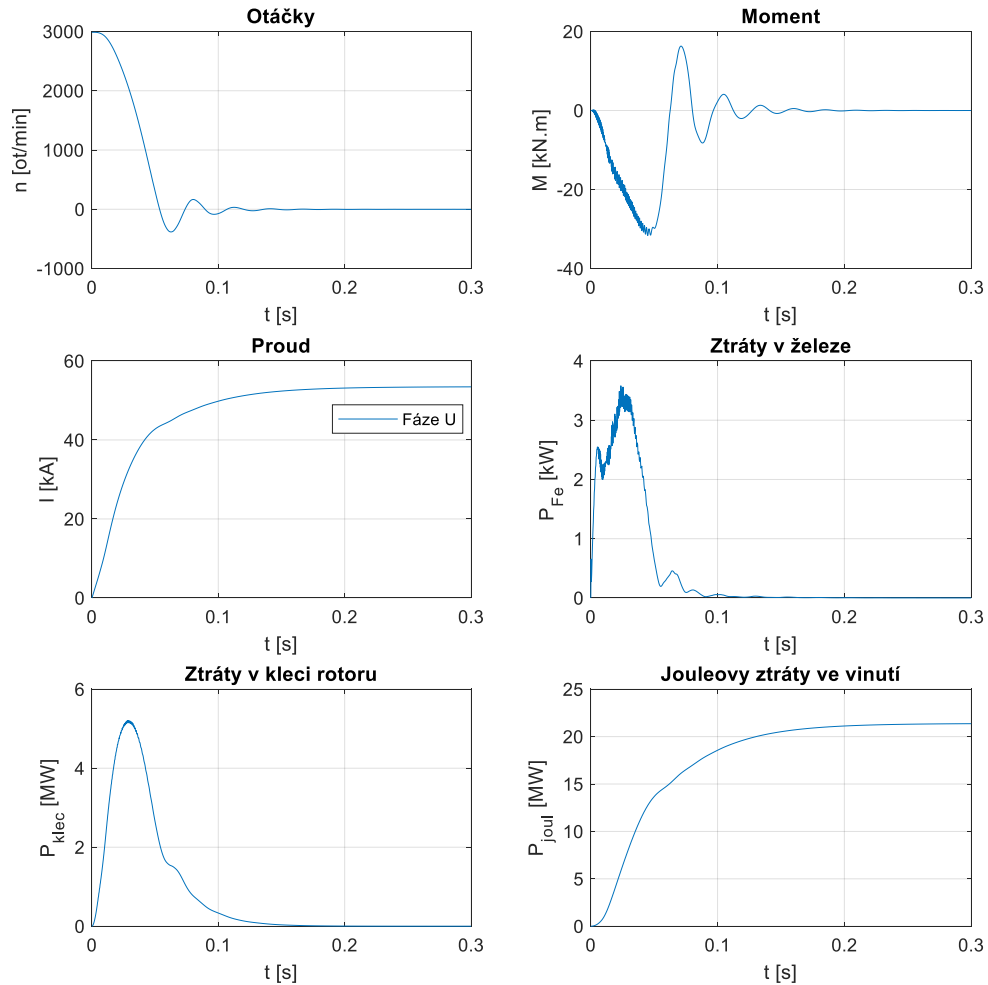
Podle způsobu zapojení statoru a rotoru se dají měnit i parametry stejnosměrného zdroje proudu a stejně tak i průběh brzdného momentu. Stejnosměrný proud vybudí ve vinutí statoru nepohyblivé magnetické pole. Toto magnetické pole ovlivňuje symetrické třífázové rotující vinutí rotoru tak, že začne indukovat střídavé proudy. Vlivem těchto proudů vznikne v rotoru i magnetomotorické napětí, které sice dosahuje stejné velikosti úhlové rychlosti jakou má rotor, ale směřované opačným směrem. Tyto úhlové rychlosti se vzájemně odečtou a tím pádem je výsledná úhlová rychlost v porovnání s vinutím statoru nulová. Díky tomu, jak na sebe magnetomotorické síly statoru i rotoru vzájemně působí vznikne elektromagnetický moment působící v opačném směru než v jakém se rotor otáčí. Vliv na brzdny moment mají v malé míře i mechanické ztráty a ztráty v železe. Důsledkem brzdění je snižování otáček rotoru až na nulu. Stejně tak frekvence rotoru se úplně utlumí. Vinutí rotoru začne být tepelně namáháno, díky naakumulované brzdné kinetické energii. V případě motorů s kroužkovým rotorem přechází toto teplo i do vřazených odporů.

S rostoucím účinkem výsledného brzdného momentu klesají otáčky stroje, ale zároveň se z proudu tekoucího statorovým vinutím stává magnetizační proud. V momentě, kdy utichnou přechodné děje a motor je zastaven, tak se ze statorového proudu již úplně stane proud magnetizační. Princip vychází z toho, že jakmile motor zpomaluje a otáčky klesají, tak dochází k nasycování magnetického obvodu. Nakonec dojde k úplnému přesycení. Toto přesycení je také ovlivněno tím, jak velký je zvolen napájecí stejnosměrný proud statoru. Obvykle se volí hodnota o něco málo větší oproti proudu jmenovitému.

Na dynamické brzdění se dá dívat jako na přechodný děj. Při tomto přechodném ději se z nasyceného stroje stává stroj přesycený. Tím pádem se mění magnetizační proud, reaktance i magnetický tok. Ve srovnání se zapínáním motoru je změna magnetického toku (stejně jako sycení motoru) při brzdění několikrát větší.

Další ovlivňování brzdění je důsledkem ztrát vznikajících kvůli zatížení motoru. To se nejvíce projeví u motorů vysokých otáček jako jsou dvoupólové nebo čtyřpólové. Díky těmto ztrátám se brzdění motoru urychlí. Stejně tak i větší hodnota momentu setrvačnosti prodlužuje dobu ubrzdění (např. připojením dynamometru).

## 5.2 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 400 \text{ V}$

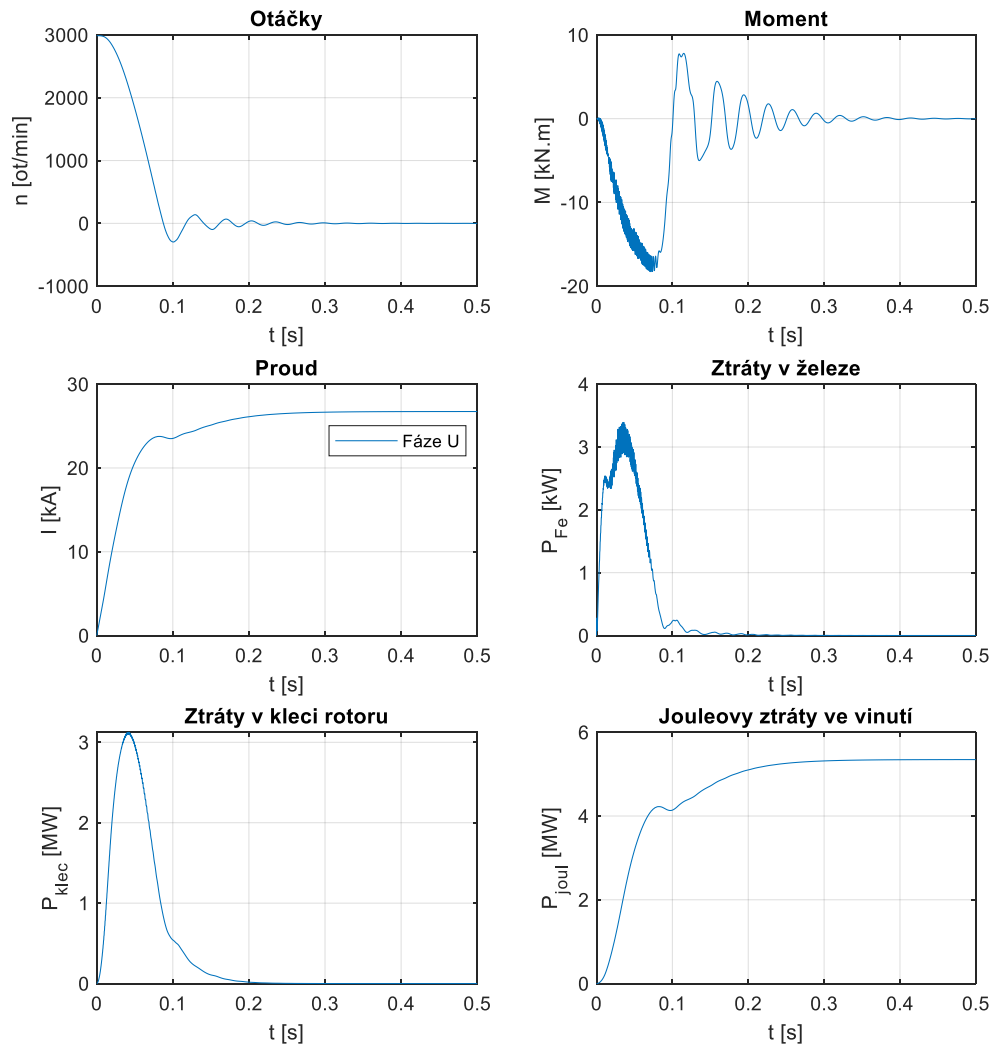


**Obrázek 18:** Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V

**Tabulka 15:** Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 400 V

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
$M$ [kN.m]	-31,6	0,045
$I_U$ [kA]	53,4	0,3
$P_{Fe}$ [kW]	3,6	0,02375
$P_{klec}$ [MW]	5,2	0,02875
$P_{Joul}$ [MW]	21,4	0,3

### 5.3 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 200 \text{ V}$

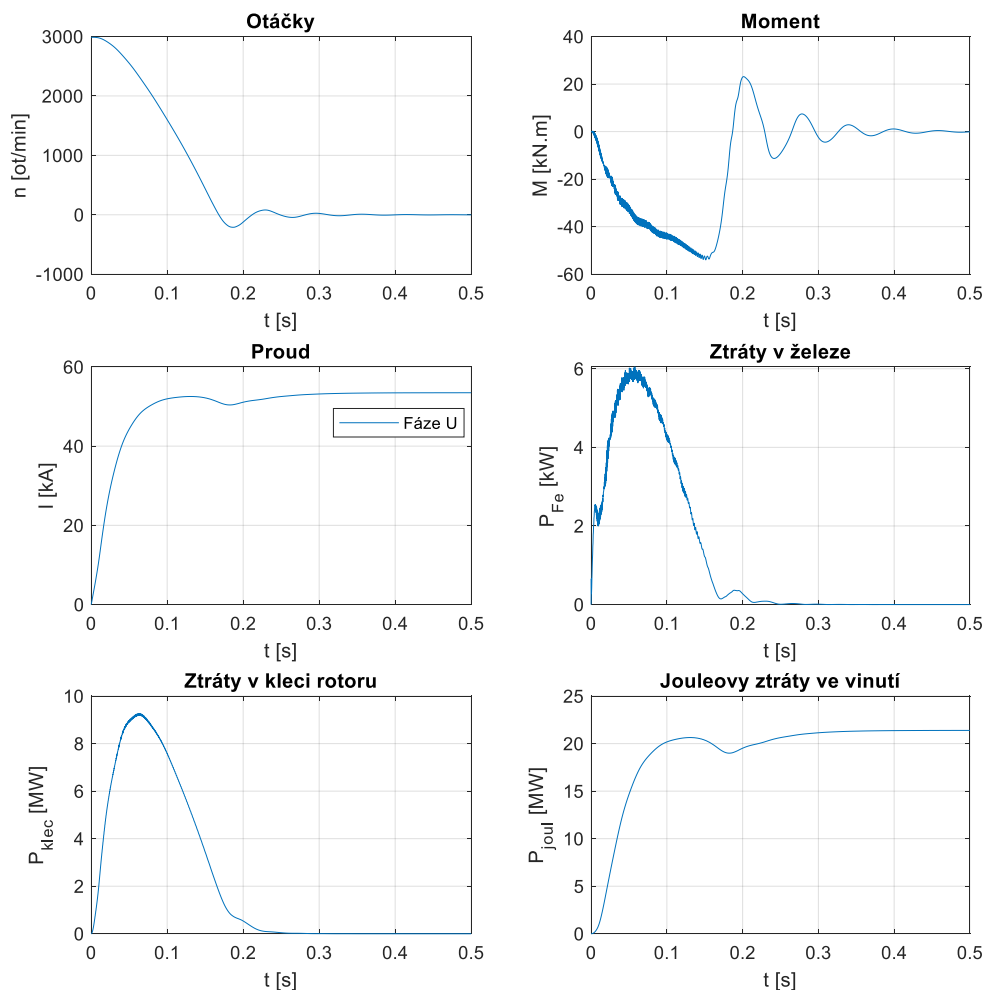


Obrázek 19: Dynamické brzdění při napájecím napětí 200 V

Tabulka 16: Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
$M$ [kN.m]	-18,3	0,07175
$I_U$ [kA]	26,7	0,5
$P_{Fe}$ [kW]	3,4	0,036
$P_{klec}$ [MW]	3,1	0,042
$P_{Joul}$ [MW]	5,3	0,5

## 5.4 Dynamické brzdění při $U_{DC} = 400 \text{ V}$ a $J_S = 19,91 \text{ kg.m}^2$



**Obrázek 20:** Dynamické brzdění při napájecím napětí 400 V a momentu setrvačnosti  $19,91 \text{ kg.m}^2$

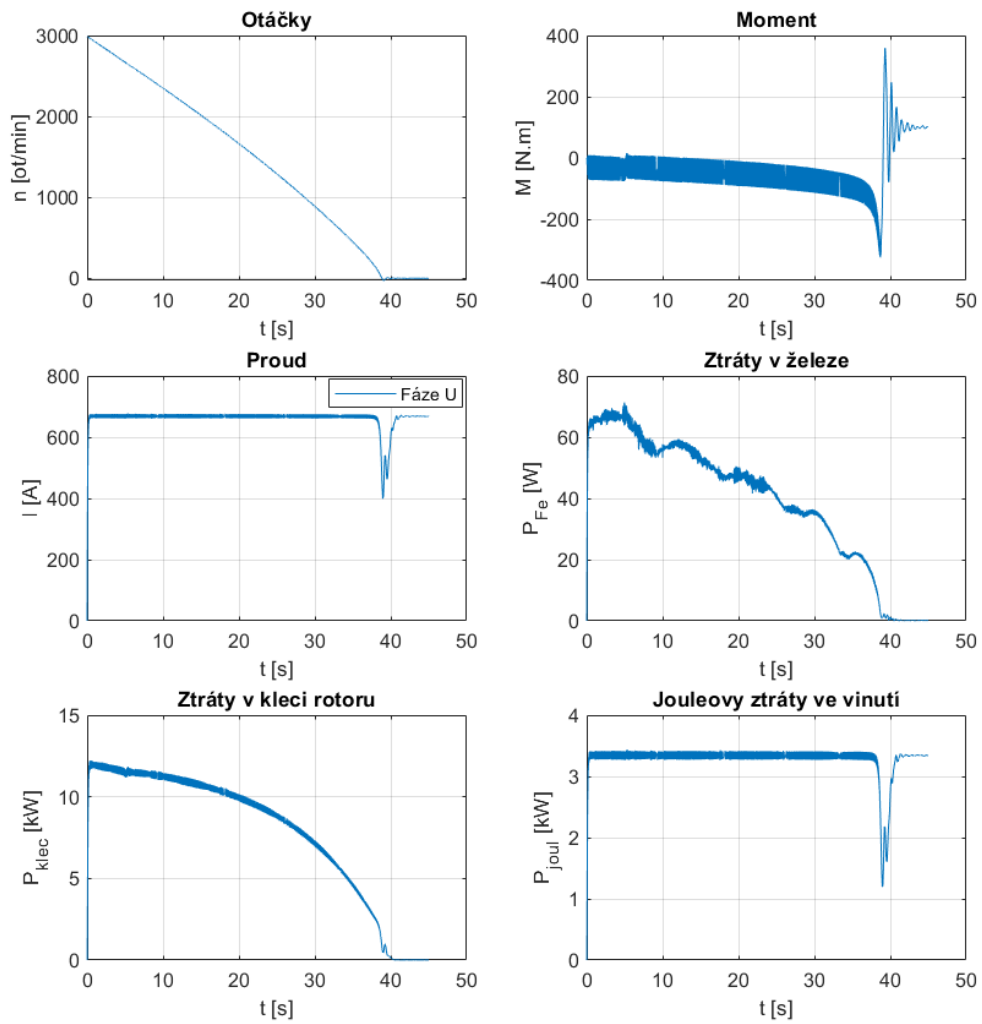
**Tabulka 17:** Nejvyšší dosažené parametry při stejnosměrném brzdění s napětím 200 V a momentu setrvačnosti  $19,91 \text{ kg.m}^2$

Parametr	Nejvyšší hodnota parametru	Čas [s]
$M$ [kN.m]	-54,0	0,15125
$I_U$ [kA]	53,5	0,5
$P_{Fe}$ [kW]	6,0	0,05775
$P_{klec}$ [MW]	9,3	0,06425
$P_{Joul}$ [MW]	21,4	0,5



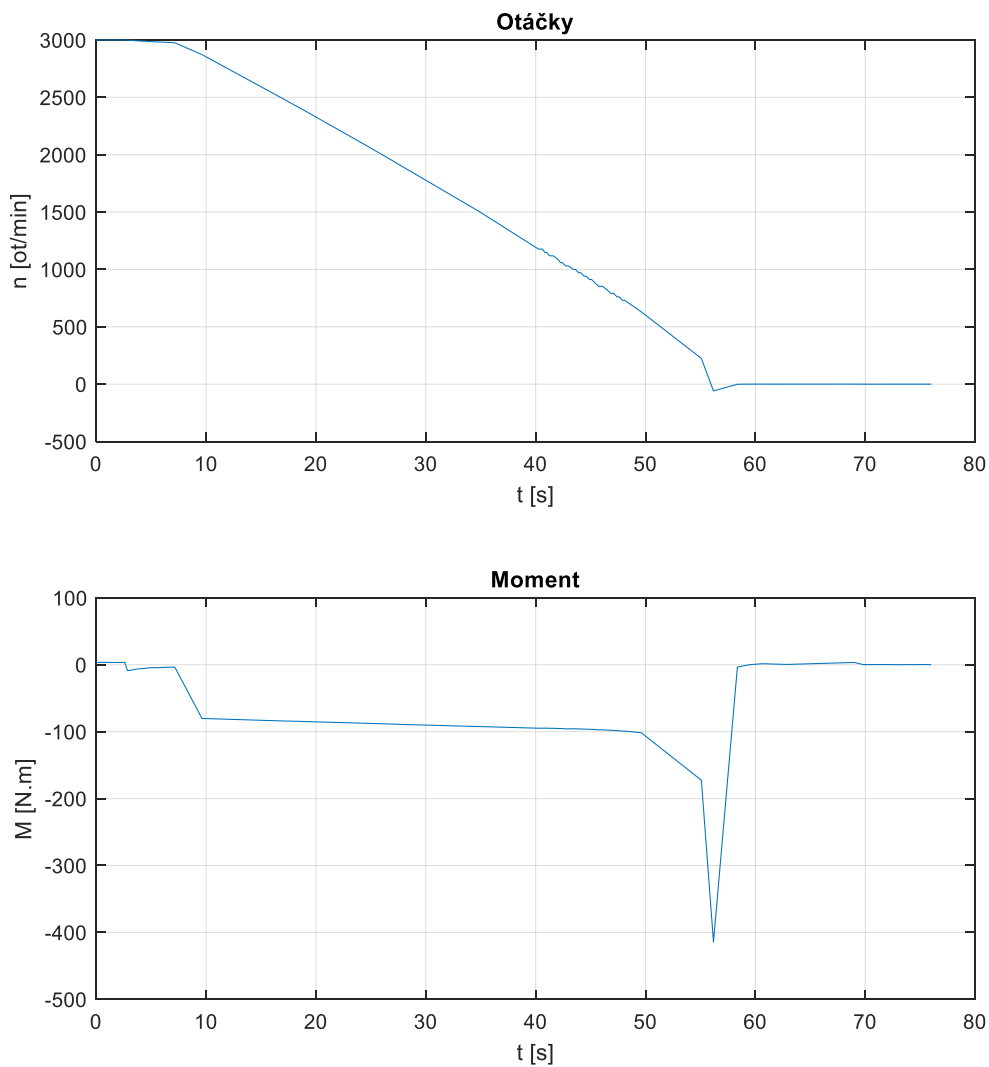
## 5.5 Ověření měřením - dynamické brzdění při 5 V

### 5.5.1 Simulace



Obrázek 21: Simulace dynamického brzdění při 5 V

### 5.5.2 Měření



Obrázek 22: Měření dynamického brzdění při 5 V

Parametr	Nejvyšší hodnota - simulace	Nejvyšší hodnota - měření	Odchylka [%]
M [N.m]	-324,6	-414,5	27,7
$I_U$ [A]	677,5	825,0	-21,8
$P_{Fe}$ [W]	71,3	-	
$P_{klec}$ [kW]	12,2	-	
$P_{Joul}$ [kW]	3,4	-	

**Tabulka 18:** Celkové srovnání stejnosměrného brzdění při různých vstupních parametrech

Parametr	400 V	200 V	400 V; 19,91 kg.m <sup>2</sup>	5 V; 19,91 kg.m <sup>2</sup>
M [kN.m]	-31,6	-18,3	-54,0	-0,3246
I <sub>U</sub> [kA]	53,4	26,7	53,5	0,6775
P <sub>Fe</sub> [kW]	3,6	3,4	6,0	0,0713
P <sub>klec</sub> [MW]	5,2	3,1	9,3	0,0122
P <sub>Joul</sub> [MW]	21,4	5,3	21,4	0,0034

Jako další proběhly simulace brzdění stejnosměrným proudem, i když simulování probíhalo při napájení ze zdroje napětí. Nejdříve byly provedeny simulace při napájecím napětí 400 V. Motor se v tomto případě zabrzdí ani ne za 0,2 s. Nicméně toto napětí je nepřiměřeně velké, což dokazuje **Obrázek 18**. Proudový graf vyobrazuje pouze fázi U, protože zbylé dvě fáze jsou zkratovány. Proud v tomto případě naroste až na nereálnou hodnotu 53,4 kA. Ztráty v železe zůstávají nízké, ale dochází k velkému nárůstu ztrát v rotorové kleci a také Jouleových ztrát ve vinutí statoru, které jsou zde vyšší na rozdíl od brzdění protiproudem, kdy tomu bylo přesně naopak. Čísla se pohybují již v desítkách MW.

Zajímavé je porovnání grafu proudu a grafu Jouleových ztrát ve vinutí statoru. Zde je vidět, že křivky se kopírují. Je tedy dokázáno, že Jouleovy ztráty jsou závislé hlavně na proudu. Tyto dva parametry také zatěžují motor i v době, kdy jsou ostatní veličiny již utlumeny spolu s otáčkami motoru.

Následovaly simulace dynamického brzdění při polovičním stejnosměrném napětí oproti minulému případu, tedy  $U_{DC} = 200$  V. Je vidět, že zmenšením napájecího napětí o polovinu se brzdňý děj prodlouží přímo úměrně také o polovinu. Proud klesl na 26,7 kA, což je přesně polovina z původní hodnoty. Jouleovy ztráty klesly přibližně 4x. Naopak ztráty v železe se téměř nezměnily, takže napájecí napětí v tomto případě nehraje až takovou roli.

Změna nastává také v případě, kdy se začne uvažovat moment setrvačnosti připojeného dynamometru, což představuje **Obrázek 20**. Napájecí napětí je zde ponecháno 400 V. Ve srovnání s napájením 400 V došlo k výraznému nárůstu brzdňého momentu. Proud se prakticky nezměnil. Ovlivněny jsou ale ztráty v železe. Ztráty v rotorové kleci také narostly.

Měření probíhalo na rozdíl od simulací při napájení ze zdroje stejnosměrného proudu. Tento proud dosahoval hodnoty asi 825 A. S ohledem na předchozí simulace byly zvoleny takové parametry, aby nedošlo k poškození stroje, nicméně to vedlo k velkému prodloužení doby ubrzdění stroje, které trvalo přibližně 52 s. Napájecímu proudu 825 A odpovídá cca 5 V.

## 6. BRZDĚNÍ V REŽIMU GENERÁTOR

Z [6] vyplývá, že stroj, který pracuje jako generátor dosahuje větších otáček než jsou otáčky synchronní. Takových otáček stroj dosáhne díky jinému připojenému poháněcímu stroji. **Obrázek 10** ukazuje, že chod v tomto režimu znamená zápornou hodnotu skluzu. V podstatě má stroj v režimu jako motor i generátor stejný skluz i proud, jediný rozdíl je ve znaménku.

Využívá se jako rekuperační brzdění, kdy generátor vrací do sítě činný výkon, zatímco jalový výkon, díky kterému dochází k magnetizaci stroje, je odebírán.

Tento generátor může být provozován i v ostrovním provozu. V tomto případě se generátor nemagnetizuje ze sítěového výkonu, ale bere si jalový výkon z kondenzátorů.

Podle [5] se tento režim využívá u zdvínání zátěže (jeřáby při spouštění zátěže dolů). Generátorické brzdění nepatří mezi často používané typy brzdění i přesto, že se jedná o jednoduchý způsob.

Asynchronní generátory nacházejí největší využití v menších elektrárnách (větrné, vodní).

Z [7] je jasné, že takto brzděný stroj se nedá nikdy úplně utlumit.

## 7. ZÁVĚR

Brzdění motoru je přechodný dynamický děj, kdy dochází k velkému proudovému nárůstu, což má za následek i velké ztráty ve vinutí.

Simulace hrají důležitou roli například při návrhu elektrických strojů, neboť se pomocí nich dá přibližně zobrazit, jak bude stroj pracovat. Ale vždy se jedná jen o přiblížení k reálné situaci. Nikdy se nedají napodobit podmínky, při kterých probíhá měření v praxi. Můžou zde hrát roli ještě mechanické ztráty (ztráty třením, ztráty v ložiskách) a jiné.

Jako další proběhla simulace rozběhu motoru. Ten trvá podle simulací asi 0,5 s, přičemž před ustálením na dané hodnotě dojde ještě k malému překmitu. Tento překmit je způsoben setrvačností točícího se rotoru.

Brzdění protiproudem má tu nevýhodu, že pokud se motor po dosažení nulových otáček neodpojí od zdroje napětí, začne se točit na druhou stranu. To ukazuje **Obrázek 11**. Při brzdění protiproudem dochází k vysokému nárůstu Jouleových ztrát ve vinutí statoru a ještě vyššímu nárůstu ztrát v rotorové kleci.

Dále probíhala simulace dynamického brzdění. Tento typ brzdění pracuje jiným způsobem než brzdění protiproudem. V obou případech sice vzniká záporný moment, který motor brzdí, avšak v případě dynamického brzdění dojde k úplnému zastavení motoru, což je výhoda, protože není nutné stroj v nulových otáčkách odpojovat ze sítě. V případě napájení 400 V a 200 V byl stroj zatěžován pouze momentem setrvačnosti rotoru, takže brzdny děj trval jen krátkou dobu. Ale došlo zde k obrovskému proudovému nárůstu doprovázenému vysokými ztrátami. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru jsou zde vyšší než ztráty v kleci rotoru. Ztráty v železe se příliš nemění ale jen do doby, než se zvýší moment setrvačnosti o hodnotu dynamometru  $J = 16,71 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Podobně jako změna napájecího napětí tak i změna momentu setrvačnosti ovlivňuje výsledné dynamické charakteristiky. Doba brzdění se opět prodloužila. Moment stroje prudce narostl.

Zajímavé je také porovnání ztrát. U brzdění protiproudem byly ztráty v kleci rotoru značně vyšší než Jouleovy ztráty ve vinutí statoru. Ale u dynamického brzdění naopak Jouleovy ztráty ve vinutí statoru dosahovaly vyšších hodnot než ztráty v rotorové kleci. Protože změna momentu setrvačnosti u dynamického brzdění nemá vliv na výsledný proud, proto nemůže mít vliv ani na Jouleovy ztráty, které vychází z procházejícího proudu.

Při srovnávání měřených průběhů a simulovaných bylo potřeba dbát na správné porovnávání proudů. V případě měření se jednalo o sdružené hodnoty proudů, protože motor je zapojen do trojúhelníku. V případě simulování brzdění stejnosměrným proudem při 5 V je zde ještě uvažován brzdny moment vytvářený dynamometrem, který urychluje dobu ubrzdění.

## LITERATURA

- [1] Ansys: Ansys Maxwell. Ansys [online]. 2021, 2021 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [2] BÁRTA, JAN, 2012. *Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru: Simulace a optimalizace elektrických strojů*. Brno, 55 s. Dostupné také z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=57269](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57269). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.
- [3] BENDL, Jiří a Josef PELIŠ. *Elektrodynamické brzdění asynchronních strojů*. Praha: Academia, 1990. Studie ČSAV. ISBN 80-200-0185-9.
- [4] HOMOLA, Ladislav. *Elektrické stroje na střídavý proud: příručka pro techniky a studující průmyslových škol*. 4. dopl. vyd. V Praze: I.L. Kober, 1947.
- [5] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-x.
- [6] KOBRLE, Pavel a Pavel KOBRLE. *Elektrické stroje: studijní text pro prezenční a kombinované studium*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta strojního inženýrství, 2017. ISBN 978-80-7561-079-9.
- [7] *Elektrické stroje* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2021, 114 s. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: [https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/325968/mod\\_resource/content/2/skripta\\_BESB.pdf](https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/325968/mod_resource/content/2/skripta_BESB.pdf)
- [8] Siemens, s. r. o., *odštěpný závod Elektromotory Frenštát* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/spice/pcplus/app/>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

AM	Asynchronní motor
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

## Symboly:

$\cos\varphi$	Účinnost	(-)
$f_1$	Frekvence statorového proudu	(Hz)
$I$	Proud	(A)
$I'_2$	Proud rotoru přepočtený na počet závitů stator. vinutí	(A)
$I_0$	Proud tekoucí příčnými parametry náhradního schématu	(A)
$I_1$	Proud jedné fáze statoru	(A)
$I_2$	Proud rotorem	(A)
$I_{Fe}$	Proud, který kryje ztráty v železe	(A)
$I_m$	Magnetizační proud	(A)
$I_s$	Stejnoseměrný proud	(A)
$J$	Moment setrvačnosti	(kg.m <sup>2</sup> )
$J_s$	Celkový moment setrvačnosti	(kg.m <sup>2</sup> )
$M$	Moment	(N.m)
$m_1$	Počet fází	(-)
$M_{max}$	Maximální moment stroje	(N.m)
$M_{mech}$	Mechanický moment stroje	(N.m)
$M_n$	Jmenovitý moment	(N.m)
$M_z$	Záběrný moment	(N.m)
$n$	Otáčky	(ot/min)
$n_1$	Otáčky magn. pole statoru	(ot/min)
$p$	Počet pólových dvojic	(-)
$P_1$	Příkon	(W)
$P_2$	Výkon na hřídeli	(W)
$P_{el}$	Elektrický výkon na činných odporech	(W)
$P_{Fe}$	Ztráty v železe	(W)
$P_{joul}$	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	(W)
$P_{klec}$	Ztráty v kleci rotoru	(W)
$P_{mech}$	Mechanický výkon	(W)
$P_n$	Jmenovitý výkon	(W)
$P_\delta$	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru	(W)

$R'_2$	Odpor vinutí rotoru	( $\Omega$ )
$R_1$	Odpor jedné fáze statoru	( $\Omega$ )
$R_{Fe}$	Odpor, který reprezentuje ztráty v železe	( $\Omega$ )
$R_{Rp}$	Přídavný rotorový odpor	( $\Omega$ )
$s$	Skluz	(%)
$s_A$	Skluz na začátku stavu	(-)
$s_B$	Skluz na konci stavu	(-)
$s_{max}$	Maximální skluz	(%)
$s_n$	Jmenovitý skluz	(%)
$t$	Čas	(s)
$U, V, W$	Fáze	(-)
$U'_{i20}$	Indukované napětí v rotoru při zastaveném rotoru	(V)
$U_1$	Napětí jedné fáze statoru	(V)
$U_{DC}$	Stejnoseměrné napětí	(V)
$U_{i1}$	Indukované napětí statorového vinutí	(V)
$U_s$	Stejnoseměrné napětí	(V)
$X'_{R20}$	Rozptylová reaktance rotor. vinutí při zastaveném rotoru	( $\Omega$ )
$X_m$	Magnetizační reaktance	( $\Omega$ )
$X_{R1}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí	( $\Omega$ )
$\Delta P_{mech}$	Mechanické ztráty ve stroji	(W)
$\Delta E$	Energetické ztráty	(J)
$\Delta P_{Cu1}$	Ztráty ve vinutí statoru	(W)
$\Delta P_{Cu2}$	Ztráty ve vinutí rotoru	(W)
$\Delta P_d$	Dodatečné ztráty	(W)
$\Delta P_{Fe1}$	Ztráty v železe statoru	(W)
$\Delta P_{Fe2}$	Ztráty v železe rotoru	(W)
$\pi$	Pí	(-)
$\omega$	Úhlová rychlost rotoru	(rad/s)
$\omega_1$	Úhlová rychlost magn. pole statoru	(rad/s)
$\omega_2$	Úhlová rychlost magnetického pole rotoru	(rad/s)
$\omega_{A-B}$	Úhlová rychlost pro daný stav	(-)
$\frac{R'_2}{s}(1-s)$	Elektrický výkon, který se přemění v mechanický výkon	(-)
$\frac{M_n}{M_{max}}$	Momentová přetížitelnost	(-)

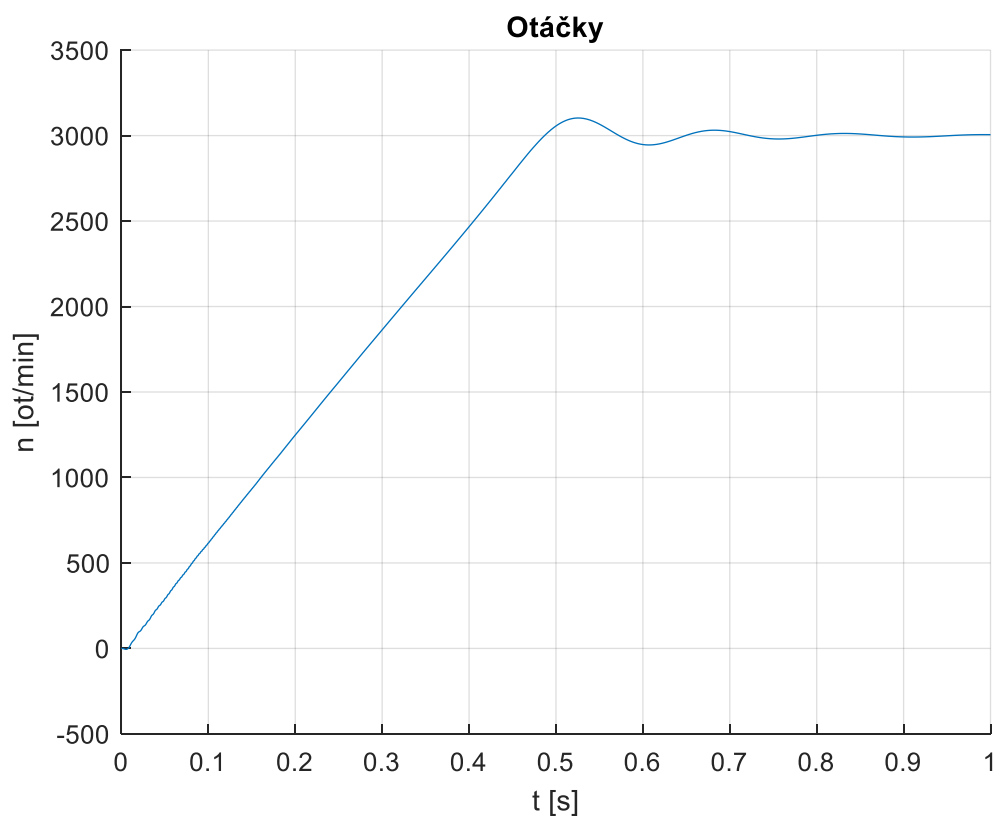


# SEZNAM PŘÍLOH

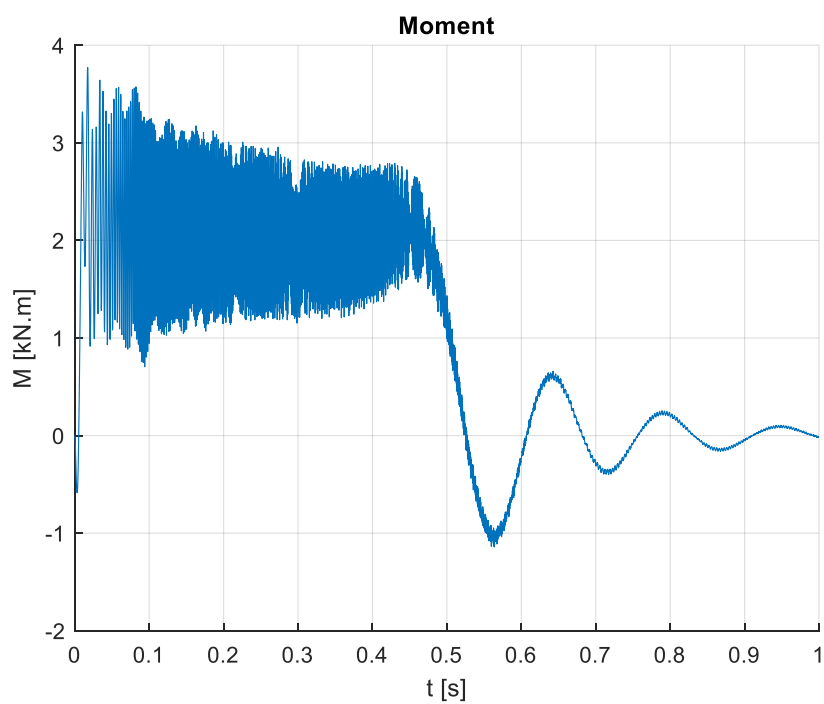
PŘÍLOHA A - GRAFY .....	50
PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	86

# Příloha A - Grafy

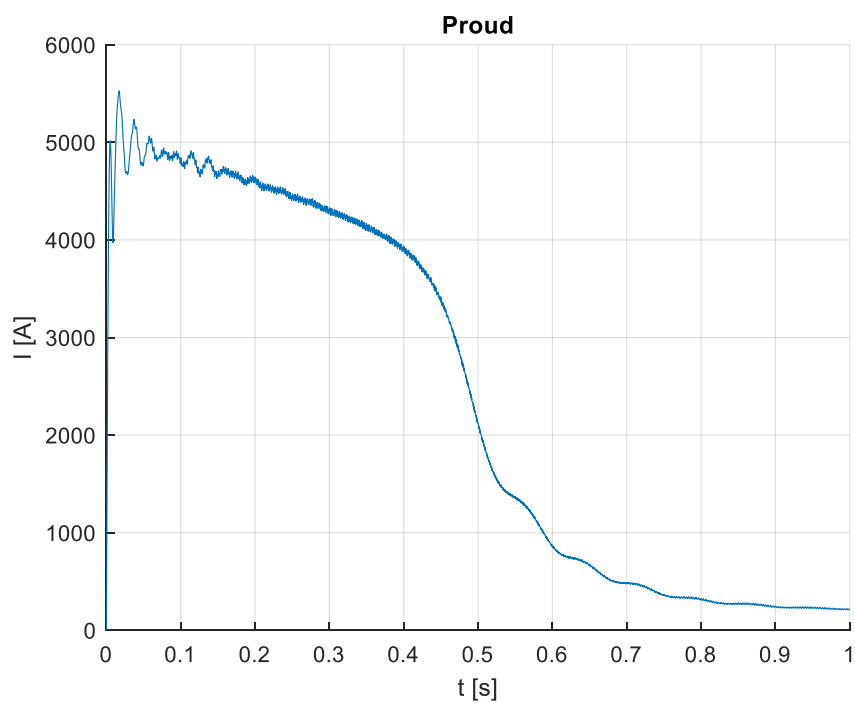
## A.1 Rozběh motoru



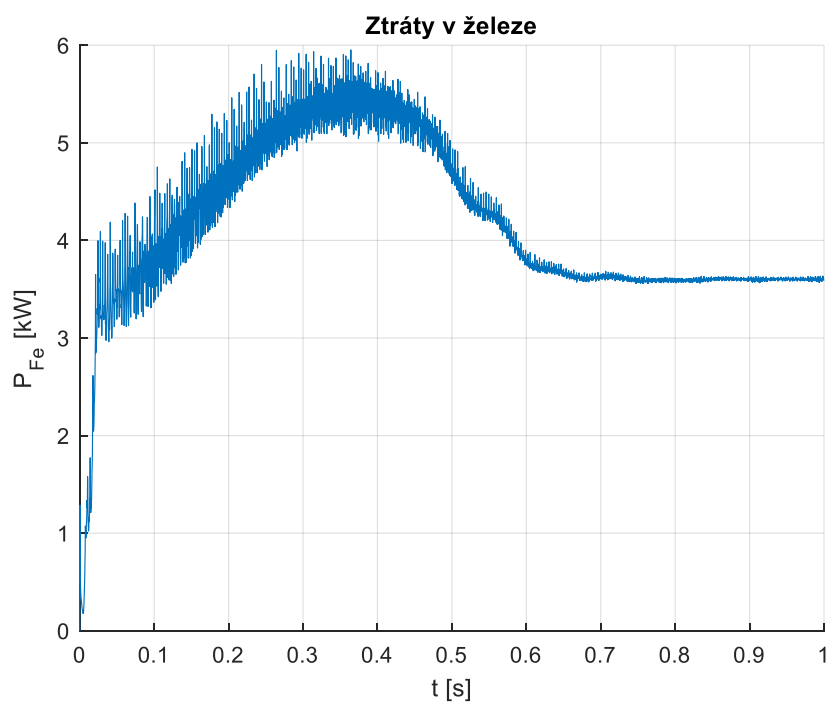
**Obrázek 23:** Rozběh - otáčky



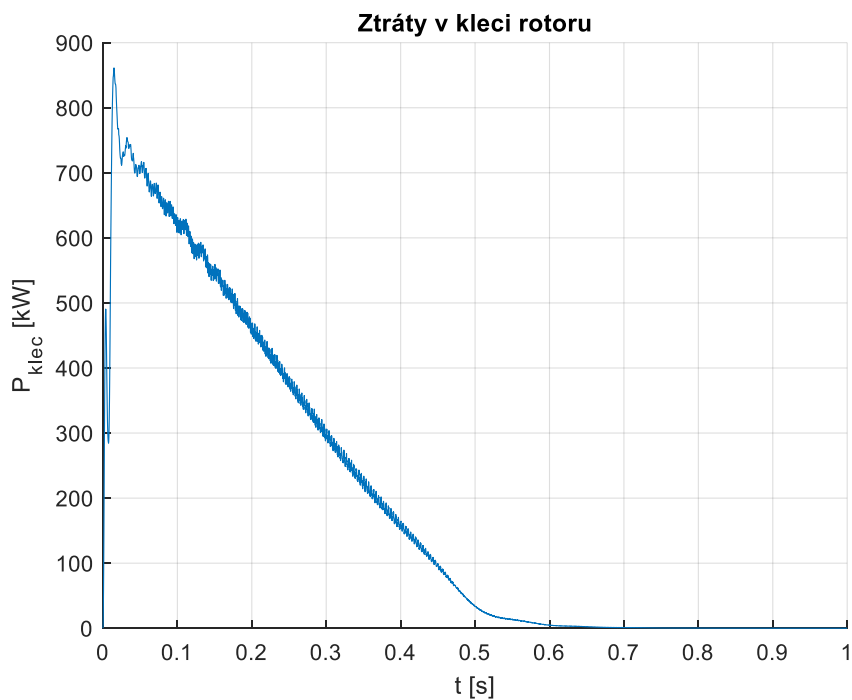
**Obrázek 24:** Rozběh - moment



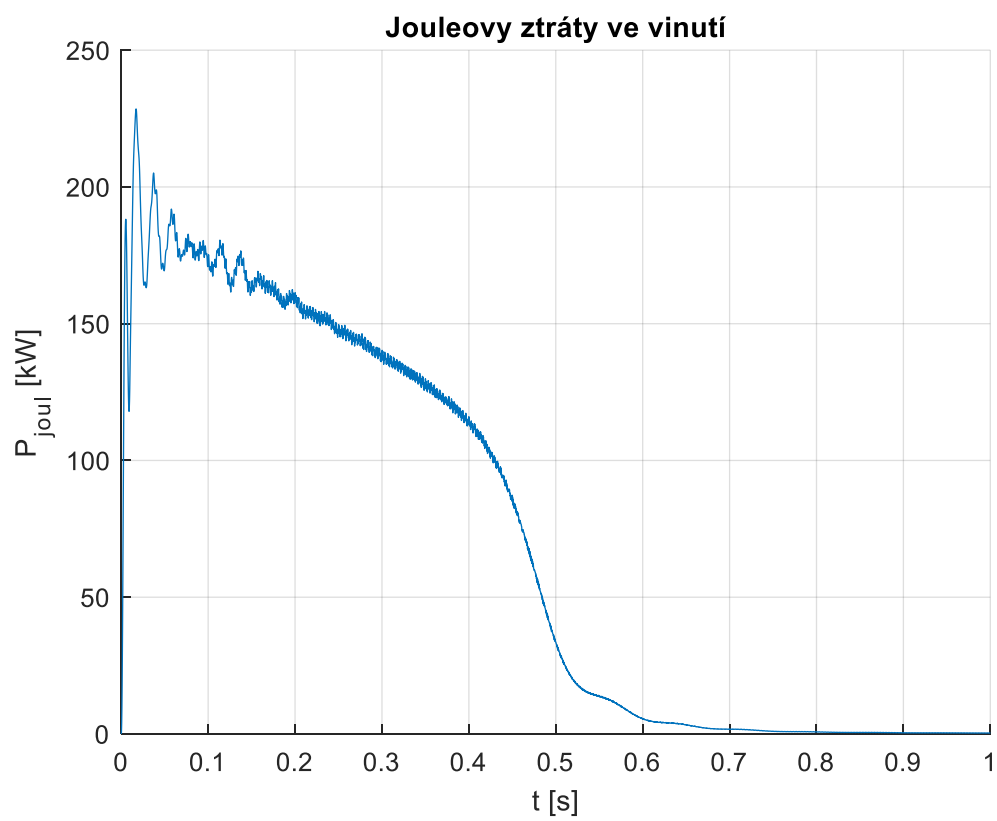
**Obrázek 25:** Rozběh - proud



**Obrázek 26:** Rozběh – ztráty v železe

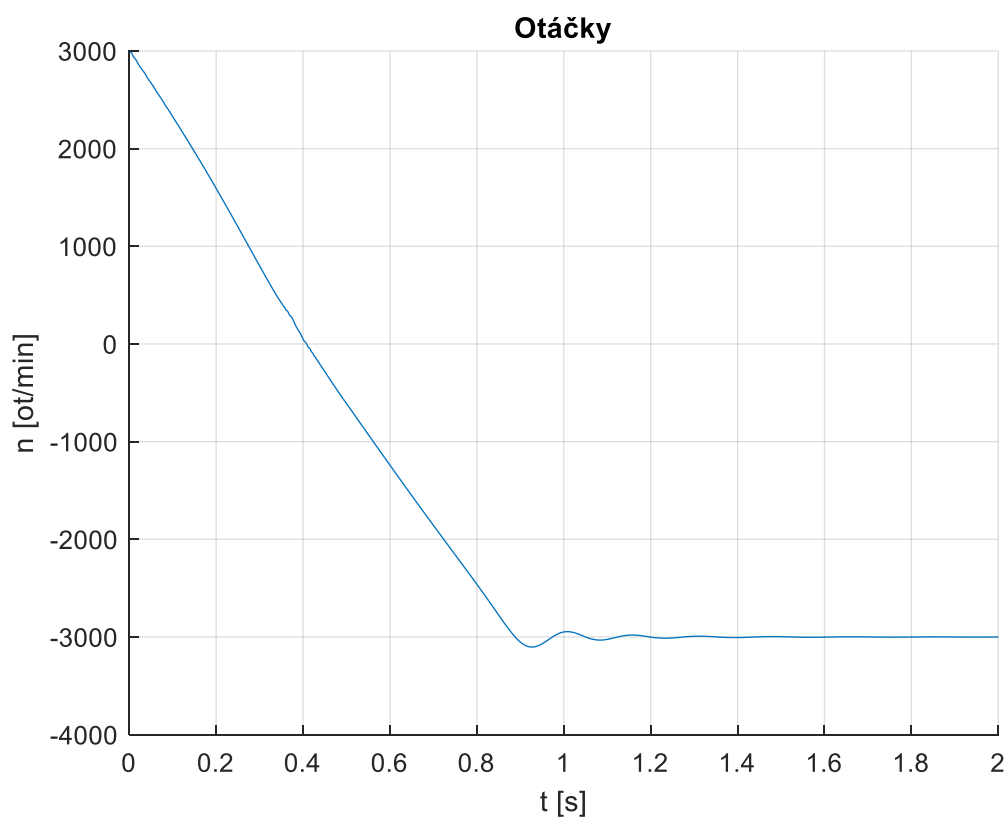


**Obrázek 27:** Rozběh – ztráty v kleci rotoru

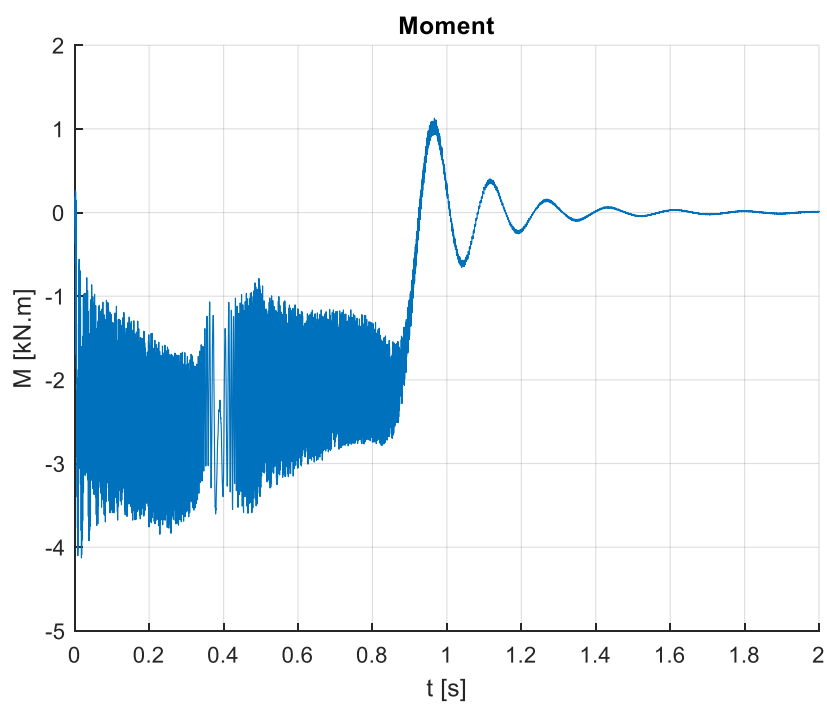


**Obrázek 28:** Rozběh – Jouleovy ztráty

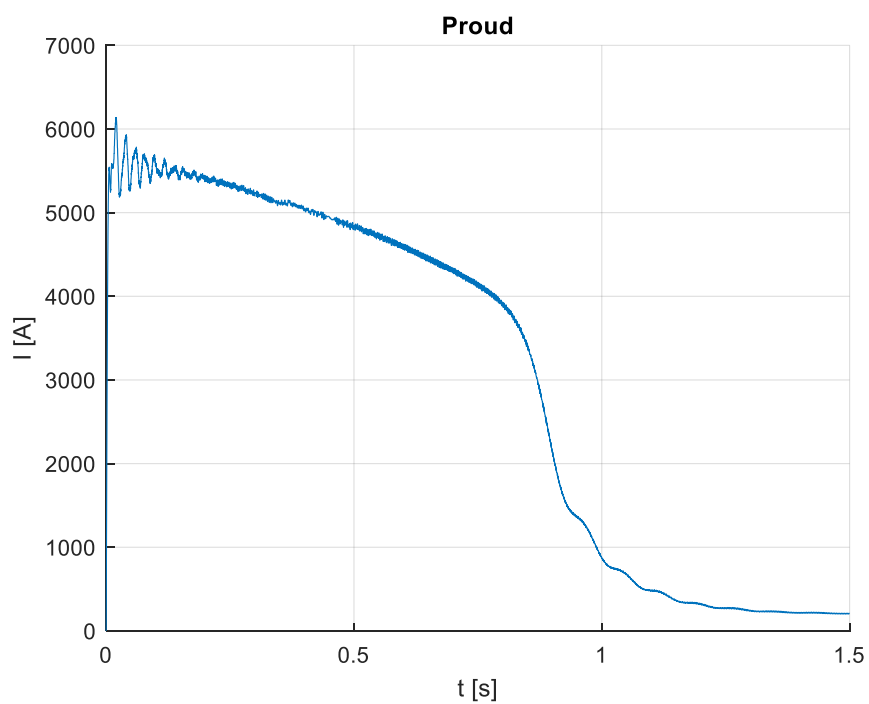
## A.2 Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech



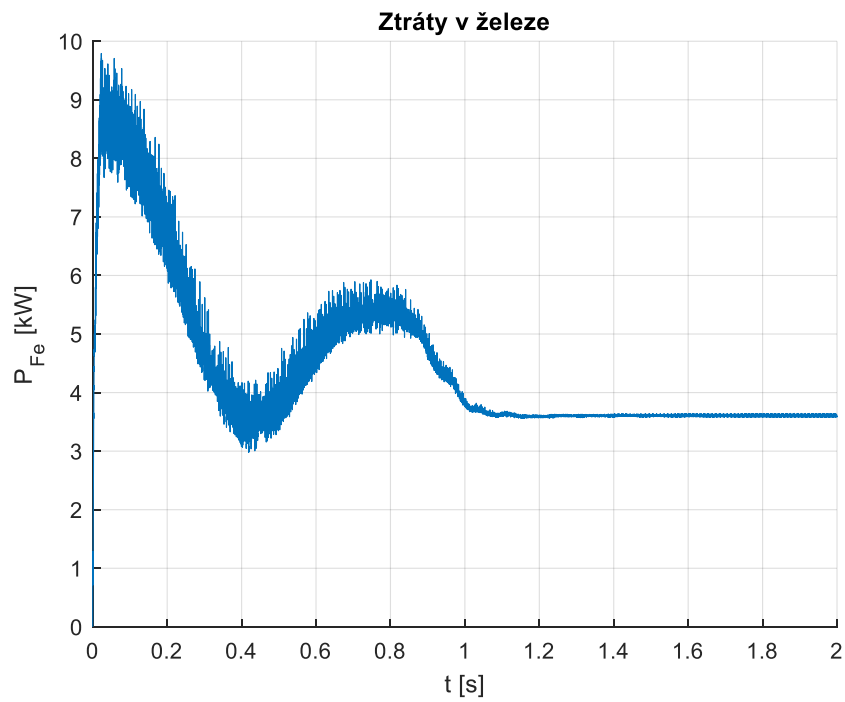
**Obrázek 29:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech -



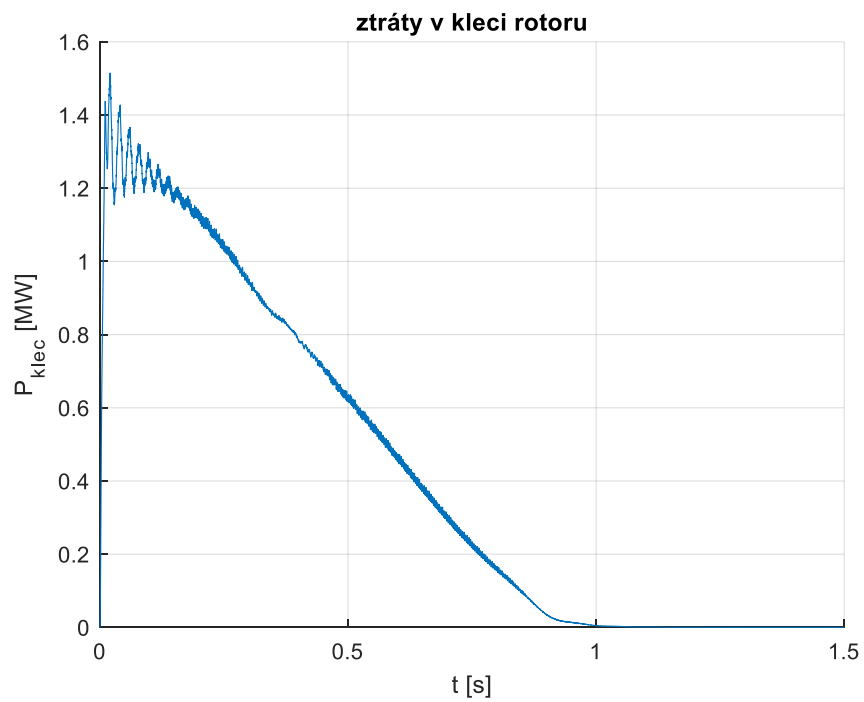
**Obrázek 30:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech - moment



**Obrázek 31:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech - proud

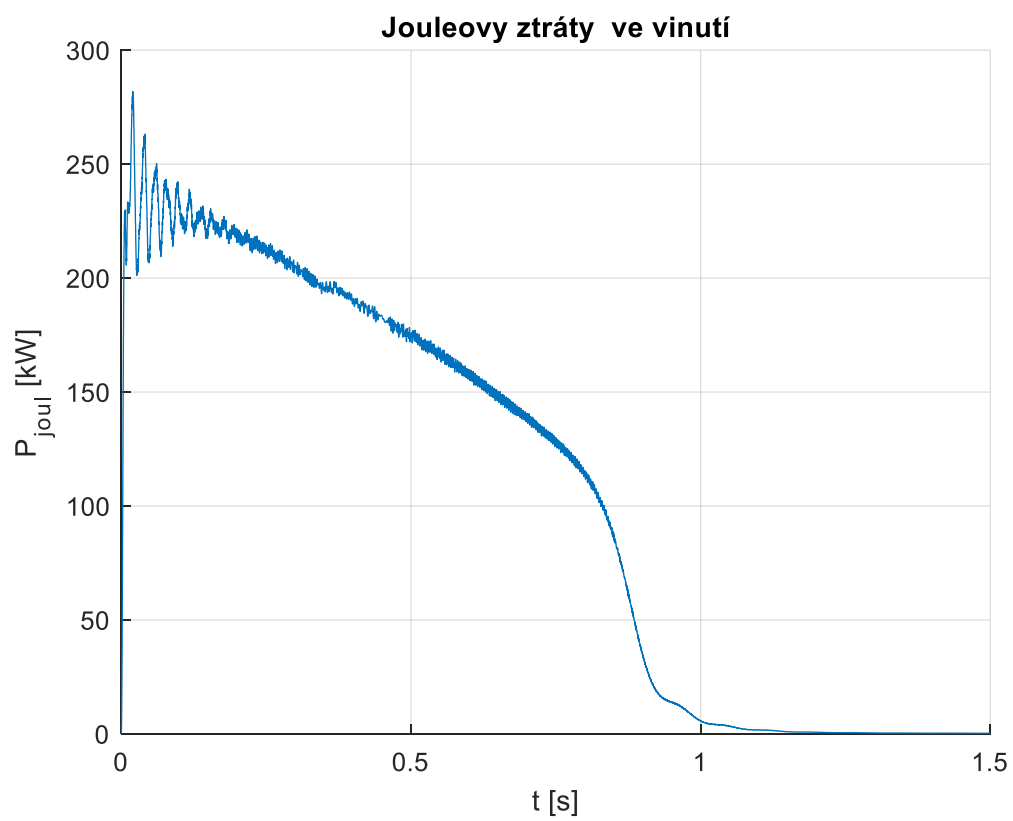


**Obrázek 32:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – ztráty v železe



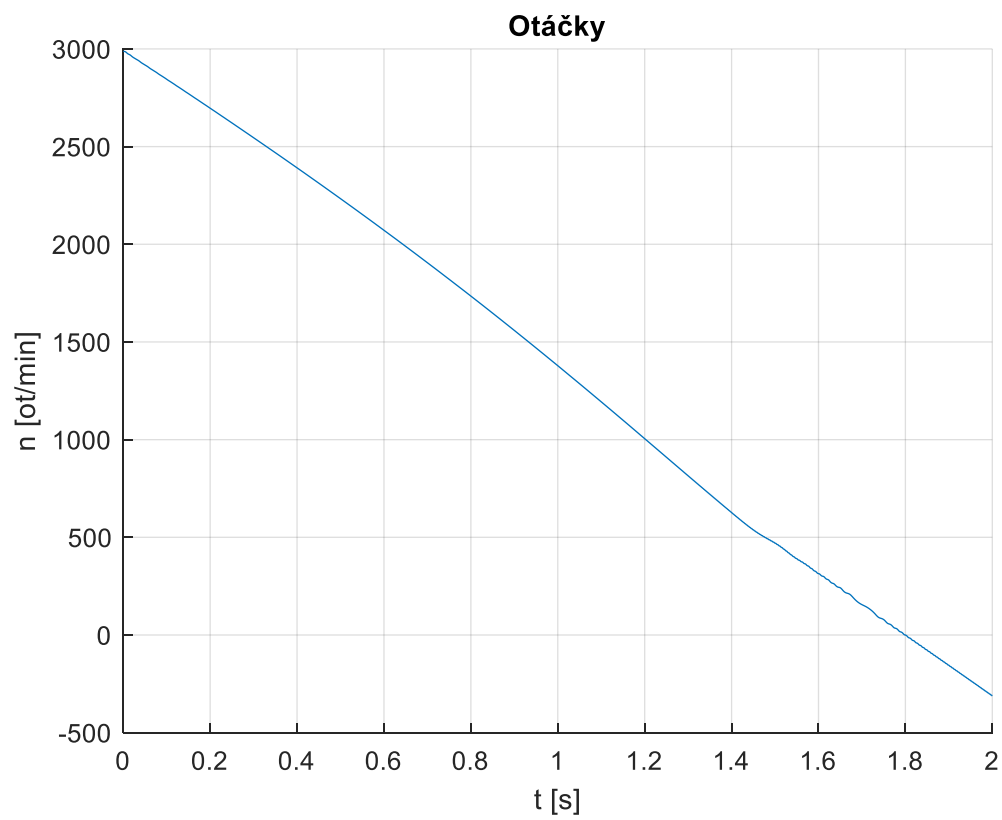
**Obrázek 33:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – ztráty v kleci rotoru



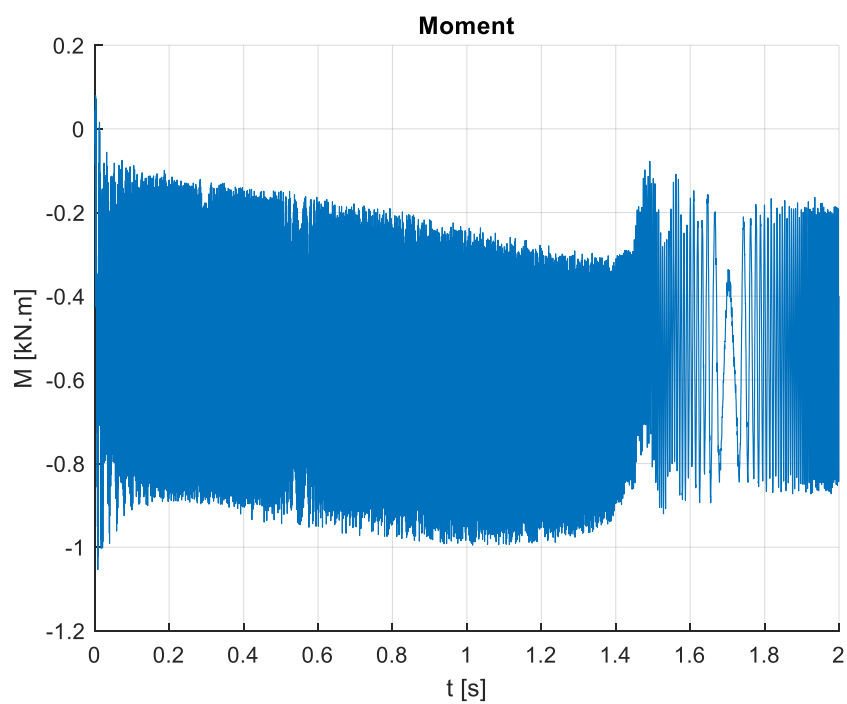


**Obrázek 34:** Brzdění protiproudem při jmenovitých parametrech – Jouleovy ztráty

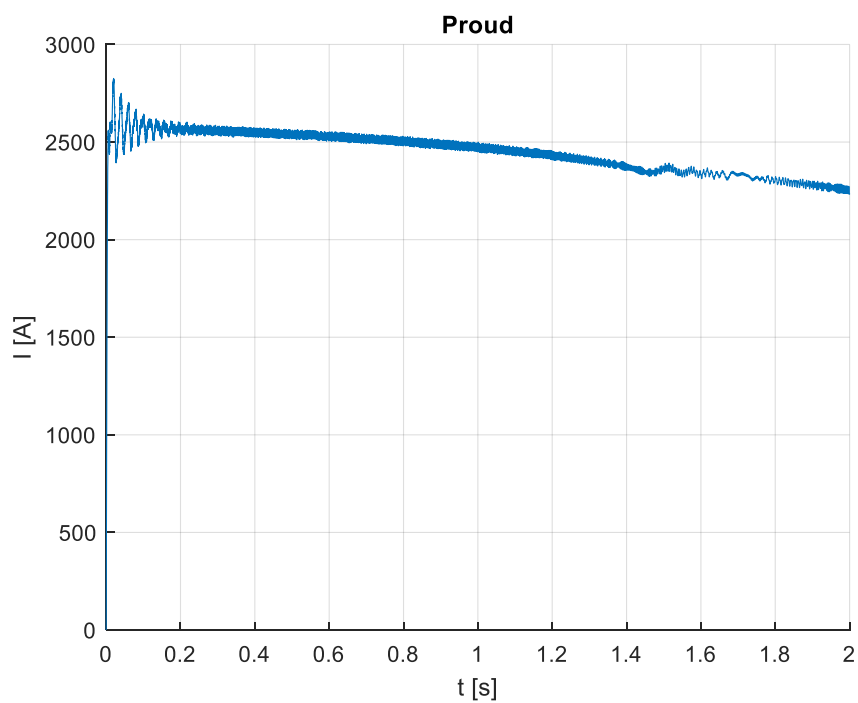
### A.3 Brzdění protiproudem při polovičním napájecím napětí



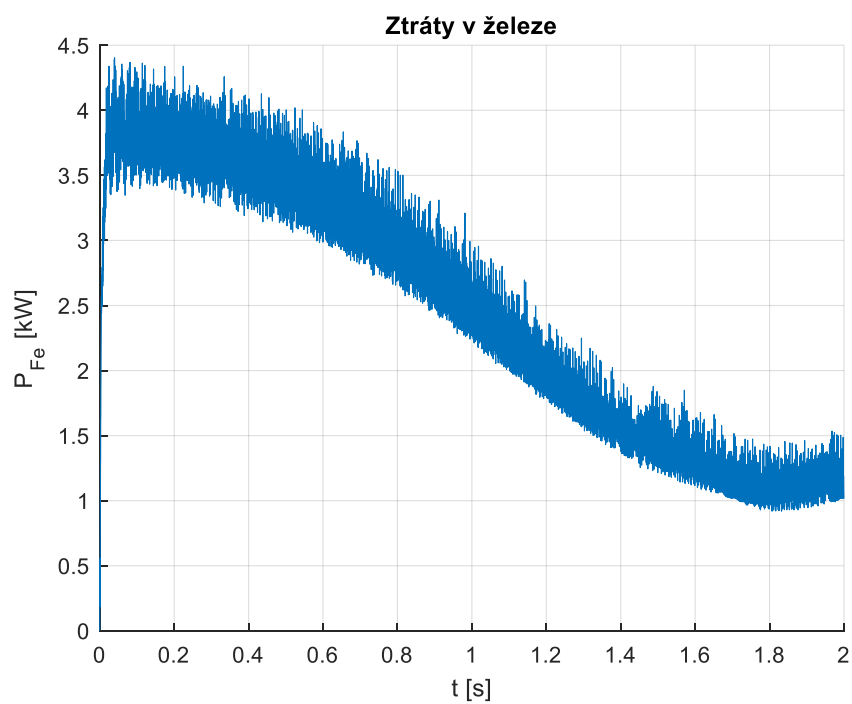
**Obrázek 35:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V - otáčky



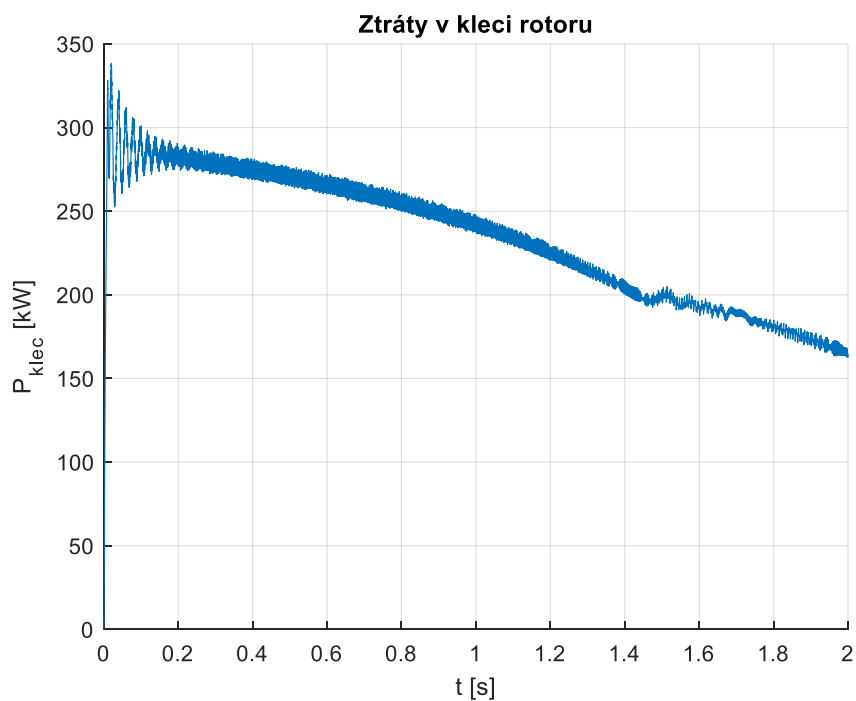
**Obrázek 36:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V - moment



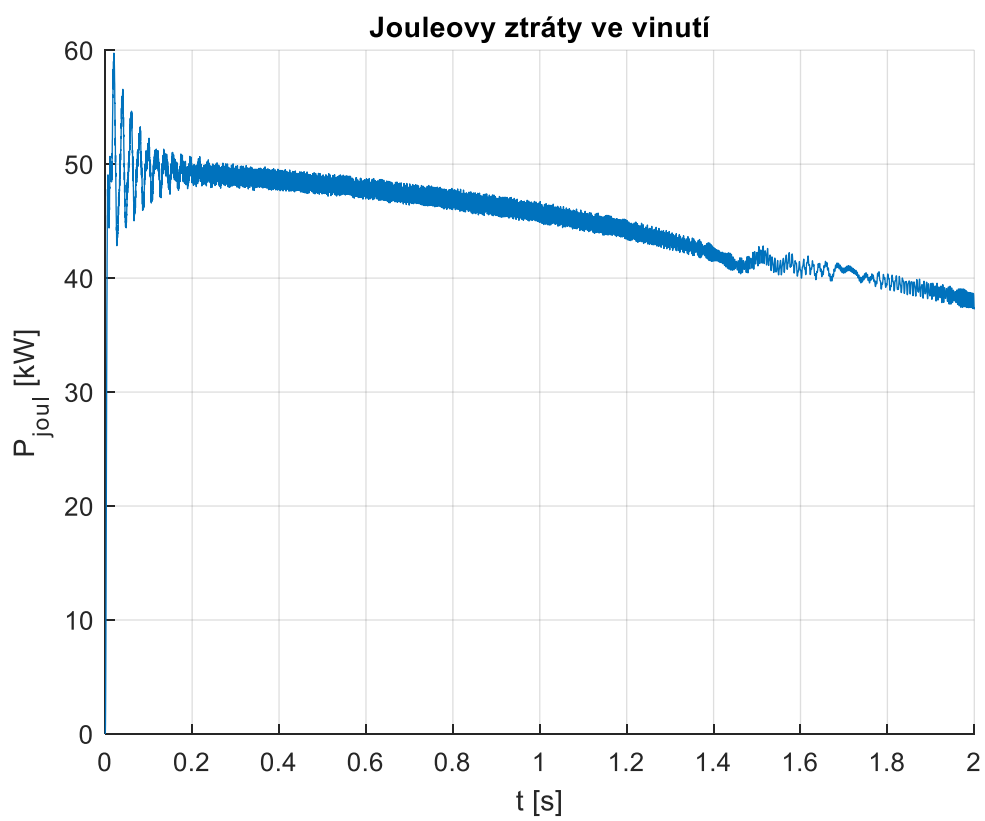
**Obrázek 37:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V - proud



**Obrázek 38:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V – ztráty v železe

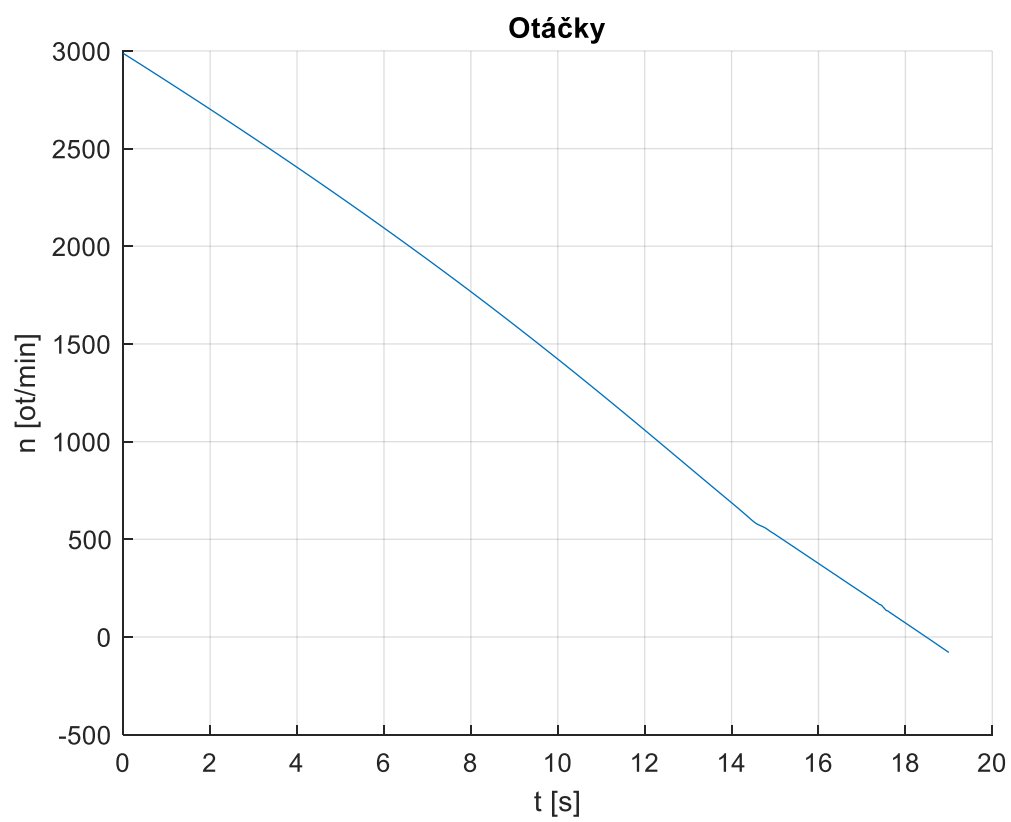


**Obrázek 39:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V – ztráty v kleci rotoru

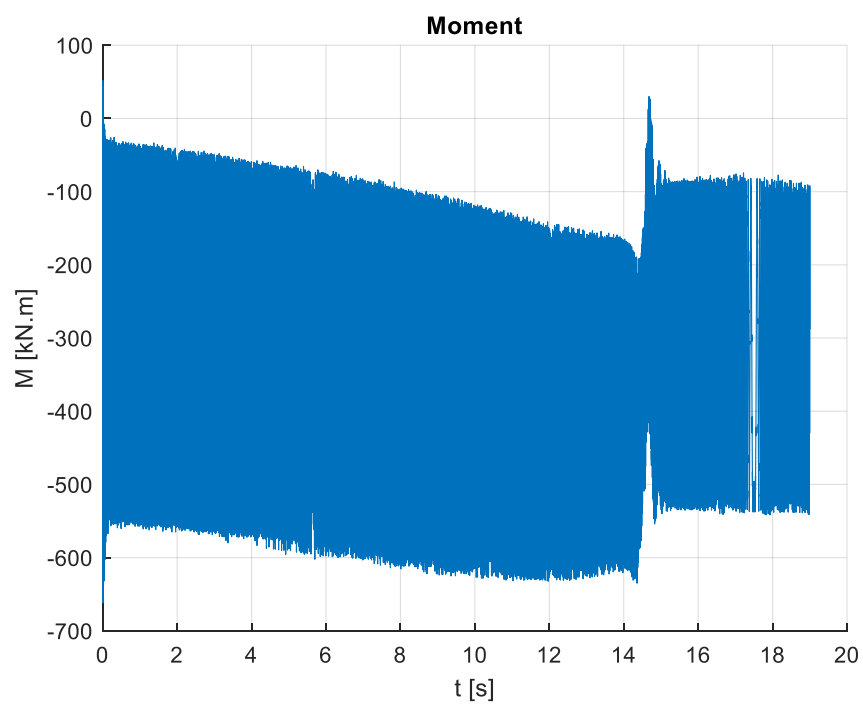


**Obrázek 40:** Brzdění protiproudem při  $U_n=200$  V – Jouleovy ztráty

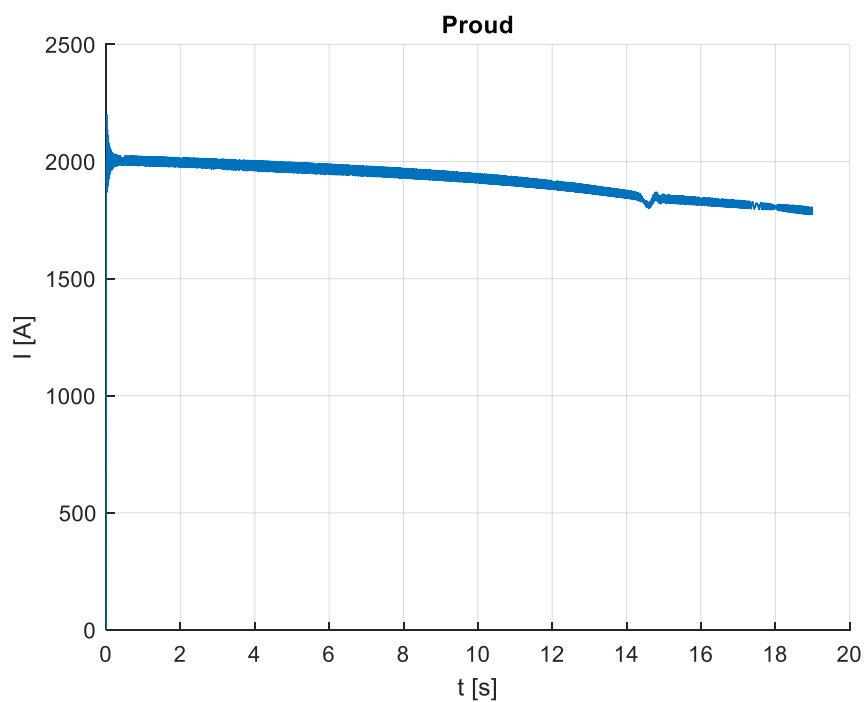
## A.4 Brzdění protiproudem při 160 V



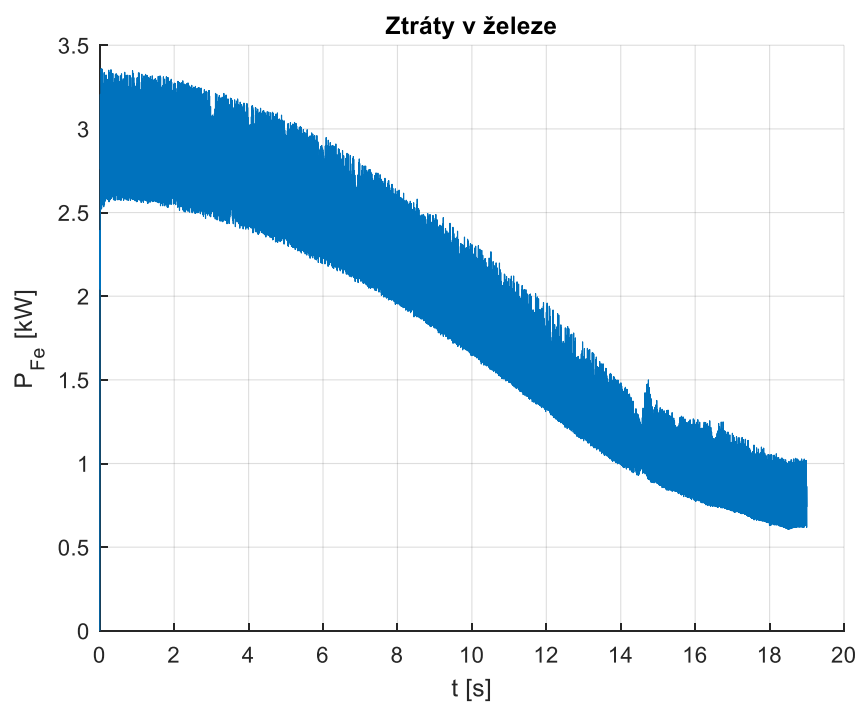
**Obrázek 41:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V - otáčky



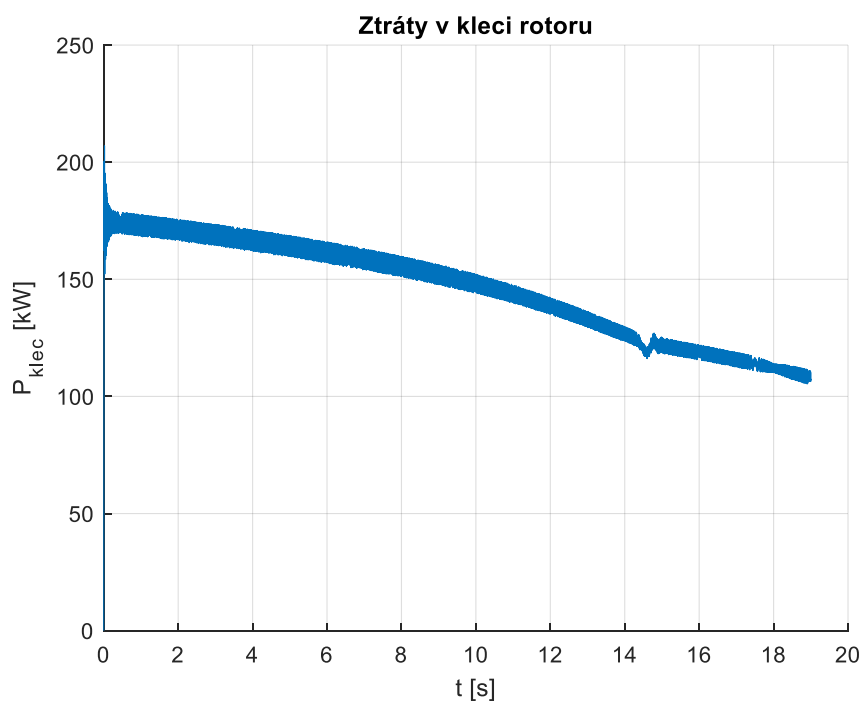
**Obrázek 42:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V - moment



**Obrázek 43:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V - proud

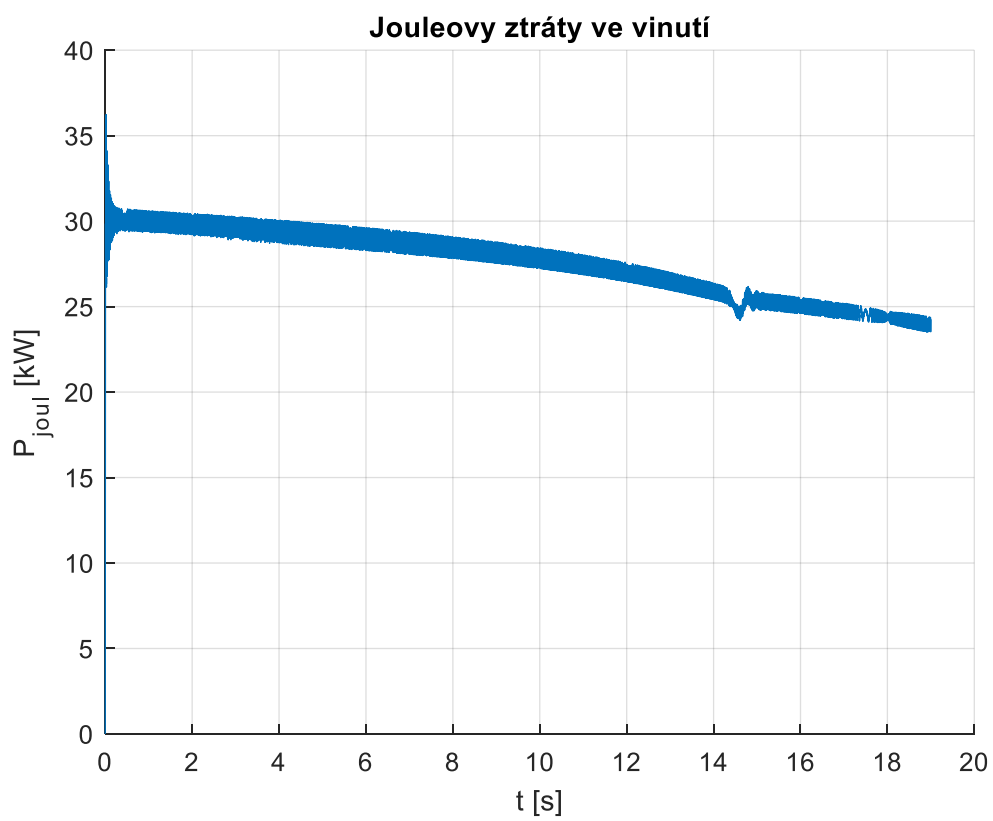


**Obrázek 44:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V – ztráty v železe



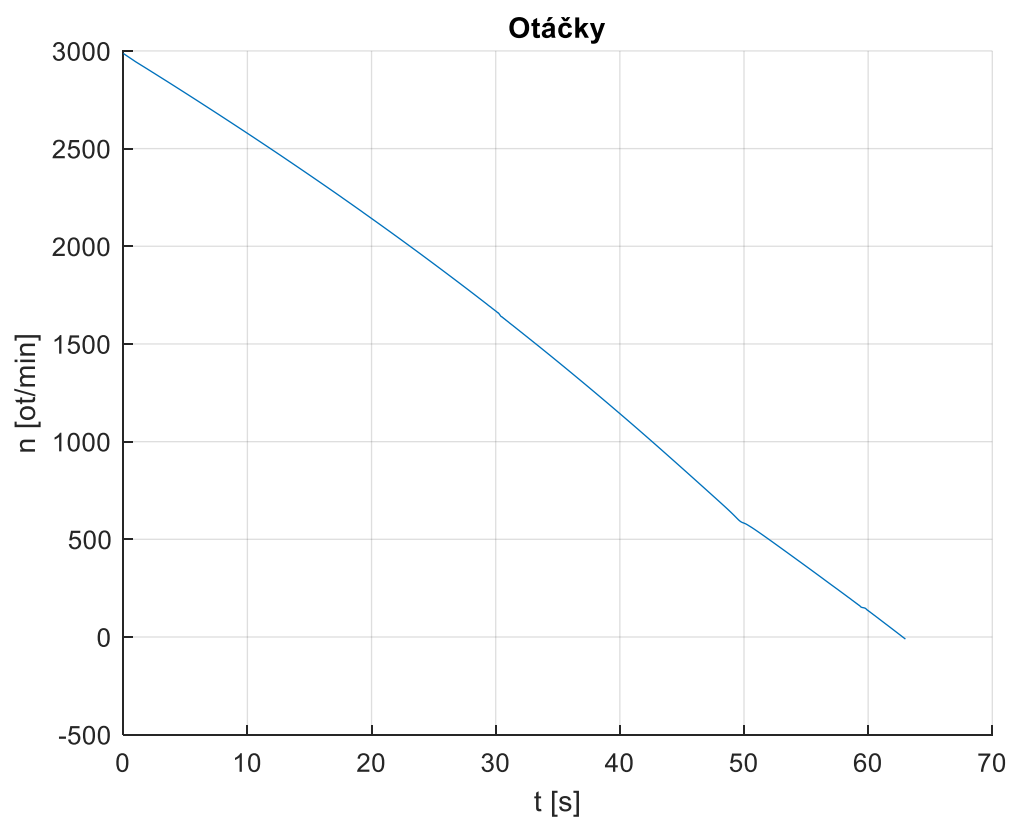
**Obrázek 45:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V – ztráty v kleci rotoru



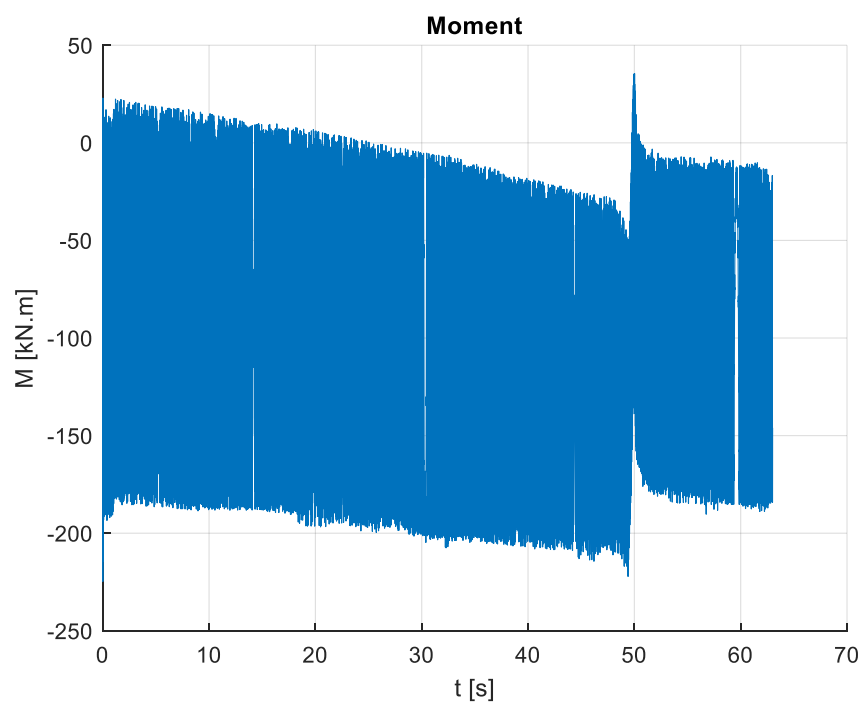


**Obrázek 46:** Brzdění protiproudem při  $U_n=160$  V – Jouleovy ztráty

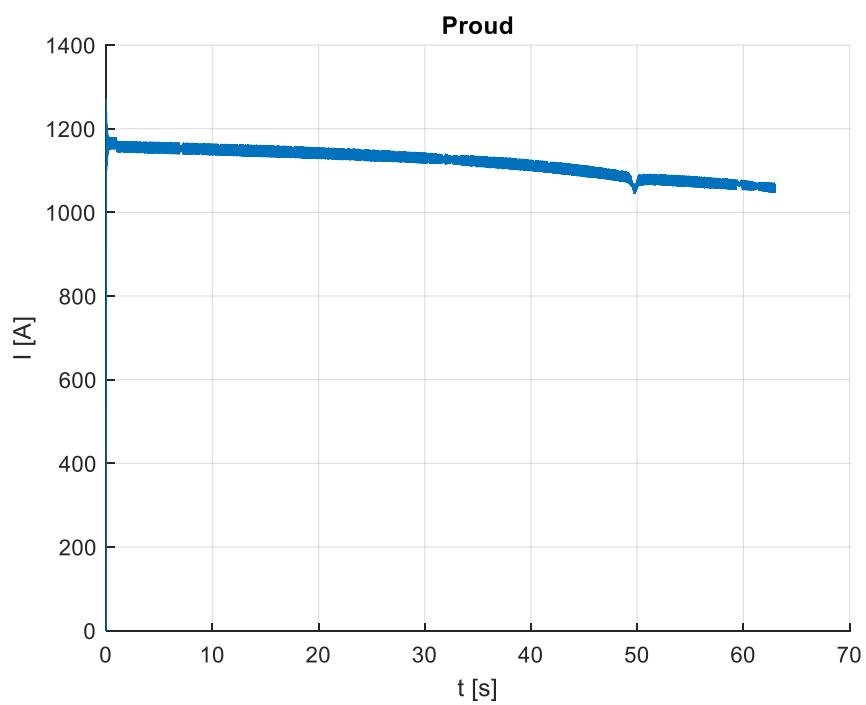
## A.5 Brzdění protiproudem při 100 V



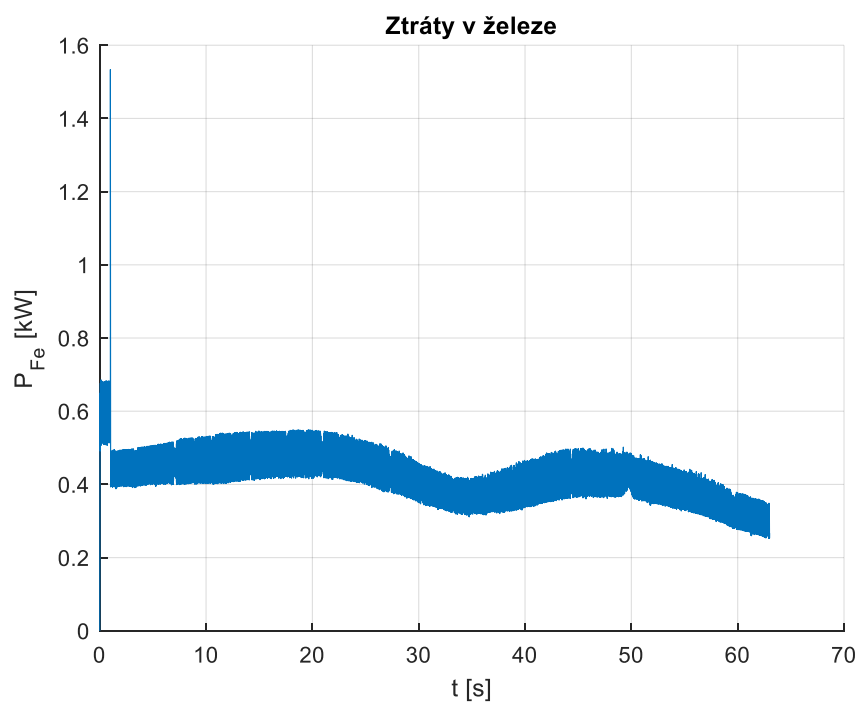
**Obrázek 47:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V - otáčky



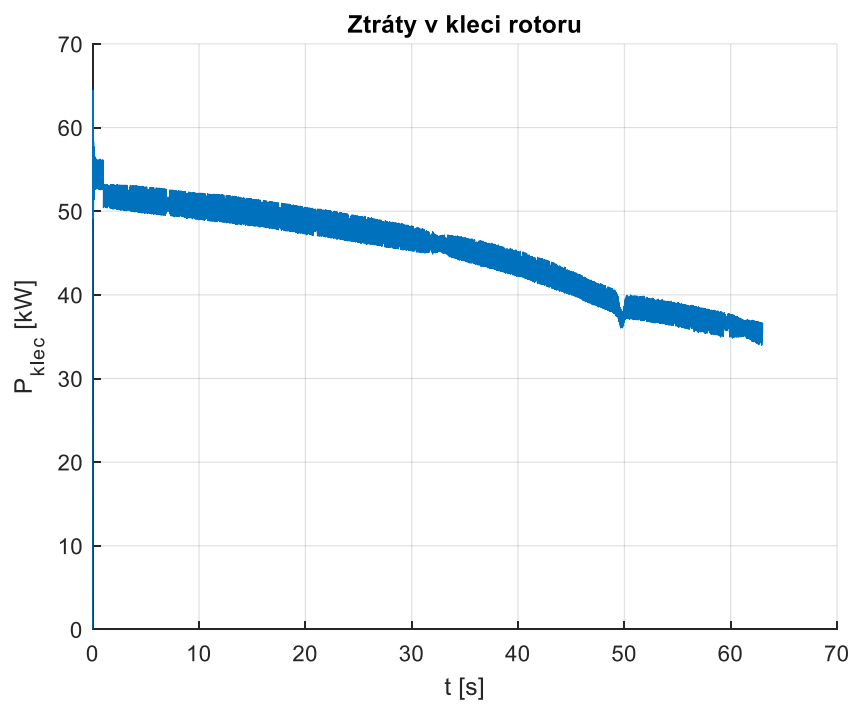
**Obrázek 48:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V - moment



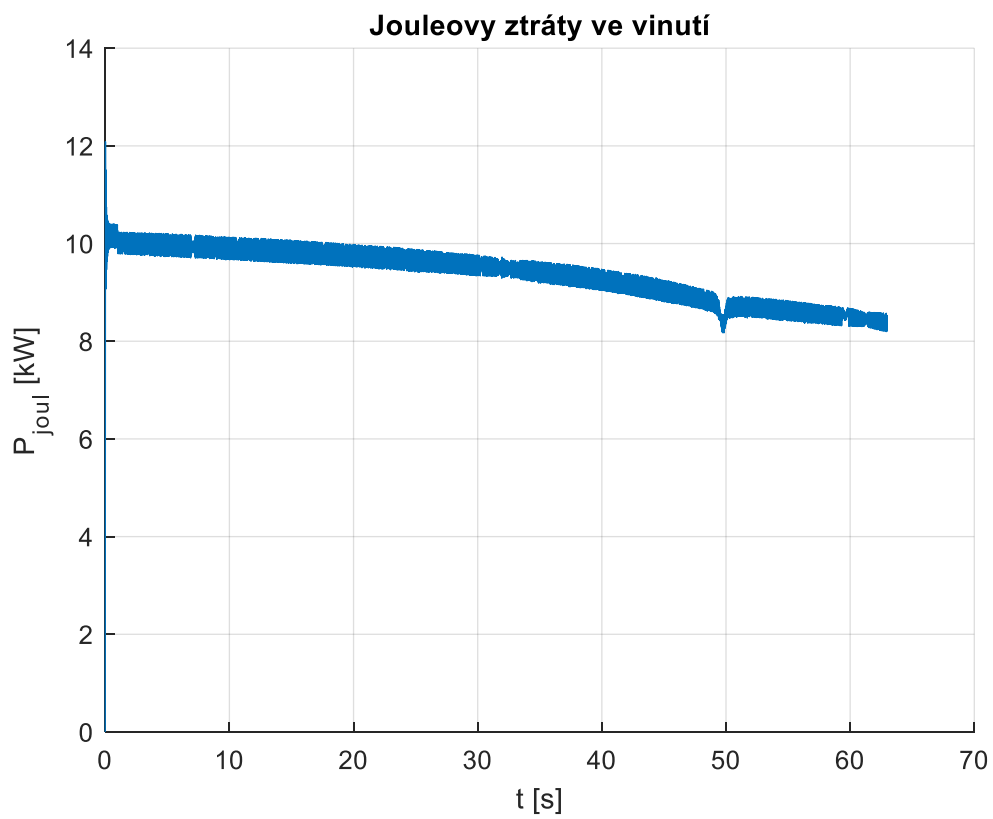
**Obrázek 49:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V - proud



**Obrázek 50:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V – ztráty v železe

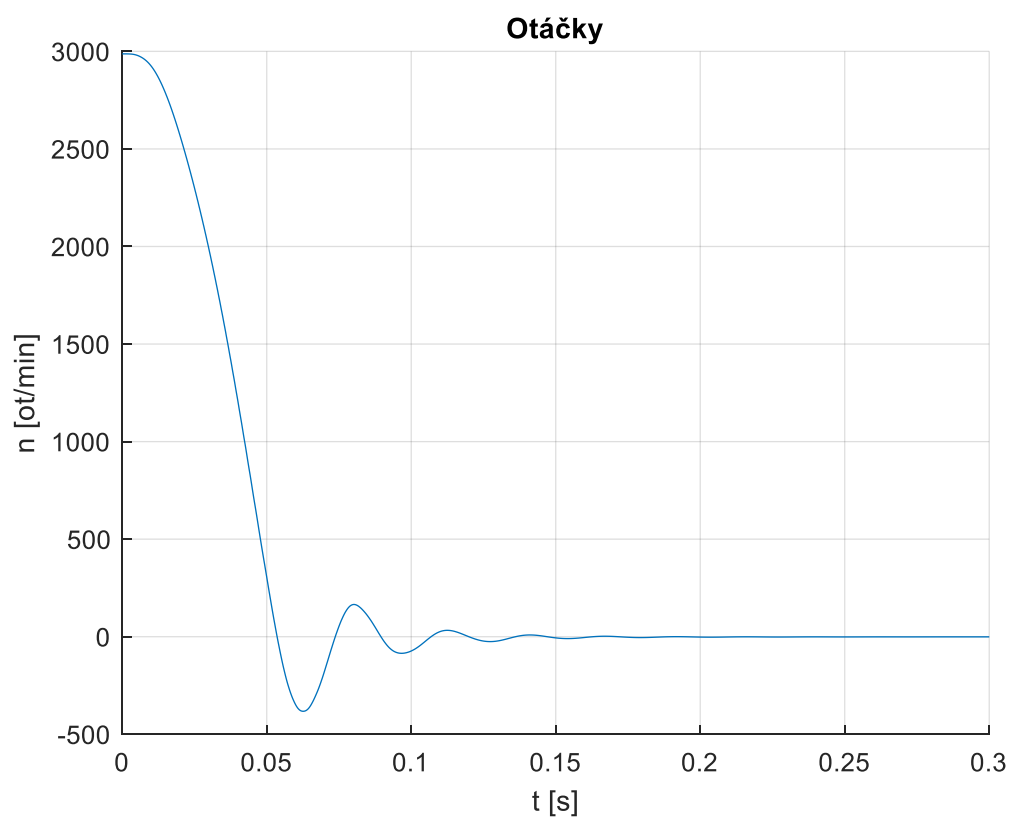


**Obrázek 51:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V – ztráty v kleci rotoru

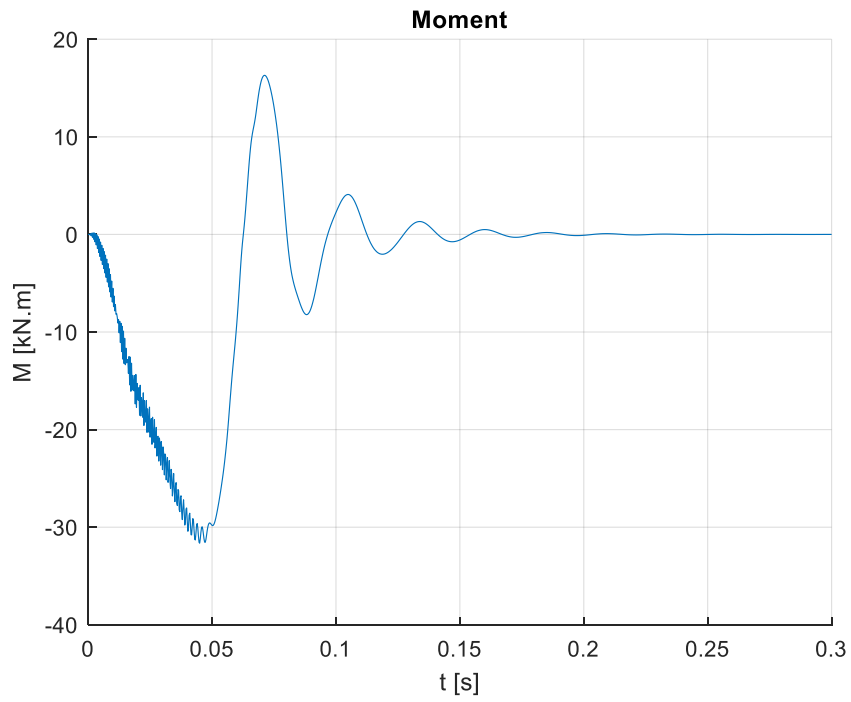


**Obrázek 52:** Brzdění protiproudem při  $U_n=100$  V – Jouleovy ztráty

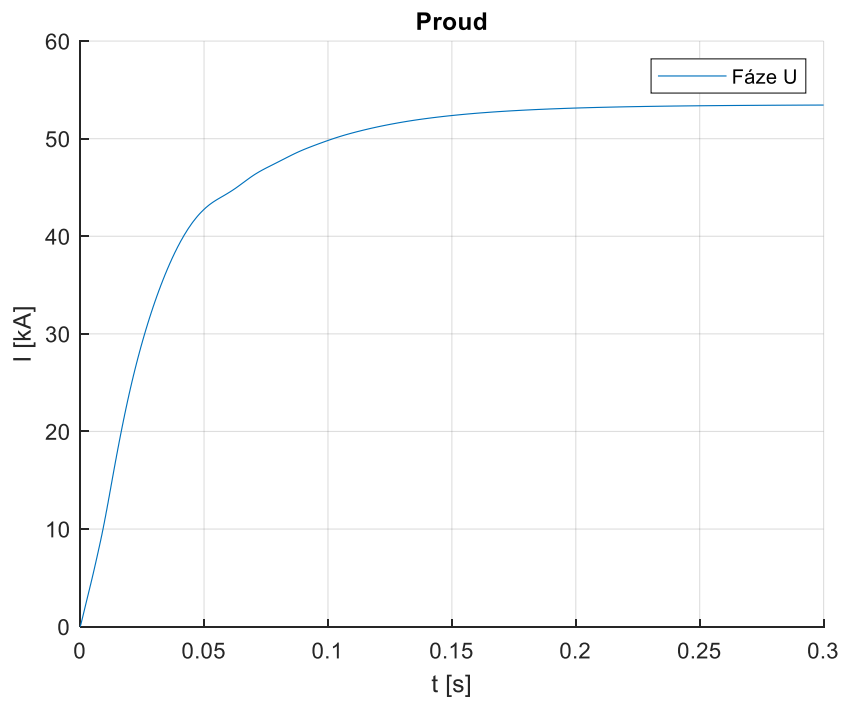
## A.6 Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400\text{ V}$



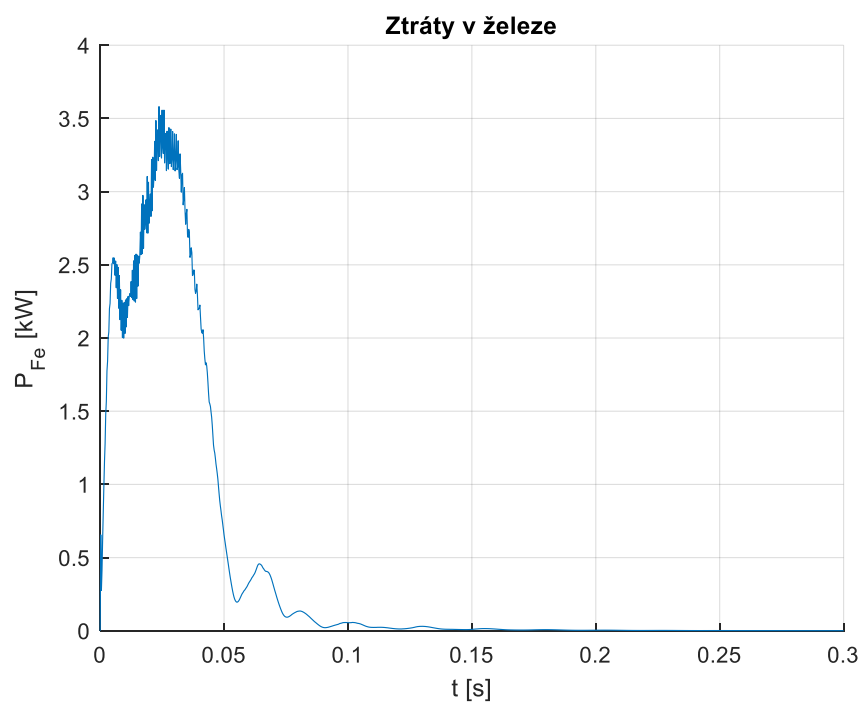
**Obrázek 53:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=400\text{ V}$  - otáčky



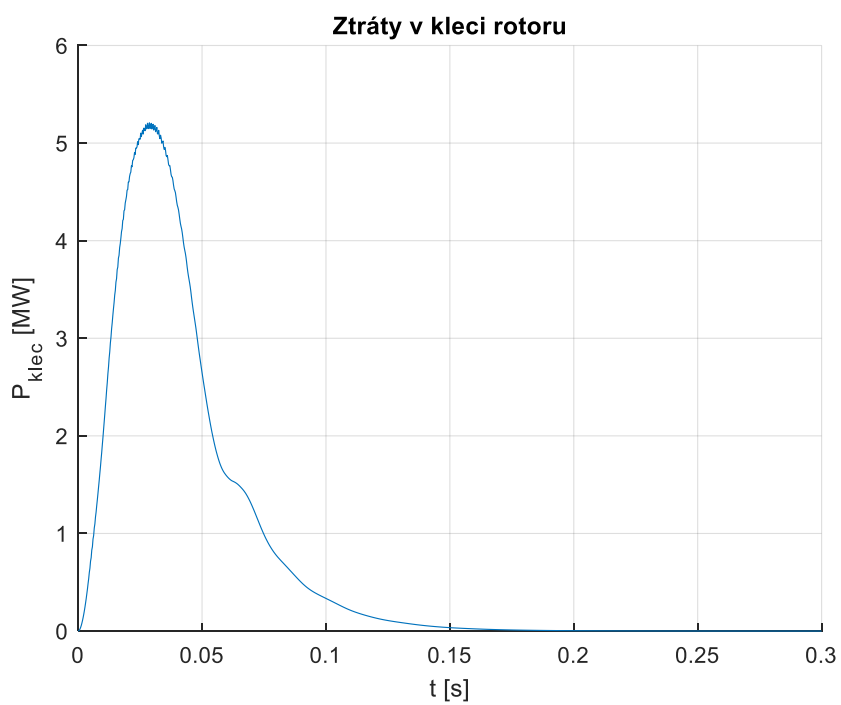
**Obrázek 54:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=400$  V - moment



**Obrázek 55:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=400$  V - proud

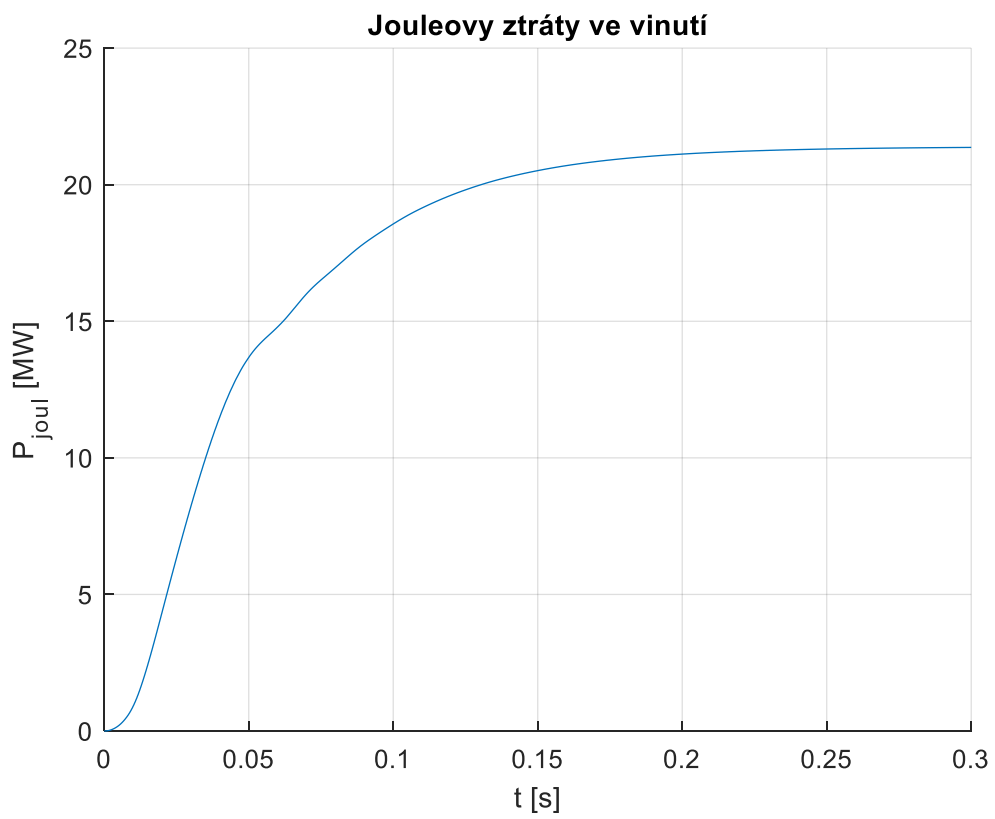


**Obrázek 56:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=400$  V – ztráty v železe



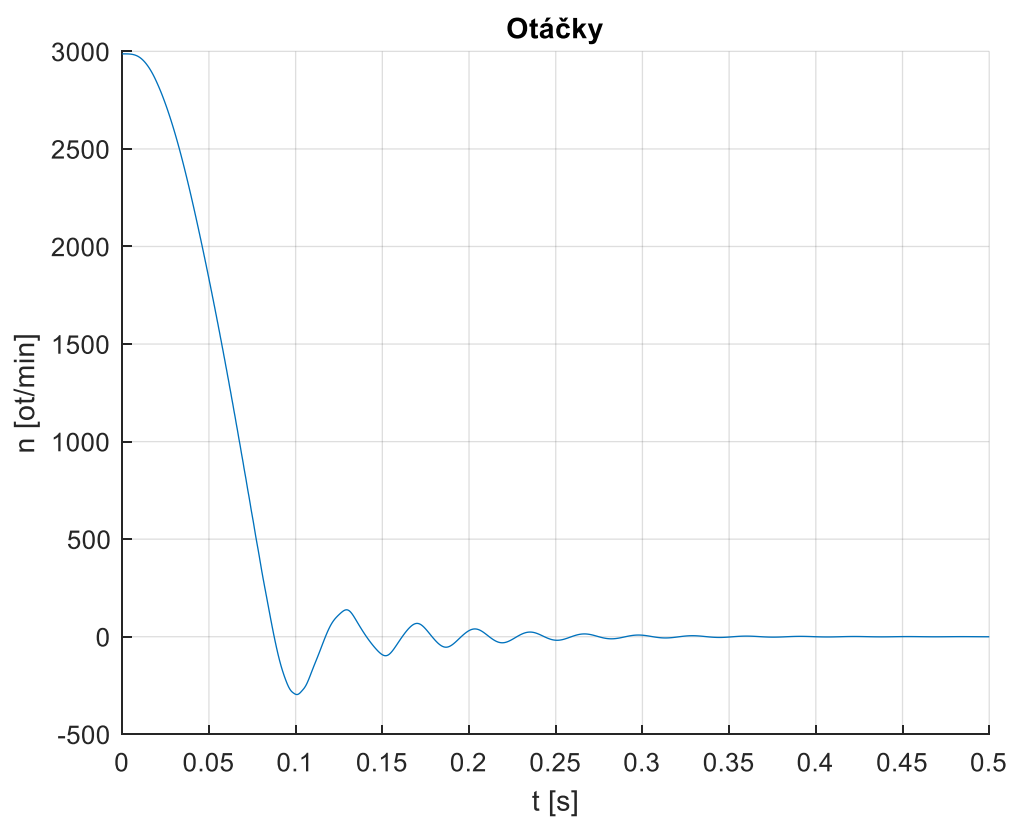
**Obrázek 57:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=400$  V – ztráty v kleci rotoru



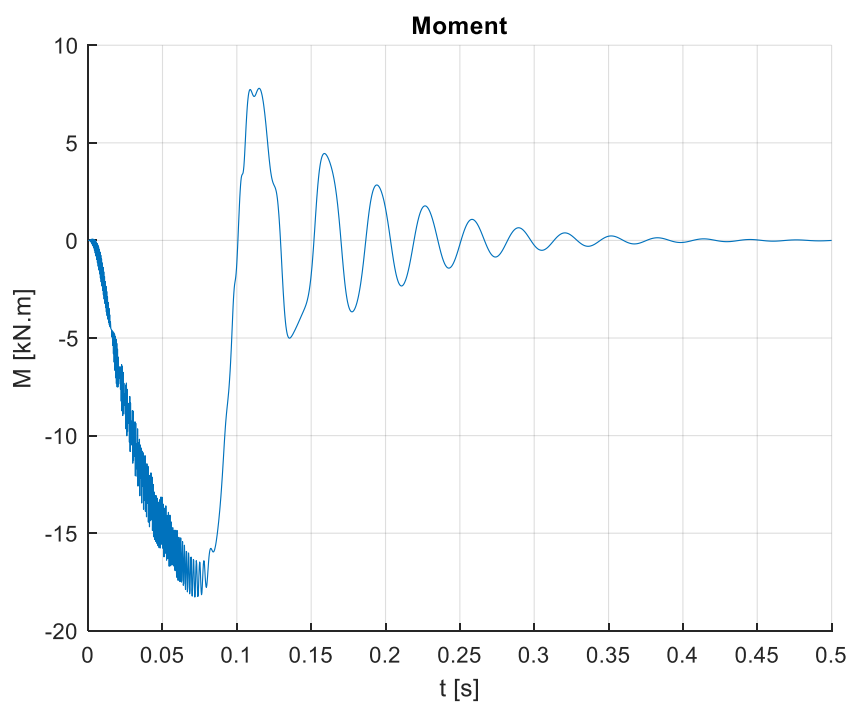


**Obrázek 58:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=400$  V – Jouleovy ztráty

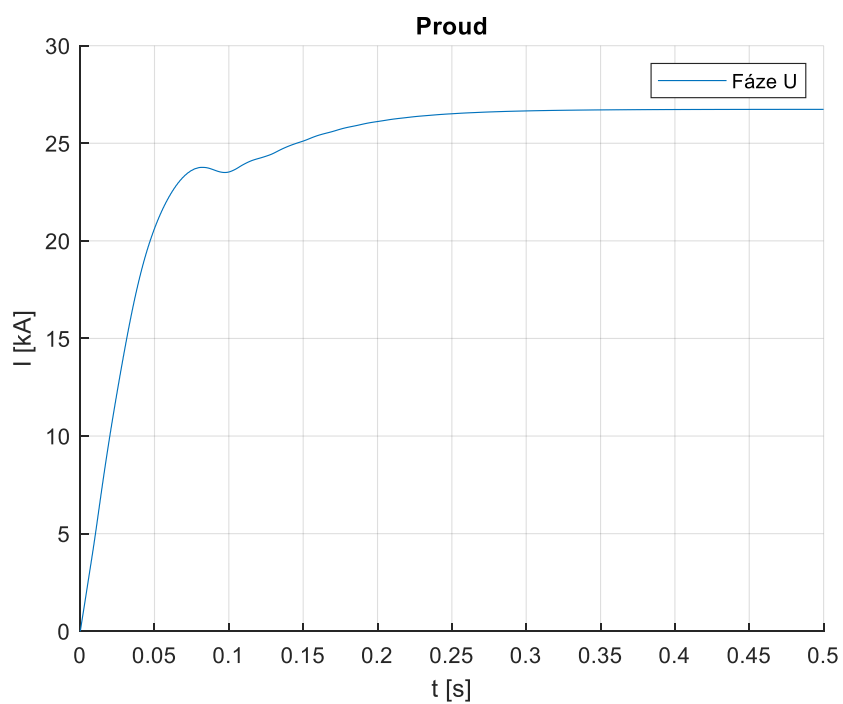
## A.7 Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=200\text{ V}$



**Obrázek 59:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=200\text{ V}$  - otáčky



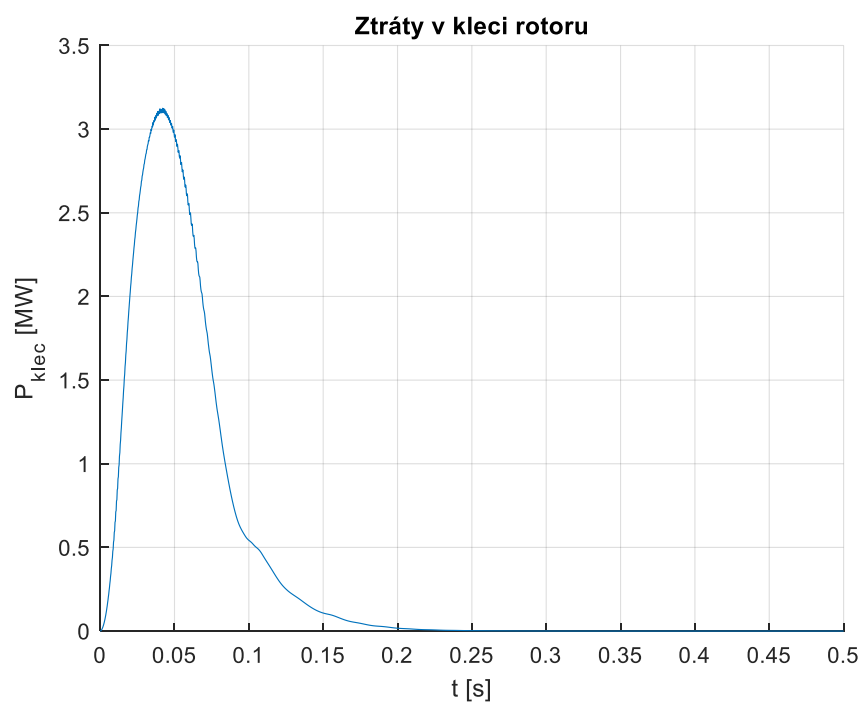
**Obrázek 60:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=200$  V - moment



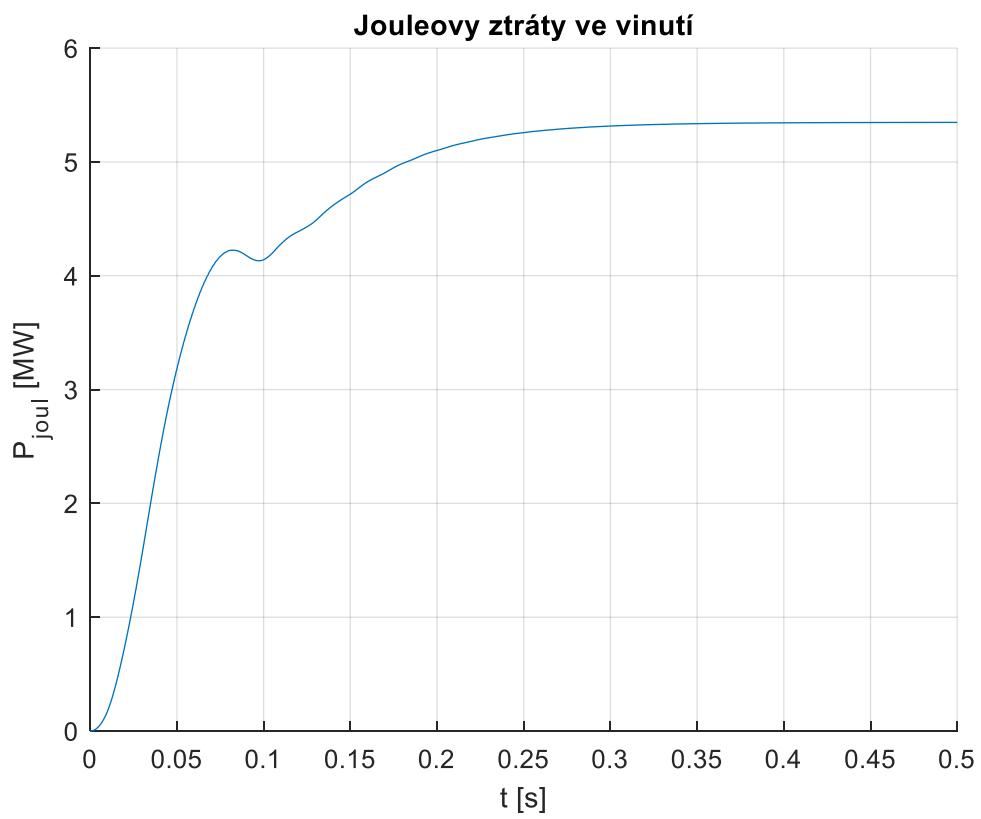
**Obrázek 61:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=200$  V - proud



**Obrázek 62:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=200$  V – ztráty v železe

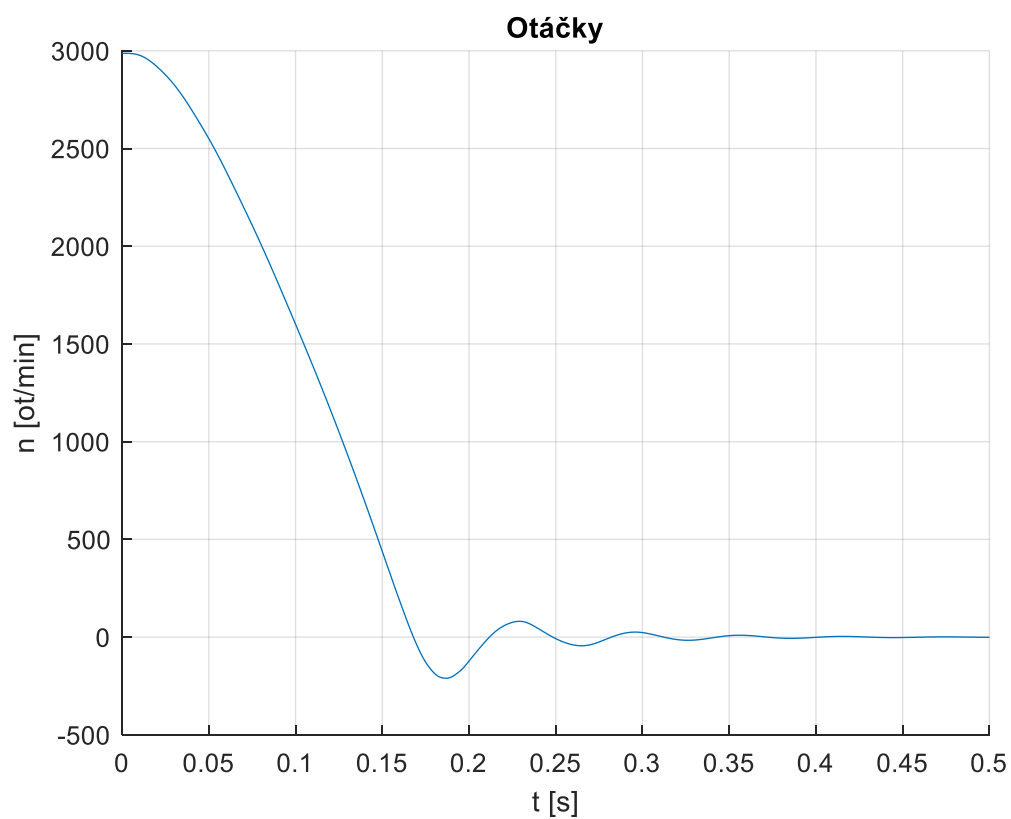


**Obrázek 63:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=200$  V – ztráty v kleci rotoru

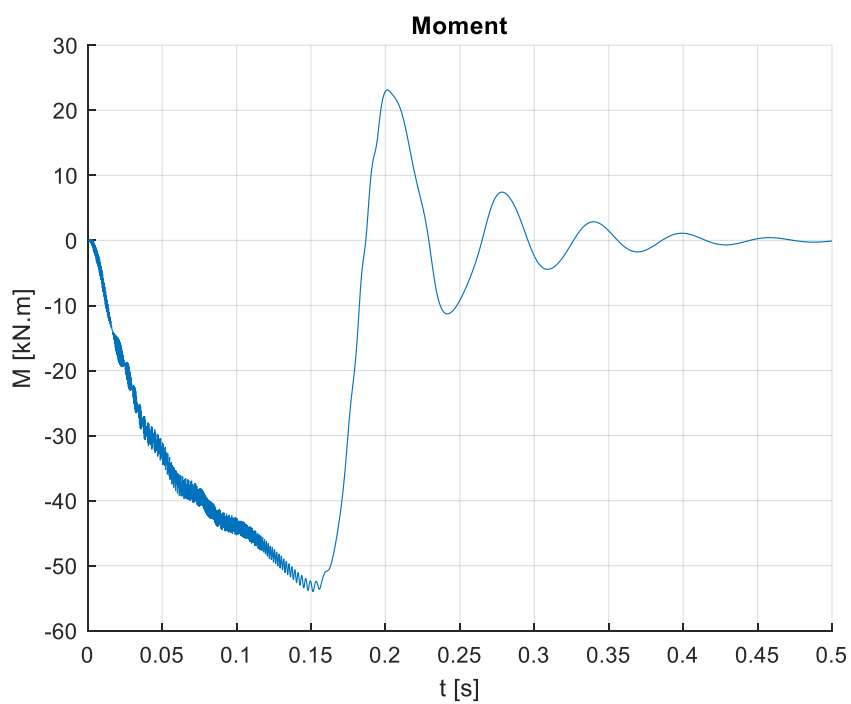


**Obrázek 64:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{\text{DC}}=200$  V – Jouleovy ztráty

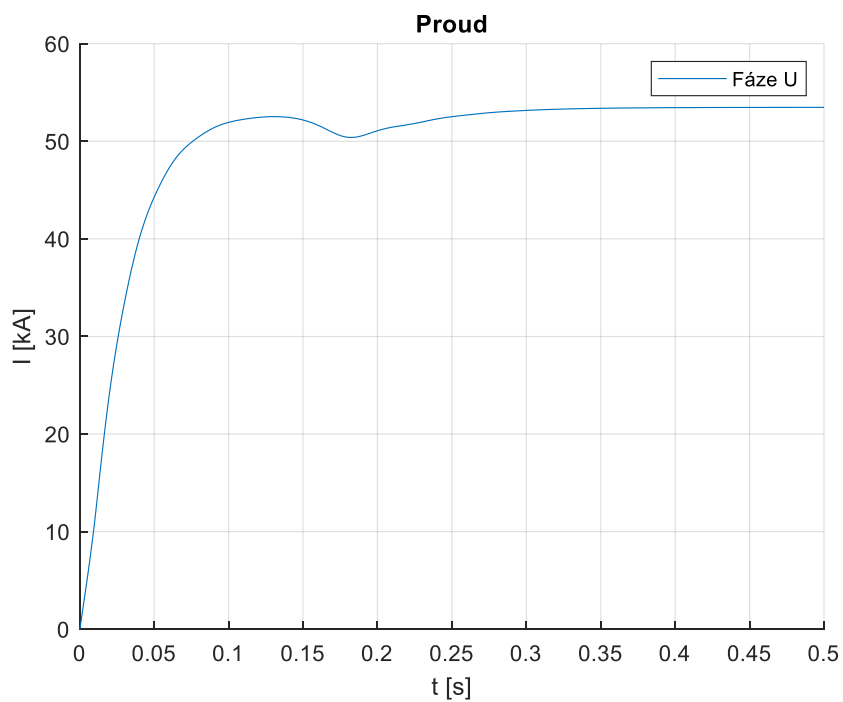
## A.8 Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=400\text{ V}$ a $J_S=19,91\text{ kg.m}^2$



**Obrázek 65:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91\text{ kg.m}^2$  - otáčky



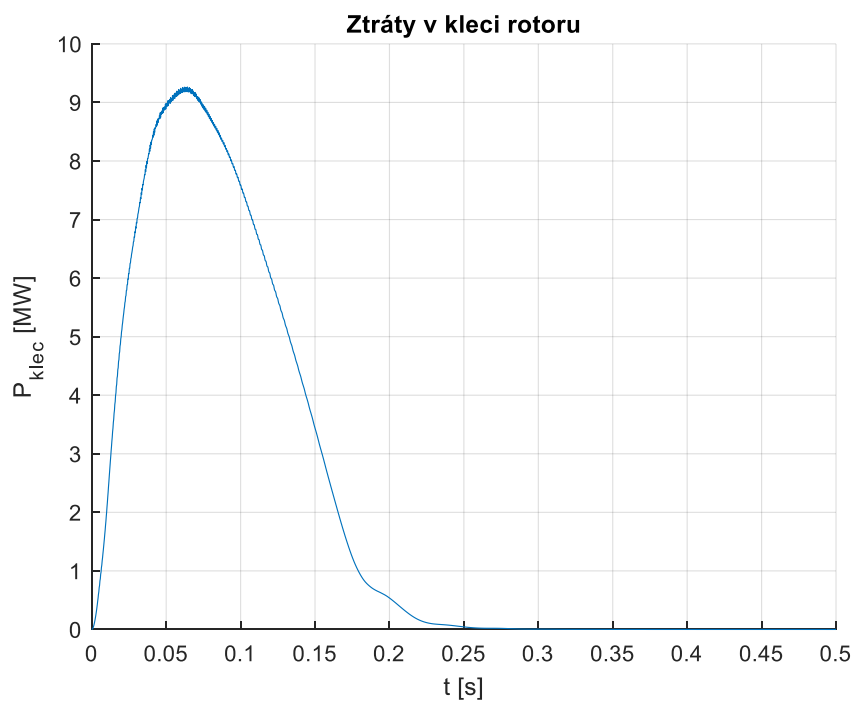
**Obrázek 66:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  - moment



**Obrázek 67:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  - proud

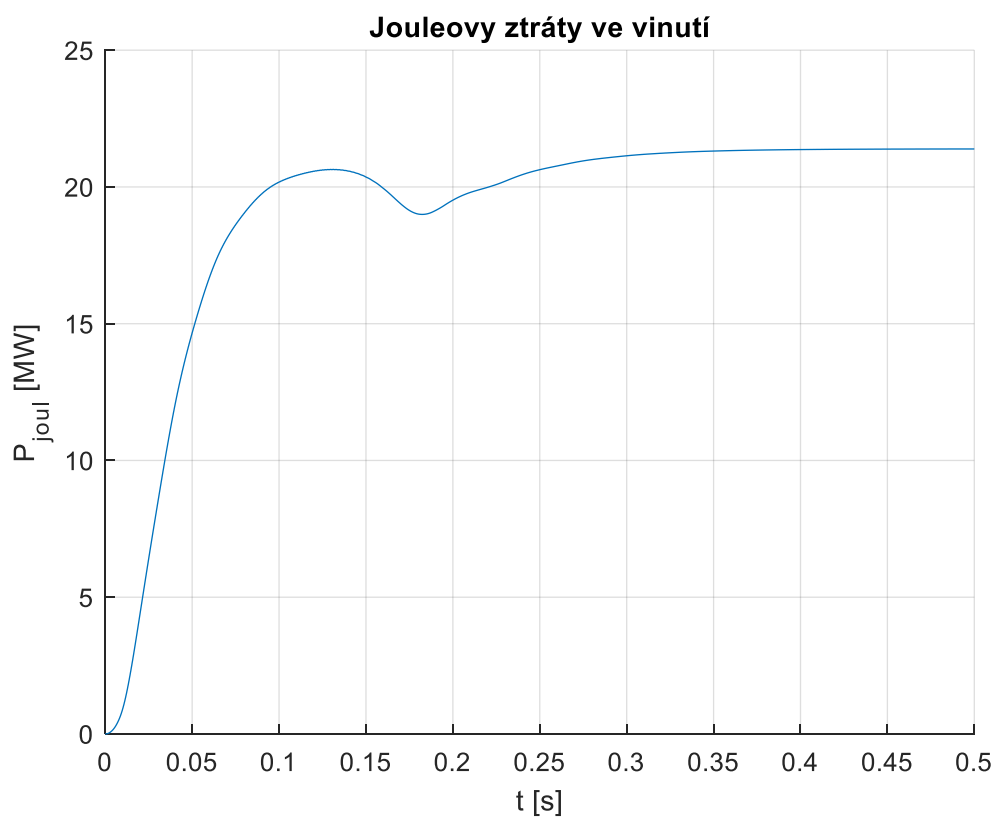


**Obrázek 68:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91 \text{ kg.m}^2$  – ztráty v železe



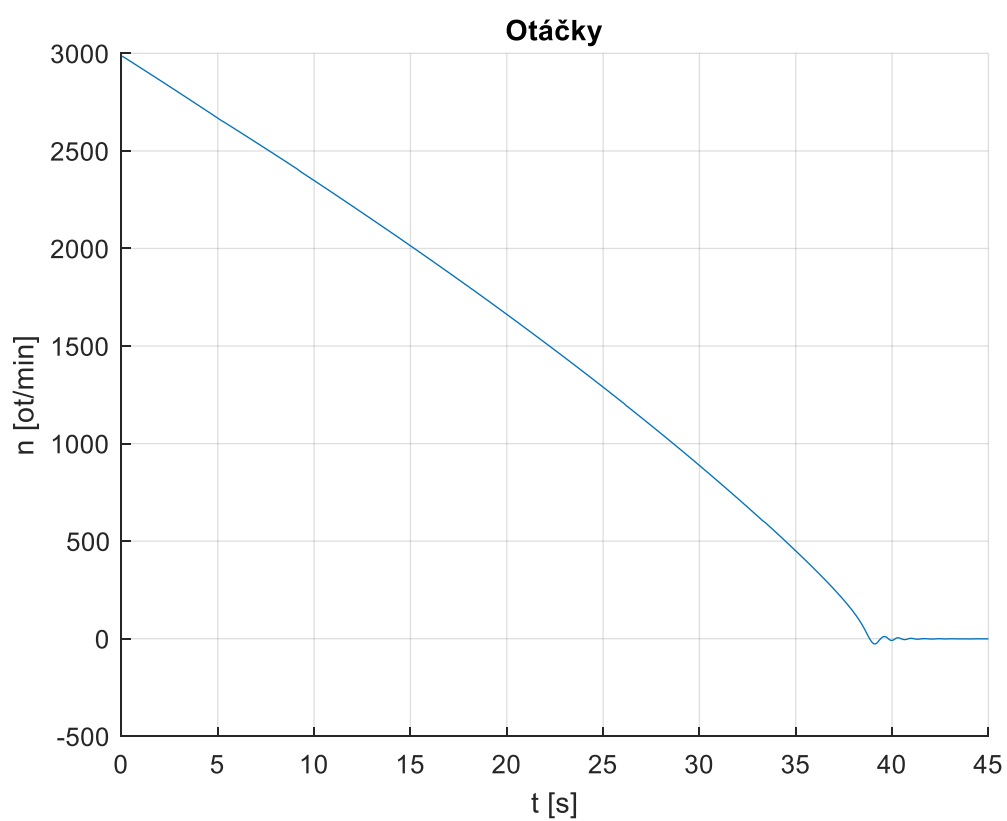
**Obrázek 69:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91 \text{ kg.m}^2$  – ztráty v kleci rotoru



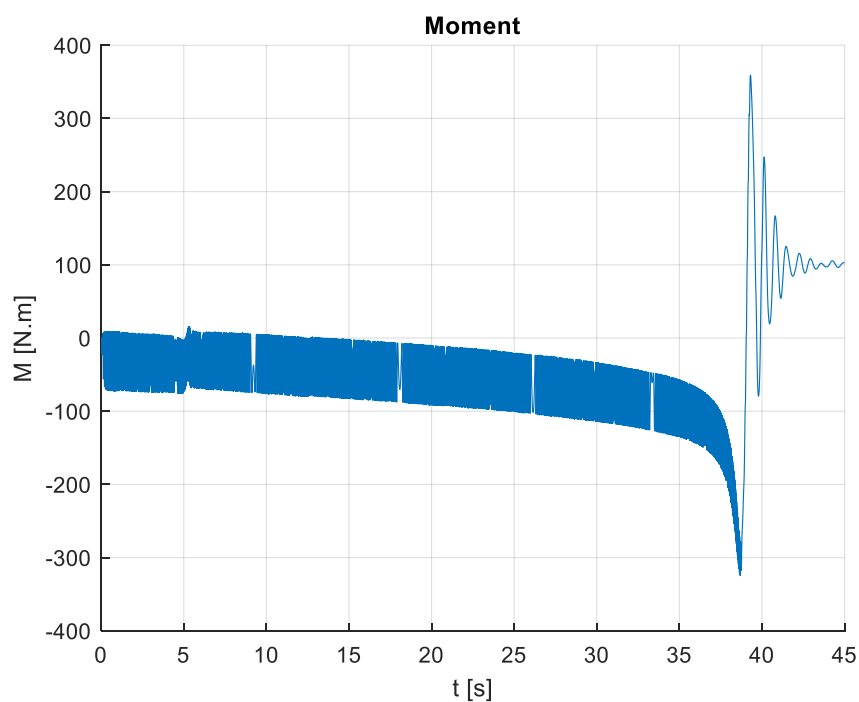


**Obrázek 70:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $J_S=19,91 \text{ kg.m}^2$  – Jouleovy ztráty

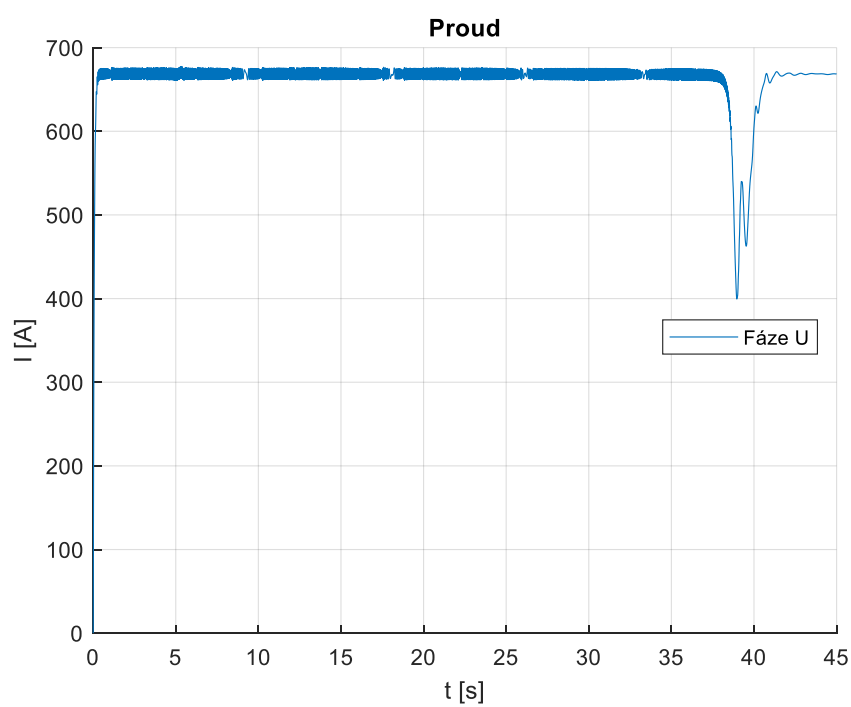
## A.9 Brzdění stejnosměrným proudem při $U_{DC}=5\text{ V}$ a $J_S=19,91\text{ kg.m}^2$



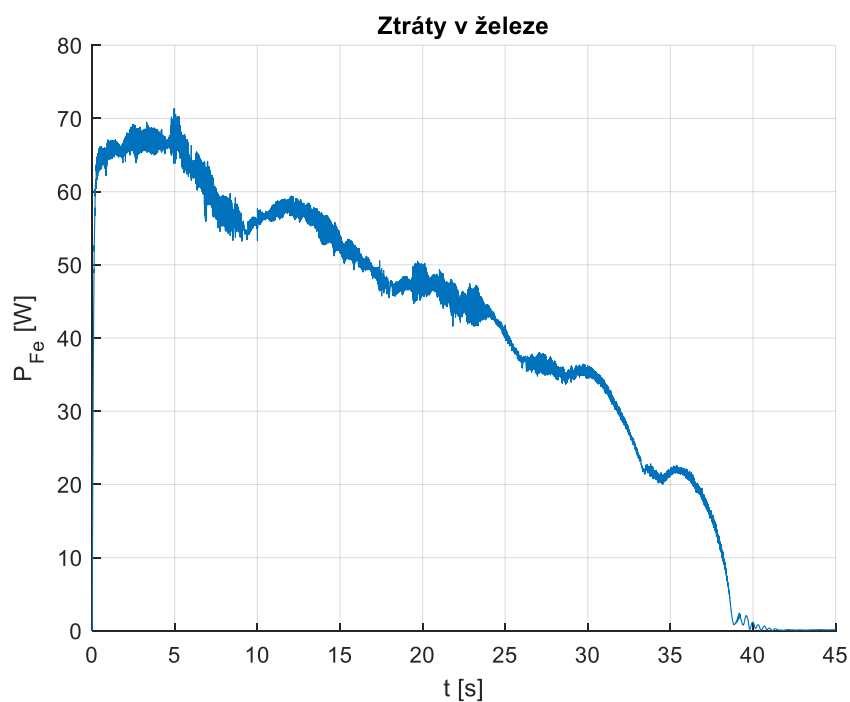
**Obrázek 71:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $U_{DC}=5\text{ V}$  a  $J_S=19,91\text{ kg.m}^2$  – otáčky



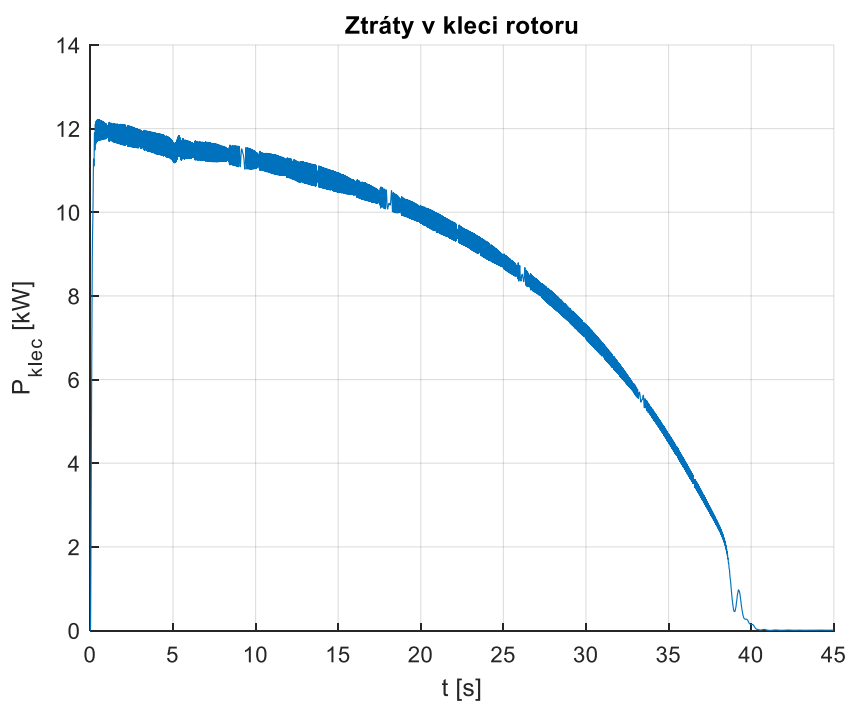
**Obrázek 72:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $UDC=5$  V a  $JS=19,91$   $\text{kg}\cdot\text{m}^2$  – moment



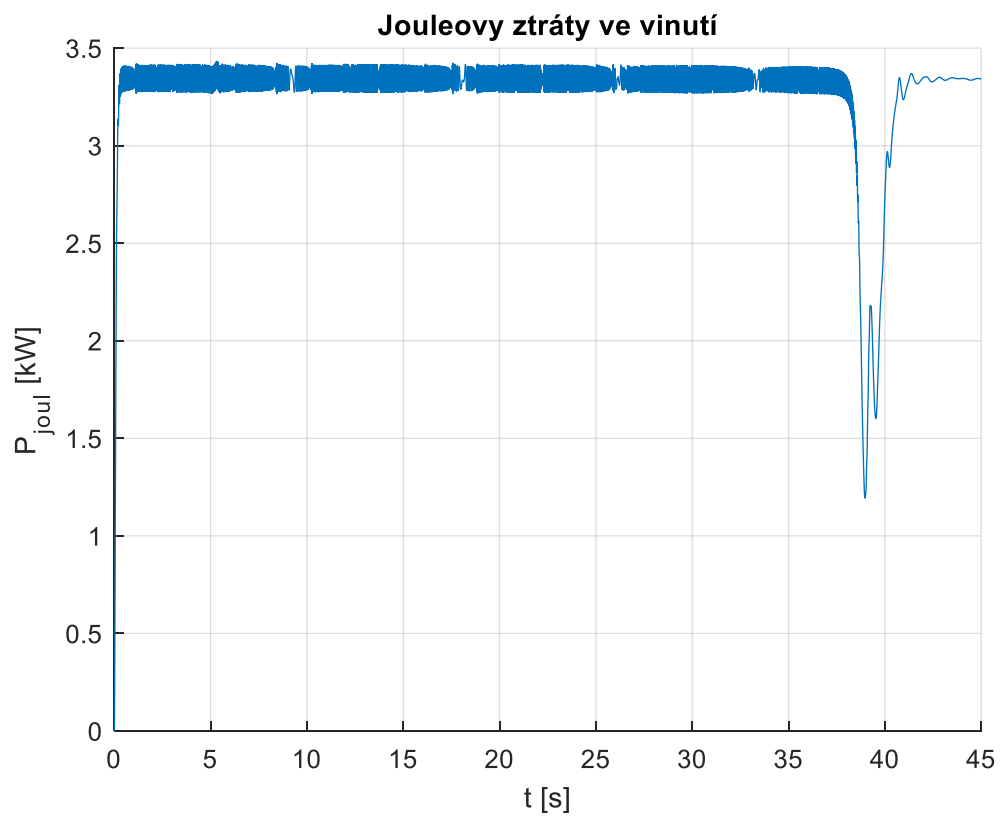
**Obrázek 73:** Brzdění stejnosměrným proudem při  $UDC=5$  V a  $JS=19,91$   $\text{kg}\cdot\text{m}^2$  – proud



**Obrázek 74:** Brzdění stejnosměrným proudem při UDC=5 V a JS=19,91 kg.m2 – ztráty v železe



**Obrázek 75:** Brzdění stejnosměrným proudem při UDC=5 V a JS=19,91 kg.m2 – ztráty v kleci rotoru



**Obrázek 76:** Brzdění stejnosměrným proudem při UDC=5 V a JS=19,91 kg.m<sup>2</sup> – Jouleovy ztráty ve vinutí statoru

## Příloha B - Naměřené hodnoty

**Tabulka 19:** Ztráty třením a větrem

Výkon	125% P <sub>n</sub>	115% P <sub>n</sub>	100% P <sub>n</sub>	75% P <sub>n</sub>	50% P <sub>n</sub>	25% P <sub>n</sub>
Ztráty třením a větrem [W]	1865,0	1867,2	1870,5	1875,8	1880,9	1885,9

**Tabulka 20:** Měření brzdění protiproudem při 160 V

t [s]	n [ot/min]	M [N.m]	I <sub>u</sub> [A]	I <sub>v</sub> [A]	I <sub>w</sub> [A]	T [°C]
0	2999,17	2,21379	56,04	54,49	55,02	89,49974
0,233374	2999,14	3,25038	56,03	54,47	54,83	89,49522
0,340088	2999,19	1,68771	55,86	54,71	55,01	89,49522
0,607374	2999,19	3,1171	55,81	54,91	55,16	89,49111
0,808866	2999,21	1,30276	55,57	54,83	54,95	89,4865
1,000323	2999,48	2,15916	55,44	54,86	55,16	89,48431
1,149923	2999,18	2,56703	55,17	54,9	54,98	89,48214
1,335453	2999,19	2,89759	55,74	55	55,07	89,47989
1,608722	2999,17	3,04743	55,83	54,96	54,66	89,47586
1,813148	2999,48	3,16345	55,56	55,15	55,13	89,47134
1,996685	2999,17	2,0981	55,75	54,89	54,72	89,4692
2,151259	2999,18	4,98772	55,96	54,74	54,8	89,46706
2,336749	2999,22	3,92676	56,08	54,47	54,77	89,46478
2,606061	2999,19	3,67474	55,59	54,57	54,89	89,46043
2,820454	2999,17	3,62744	55,8	54,75	54,97	89,45628
2,998977	2999,2	3,01562	55,58	54,49	55,05	89,45173
3,340092	2999,19	2,74817	55,94	54,39	54,79	89,44937
3,530554	2999,18	2,45767	55,42	54,67	55,01	89,44477
3,739024	2999,21	3,37043	55,64	54,78	55,16	89,44256
4,00232	2994,11	-118,205	693,26	655,28	658,05	89,42892
4,237663	2968,13	-359,686	2138,48	1872,73	2035,54	89,42761
4,636622	2849,52	-550,589	2429,64	2414	2401,41	89,42859
4,94577	2725,94	-589,726	2458,44	2441,41	2443,59	89,43343
5,289924	2616,02	-595,995	2433,48	2418,61	2425,64	89,44058
5,557161	2505,87	-596,579	2409,21	2391,66	2399,24	89,44925
5,646894	2487,52	-597,296	2401,01	2388,39	2393,2	89,45566
6,033858	2340,7	-597,698	2371,3	2359,72	2365,91	89,47072
6,190439	2285,37	-596,778	2365,13	2349,12	2359,25	89,49203

6,485651	2175,57	-598,335	2345,83	2331,65	2340,82	89,51867
6,781886	2065,94	-592,114	2328,23	2314,65	2322,88	89,53523
6,961406	1992,94	-586,15	2318,23	2305,3	2313,58	89,57849
7,040194	1974,68	-599,85	2312,85	2302,74	2308,88	89,59579
7,306479	1865,04	-602,249	2299,5	2285,65	2292,42	89,61449
7,580748	1774,17	-588,534	2284,09	2271,01	2278,69	89,65589
7,70142	1719,75	-595,202	2277,07	2263,8	2270,58	89,67985
7,70142	1719,75	-595,202	2277,07	2263,8	2270,58	89,67985
8,127259	1592,94	-588,951	2239,8	2248,8	2259,87	89,75778
8,39756	1484,49	-584,072	2226,33	2206,94	2214,24	89,78687
8,602013	1397,25	-547,674	2148,76	2127,53	2134,16	89,847
8,930112	1297,41	-549,967	2147,06	2137,87	2144,19	89,94739
9,159526	1229	-560,837	2165,75	2154,57	2162,59	90,01723
9,425786	1125,06	-566,86	2172,69	2159,02	2164,33	90,05277
9,748922	1020,85	-566,466	2160,93	2148,62	2154,23	90,12364
10,01222	917,641	-559,896	2147,24	2133,78	2141,11	90,20274
10,01222	917,641	-559,896	2147,24	2133,78	2141,11	90,20274
10,4351	781,313	-549,321	2123,67	2109,78	2118,49	90,32461
10,63857	713,992	-549,774	2112,07	2098,71	2105,19	90,36556
10,75825	663,196	-557,766	2102,63	2088,27	2097,76	90,45054
11,03049	578,516	-472,042	2055,42	2043,05	2050,64	90,49276
11,2908	516,271	-445,387	2059,69	2045,23	2055,48	90,57894
11,56008	434,178	-449,474	2053,58	2039,45	2049,32	90,66634
11,95602	324,328	-445,061	2038,18	2024,49	2033	90,79921
12,16051	283,239	-443,849	2033,06	2018,36	2026,81	90,89053
12,48563	189,151	-327,898	2018,29	2002,07	2013,57	90,93779
12,65717	126,108	-332,28	2007,43	1990,97	2000,93	91,02946
13,04115	36,9068	-399,861	1990,24	1979,3	1987,2	91,12246
13,30843	-38,6171	-404,217	1981,6	1964,85	1977,61	91,21638
13,58369	-99,9902	-398,864	1970,24	1958,61	1962,89	91,31044
13,89486	-184,203	-391,32	1958,65	1942,92	1951,58	91,45149
14,20799	-255,577	-381,174	1947,09	1931,24	1938,92	91,54683
14,50622	-325,785	-384,874	1935,79	1919,09	1927,03	91,64303
14,81138	-395,824	-383,844	1921,81	1906,07	1913,17	91,73968
15,15447	-462,988	-327,325	1911,49	1896,96	1905,58	91,83557
15,41277	-526,515	-350,204	1902,06	1886,54	1893,65	91,93226
15,74189	-590,636	-348,855	1890,3	1877,44	1883,92	92,0291
15,93438	-633,131	-346,795	1883,86	1869,46	1875,63	92,12565
16,15681	-675,573	-344,429	1877,56	1860,94	1870,47	92,17386
16,42706	-738,539	-343,064	1865,6	1851,62	1859,01	92,27035

16,82799	-821,562	-337,043	1852,38	1836,95	1842,04	92,41518
17,00654	-862,738	-338,187	1842,6	1829,92	1836,02	92,51104
17,43439	-944,692	-333,852	1828,91	1813,48	1822,25	92,60662
17,83729	-1025,56	-328,084	1811,59	1798,02	1804,67	92,74916
18,02382	-1065,41	-324,683	1803,55	1788,09	1797,06	92,84365
18,4407	-1144,59	-320,747	1785,14	1771,04	1779,1	92,9382
18,77578	-1212,18	-312,47	1762,8	1747,4	1755,25	93,03275
19,03508	-1258,92	-299,466	1737,31	1716,11	1727,77	93,17463
19,37916	-1320,44	-281,771	1700,81	1660,07	1679,27	93,27044
19,78707	-1390,86	-295,341	1705,92	1684,62	1705,94	93,41128
20,12417	-1445,74	-300,29	1702,66	1698,87	1727,64	93,50367
20,39744	-1501,16	-306,779	1715,24	1700,64	1714,61	93,5955
20,73357	-1566,01	-305,322	1709,3	1695,23	1706,05	93,6858
21,15444	-1639,9	-295,766	1699,47	1683,29	1694,02	93,821
21,53441	-1712,89	-292,265	1684,37	1670,32	1681,78	93,95709
21,82764	-1767,28	-291,438	1673,12	1661,03	1671,05	94,04595
22,00716	-1803,22	-298,49	1667,19	1654,38	1663,84	94,09007
22,34526	-1865,8	-306,804	1653,93	1642,03	1652,6	94,17611
22,63249	-1910,15	-276,328	1648,7	1634,53	1643,97	94,3073
23,01145	-1980,78	-270,438	1634,28	1620,41	1630,2	94,39379
23,35256	-2042,34	-288,166	1620,6	1607,72	1618,29	94,48138
23,63979	-2085,97	-290,894	1612,45	1600,96	1609,99	94,61047
24,02374	-2155,84	-293,735	1598,17	1586,83	1595,54	94,69758
24,36086	-2217,22	-286,696	1585,35	1574	1583,94	94,78253
24,55136	-2243,61	-289,057	1580	1567,83	1577,19	94,86551
24,87649	-2305,48	-291,636	1563,97	1554,69	1563,71	94,94905
25,18766	-2359,42	-298,031	1553,37	1541,4	1550,59	95,03211
25,48284	-2414,23	-303,949	1536,36	1527,57	1536,35	95,11325
25,65241	-2442,14	-308,199	1531,38	1519,65	1527,53	95,15454
25,95557	-2509,05	-323,01	1510,14	1496,27	1505	95,27699
26,18995	-2548,86	-330,466	1493,71	1479,98	1489,67	95,35905
26,57893	-2632,85	-362,914	1446,42	1438,04	1448,29	95,43906
26,97584	-2726,1	-407,976	1369,26	1360,43	1372,74	95,55596
26,97584	-2726,1	-407,976	1369,26	1360,43	1372,74	95,55596
27,39176	-2833,18	-470,666	1181,4	1175,09	1189,03	95,63418
27,50246	-2876,34	-473,982	1042,61	1039,49	1051,88	95,71269
27,81261	-2954,94	-351,311	594,55	596,41	604,66	95,78819
28,23847	-2998,77	-48,4571	122,01	116,88	120,01	95,90553
28,75708	-2999,16	-2,53864	42,17	45,86	47,86	96,00528
28,94461	-2999,34	-2,66187	47,44	50,63	50,58	96,06742



29,02835	-2998,97	-3,5345	51,35	52,68	50,43	96,0977
29,44424	-2999,09	-3,95984	55,74	55,49	52,78	96,15715
29,64673	-2999,12	-4,75863	56,93	55,54	52,9	96,2148
30,0307	-2999,09	-3,45777	55,68	54,78	53,13	96,26884
30,29102	-2999,02	-3,51824	53,79	54,36	53,59	96,32048
30,64904	-2999,01	-3,8041	55,67	55,1	53,85	96,36941
30,95222	-2999,07	-3,7371	53,8	54,24	53,98	96,4365
31,18761	-2999,05	-3,86721	53,79	54,44	53,99	96,47644
31,48281	-2999,06	-3,49285	54,06	54,32	54,02	96,52325
31,78199	-2999,05	-3,91947	53,68	54,41	54,24	96,56765
32,04032	-2999,07	-4,00524	54,73	54,6	54,23	96,58882
32,29661	-2999,08	-4,60181	54,87	54,74	54,18	96,62972
32,48314	-2999,06	-3,19621	54,24	54,64	54,08	96,66786
32,77832	-2999,1	-3,49631	54,5	54,53	54,03	96,70432
33,16033	-2999,07	-3,61375	55	54,47	53,88	96,73899
33,3468	-2999,05	-4,2085	54,99	54,95	54,55	96,77217
33,63304	-2999,08	-4,31698	54,35	54,53	54,34	96,78823
34,00903	-2999,04	-4,77517	54,25	54,54	54,39	96,83377
34,23842	-2999,12	-4,89835	54,46	54,54	54,46	96,86299
34,42991	-2999,09	-4,6539	54,35	54,42	54,34	96,87692
34,63137	-2999,07	-5,46023	54,36	54,52	54,28	96,9036
35,00839	-2999,15	-3,49401	54,54	54,69	54,09	96,92928
35,27766	-2999,08	-3,61783	54,44	54,65	54,13	96,9537
35,43422	-2999,1	-4,09807	54,82	54,43	54,28	96,96535
35,83318	-2999,11	-4,16807	54,25	54,18	54,29	96,99923
36,17424	-2999,06	-3,23538	54,2	54,62	54,68	97,03162

**Tabulka 21:** Měření brzdění protiproudem při 100 V

t [s]	n [ot/min]	M [N.m]	$I_U$ [A]	$I_V$ [A]	$I_W$ [A]	T [°C]
0	2998,06	6,59586	38,33	36,61	37,24	100,2037
0,280282	2998,35	3,18977	38,36	36,82	37,36	100,2006
0,398964	2998,05	5,23134	37,95	36,7	37,28	100,1977
0,585445	2998	7,31513	38,12	36,83	37,32	100,1914
0,657243	2998	2,56409	38,16	36,82	37,47	100,1914
0,819835	2998,04	3,76481	38,03	36,54	37,15	100,1852
0,999327	2997,98	0,379854	38,14	36,46	37,43	100,1852
1,188819	2997,97	-0,07741	38,01	36,61	37,1	100,1787
1,284564	2998,28	6,33196	38,1	36,78	37,32	100,1787
1,482035	2998	-1,48444	38,22	36,62	37,27	100,1724

1,66059	2998	6,59781	38,38	37	37,37	100,1694
1,823123	2997,99	8,03583	38,45	36,57	37,52	100,1663
1,929839	2998,07	5,08564	38	36,54	37,38	100,163
2,077475	2998,02	7,03118	38,27	36,66	37,17	100,1602
2,284889	2997,98	-2,40219	37,94	36,51	37,16	100,1573
2,397587	2998,05	-1,98219	38,21	36,79	37,33	100,1544
2,589101	2998,04	2,33629	38,39	36,66	37,2	100,1482
2,660883	2997,99	-2,96019	38,46	36,46	37,21	100,1451
2,925189	2997,96	-0,13793	37,99	36,49	37,43	100,1425
2,999975	2997,98	8,26574	37,28	36,34	37,34	100,1398
3,189468	2997,97	2,97216	37,71	36,72	37,15	100,137
3,189468	2997,97	2,97216	37,71	36,72	37,15	100,137
3,585409	2997,94	4,40862	38,09	36,92	37,4	100,1285
3,657248	2997,99	8,4694	38	36,88	37,14	100,1255
3,92453	2998,04	5,69704	38,04	36,9	37,22	100,1228
4,080086	2998,01	8,42188	37,71	36,68	36,98	100,12
4,186827	2998,04	4,96162	38,25	37,05	37,39	100,1168
4,400231	2997,97	2,97775	37,94	36,84	37,39	100,1144
4,587754	2998,04	5,50964	38,29	37,08	37,03	100,1087
4,659536	2997,99	-2,73255	38,21	36,91	37,04	100,1059
4,927848	2997,99	-2,4781	38,17	36,79	37,08	100,103
5,077419	2998,01	-3,76056	38,28	36,77	37,18	100,0999
5,284869	2995,54	-53,4398	387,41	396,31	414,27	100,0907
5,484339	2985,82	-122,811	1056	1163,73	1214,41	100,0849
5,832399	2951,09	-187,347	1405,01	1402,49	1407,35	100,0853
5,941138	2938,97	-193,994	1428,47	1427,85	1432,27	100,0851
6,206398	2901,84	-201,943	1456,37	1457,22	1456,49	100,0864
6,301172	2889,17	-204,913	1457,3	1456,61	1457,01	100,087
6,532526	2863,69	-206,502	1455,71	1453,43	1454,25	100,0893
6,688111	2844,53	-208,352	1453,33	1451,74	1452,45	100,0893
6,843721	2825,24	-208,763	1451,44	1448,93	1452,17	100,0924
7,032221	2799,58	-204,853	1447,38	1443,68	1448,05	100,0924
7,228665	2773,97	-205,785	1443,05	1439,51	1443,47	100,0975
7,348372	2761,17	-205,904	1440,92	1436,15	1442,06	100,0975
7,541853	2729,13	-206,53	1437,96	1433,65	1438,94	100,1041
7,626599	2723,02	-209,603	1438,35	1432,89	1438,86	100,1077
7,849026	2690,59	-206,044	1432,2	1429,89	1433,81	100,118
8,044482	2671,36	-209,445	1431,64	1427,34	1433,39	100,1298
8,25395	2639,3	-209,069	1427,24	1424,5	1429,99	100,1421
8,578054	2600,86	-208,531	1422,93	1420,37	1426,1	100,151

8,87925	2562,3	-208,366	1419,11	1417,26	1422,29	100,163
9,071734	2536,64	-206,414	1417,41	1415,47	1420,86	100,1764
9,471665	2485,4	-207,24	1414,36	1410,9	1416,07	100,192
9,804774	2446,82	-207,484	1410,52	1408,06	1413,72	100,2105
10,07405	2408,38	-207,381	1407,23	1404,99	1410,82	100,2298
10,27651	2382,69	-207,756	1406,3	1404,13	1409,65	100,2408
10,47401	2357,07	-208,568	1405,58	1400,84	1406,99	100,2626
10,65253	2331,4	-208,583	1402,43	1398,02	1404,86	100,274
10,65253	2331,4	-208,583	1402,43	1398,02	1404,86	100,274
10,99459	2292,84	-205,588	1398,56	1395,75	1402,34	100,2977
11,28182	2254,37	-210,076	1396,1	1393,4	1399,97	100,3229
11,39552	2241,77	-206,776	1395,38	1391,95	1398,42	100,3368
11,65884	2203,06	-208,458	1390,51	1387,44	1395,15	100,3654
11,89319	2177,3	-211,412	1389,53	1387,73	1393,28	100,3943
12,1904	2138,89	-211,971	1387,55	1383,32	1390,69	100,4234
12,28115	2126,04	-203,175	1386,82	1382,23	1389,42	100,4234
12,48364	2100,43	-201,577	1384,1	1379,84	1387,07	100,455
12,65817	2074,82	-201,003	1381,35	1377,32	1384,69	100,4704
12,92844	2042,73	-215,241	1380,28	1375,26	1383,25	100,5015
13,08301	2023,5	-213,818	1377,36	1374,07	1380,76	100,5186
13,40418	1978,65	-210,174	1374,98	1370,44	1378,44	100,5509
13,48394	1972,23	-198,057	1372,97	1369,88	1377,14	100,5856
13,78715	1940,42	-198,032	1375,57	1373,64	1363,99	100,6022
14,00257	1901,74	-211,269	1368,31	1363,35	1370,81	100,6197
14,28881	1869,79	-221,792	1365,09	1361,81	1368,21	100,6556
14,40547	1850,64	-203,532	1364,69	1358,93	1367,05	100,6731
14,66979	1818,6	-197,209	1360,97	1356,86	1364,27	100,7067
14,82637	1799,42	-221,625	1357,39	1354,77	1362,39	100,7247
15,08665	1767,43	-197,89	1356,73	1351,7	1358,51	100,7629
15,28611	1741,88	-216,204	1353,72	1349,54	1357,21	100,7992
15,67607	1690,96	-191,771	1348,63	1343,46	1351,49	100,8376
16,00918	1646,15	-185,468	1344,47	1339,95	1348,42	100,8748
16,29444	1614,32	-213,783	1338,31	1333,92	1342,34	100,9301
16,68437	1563,86	-222,492	1331,19	1321,95	1330,69	100,9893
17,0245	1519,85	-224,054	1315,76	1307,59	1317,2	101,0275
17,43238	1470,25	-216,083	1297,74	1288,42	1298,78	101,086
17,84626	1416,19	-166,317	1256,67	1246,64	1252,65	101,1247
17,95599	1404,56	-225,125	1248,75	1242,67	1246,54	101,1441
17,95599	1404,56	-225,125	1248,75	1242,67	1246,54	101,1441
18,43971	1353,1	-175,307	1254,88	1254,3	1260,2	101,2017

18,6272	1329,89	-197,35	1272,18	1268,48	1272,78	101,2391
18,85658	1299,79	-186,289	1284,05	1282,24	1285,44	101,2792
19,04309	1281,86	-184,893	1287,98	1285,48	1291,17	101,2989
19,38116	1238,79	-226,934	1296,48	1292,03	1298,05	101,3397
19,64448	1207,98	-196,458	1295,85	1292,08	1300,69	101,3973
20,05635	1152,22	-201,352	1295,51	1291,65	1298,56	101,4375
20,25385	1127,43	-200,623	1296,2	1290,99	1298,35	101,4572
20,57696	1090,27	-202,44	1291,43	1286,78	1294,33	101,5168
20,6488	1077,91	-203,37	1291,36	1285,98	1293,67	101,5168
20,87815	1053,07	-200,098	1286,63	1282,39	1289,7	101,5552
21,06964	1028,43	-202,458	1287,8	1283,13	1290,88	101,5951
21,39078	991,432	-200,55	1284,8	1279,89	1287,5	101,6146
21,57728	966,877	-203,183	1282,3	1277,22	1285,3	101,6554
21,88347	930,084	-197,615	1276,69	1272,98	1281,25	101,6961
22,07695	905,702	-196,595	1274,77	1271,08	1278,57	101,7159
22,27841	881,385	-194,64	1274,09	1268,28	1276,42	101,7557
22,65643	832,962	-201,493	1269,51	1264,69	1271,79	101,795
22,9267	802,738	-203,343	1264,84	1260,9	1268,6	101,8342
23,07727	784,721	-203,239	1263,75	1258,57	1266,34	101,8548
23,39645	742,742	-193,87	1258,99	1254,07	1262,68	101,8962
23,58992	724,741	-193,582	1256,73	1252,59	1259,86	101,9368
23,82527	700,668	-194,677	1254,71	1251	1258,43	101,9791
24,08358	664,158	-203,351	1253,31	1247,22	1255,72	101,9986
24,28604	639,243	-206,756	1246,99	1242,23	1250,06	102,0196
24,49052	613,54	-210,945	1239,48	1233,61	1241,9	102,0619
24,67802	589,328	-167,027	1215,3	1209,35	1217,44	102,1021
24,9363	570,627	-110,773	1219,29	1215,85	1223,64	102,1228
25,09288	558,268	-150,072	1226,85	1222,51	1229,76	102,1429
25,29437	540,333	-152,844	1228,92	1224,13	1231,37	102,1842
25,52874	516,886	-157,979	1228,85	1224,08	1230,78	102,2266
25,83592	488,216	-155,154	1227,63	1223,15	1229,65	102,2669
26,2089	449,501	-159,27	1226,21	1221,18	1227,94	102,3073
26,43033	430,1	-157,936	1224,74	1218,78	1225,07	102,3271
26,68861	405,855	-159,71	1222,48	1215,73	1223,9	102,3668
26,94991	376,79	-158,705	1220,23	1213,8	1221,02	102,4069
27,34486	343,097	-157,679	1217,25	1210,89	1217,82	102,4654
27,62214	314,38	-155,653	1216,2	1209,34	1214,69	102,505
28,04302	276,021	-155,537	1211,16	1204,81	1211,15	102,5444
28,24847	252,491	-150,283	1208,32	1203,96	1208,85	102,5841
28,45791	233,79	-149,894	1207,24	1201,32	1208,63	102,6223

28,80099	205,671	-156,456	1205,73	1199,2	1205,57	102,6617
28,88076	196,145	-130,686	1201,88	1196,97	1205,13	102,6811
29,0593	177,136	-172,102	1205,81	1197,92	1204,99	102,7203
29,4592	142,241	-83,4488	1194,75	1187,76	1193,82	102,7595
29,80029	115,228	-143,755	1196,26	1191,93	1197,06	102,7982
30,07057	88,1465	-170,182	1194,76	1190,04	1194,91	102,8576
30,4695	51,725	-146,782	1191,8	1186,86	1190,57	102,8962
30,80461	24,6058	-146,027	1191,29	1182,42	1188,73	102,9349
31,07688	2,0877	-144,828	1193,83	1171,24	1188,23	102,9732
31,4788	-37,7982	-144,611	1183,68	1175,08	1184,84	103,0304
31,82291	-68,6494	-144,096	1179,65	1172,46	1181,92	103,0693
32,08219	-90,5504	-142,792	1178,11	1171,81	1178,29	103,1076
32,28866	-107,919	-142,621	1175,57	1169,01	1177,6	103,1264
32,48411	-125,235	-141,631	1175,01	1167,18	1175,99	103,1641
32,67061	-142,549	-140,74	1173,27	1166,61	1174,62	103,2009
33,00574	-172,739	-140,783	1171,02	1162,95	1170,3	103,2198
33,19724	-185,566	-140,16	1170,13	1163,12	1167,96	103,2577
33,40365	-207,013	-139,205	1165,44	1160,04	1165,96	103,2774
33,59115	-224,065	-139,603	1166,67	1159,74	1163,83	103,3151
33,67493	-228,327	-138,859	1166,38	1157,44	1164,91	103,3336
34,00804	-257,961	-137,206	1164,79	1155,83	1162,89	103,3522
34,2933	-279,072	-131,396	1160,98	1153,98	1161,35	103,4088
34,67824	-312,949	-135,29	1158,19	1150,13	1158,13	103,4457
34,99043	-338,181	-133,212	1153,97	1147,44	1153,54	103,4829
35,1809	-354,928	-136,412	1152,56	1145,39	1151,61	103,5199
35,38937	-371,754	-138,995	1150,54	1143,38	1151,3	103,5383
35,65266	-397,05	-140,84	1147,08	1139,43	1146,97	103,5767
35,95885	-422,619	-142,157	1140,89	1134,79	1141,65	103,6128
36,276	-446,222	-117,245	1141,38	1134,01	1139,83	103,6491
36,58215	-468,278	-122,998	1141,78	1135,11	1141,21	103,704
36,58215	-468,278	-122,998	1141,78	1135,11	1141,21	103,704
36,99507	-502,519	-133,012	1137,65	1131,21	1137,03	103,7411
36,99507	-502,519	-133,012	1137,65	1131,21	1137,03	103,7411
37,39996	-529,343	-132,76	1136,25	1129,38	1134,63	103,8139
37,65927	-552,313	-125,815	1132,69	1125,94	1131,34	103,8502
37,99936	-579,187	-133,215	1129,68	1124,1	1129,72	103,8684
38,28463	-598,333	-120,597	1129,2	1123,24	1128,25	103,9217
38,66857	-628,747	-116,309	1126,17	1119,02	1124,5	103,9574
38,92688	-647,815	-126,357	1123,8	1116,24	1123,14	103,9932
39,19616	-666,599	-123,869	1120,66	1114,02	1119,83	104,0289

39,40461	-685,531	-125,629	1118,45	1112,32	1117,44	104,0641
39,82647	-715,669	-115,778	1115,83	1109,54	1114,38	104,0979
40,00802	-730,573	-126,151	1114,61	1107,72	1112,82	104,115
40,20346	-745,628	-123,658	1115,03	1107,7	1113,16	104,1502
40,41992	-760,316	-127,897	1112,16	1104,12	1109,46	104,1673
40,67823	-778,964	-123,441	1109,38	1101,47	1106,86	104,2195
41,02128	-804,952	-117,06	1107,37	1099,12	1104,93	104,2545
41,42423	-834,584	-125,949	1104,1	1095,25	1100,8	104,3061
41,68251	-852,969	-113,296	1101,51	1093,66	1099,1	104,3226
42,13233	-886,164	-126,795	1099,52	1088,72	1095,31	104,3735
42,43053	-908,041	-112,964	1095,82	1088,01	1091,94	104,4264
42,76065	-930,14	-126,841	1088,36	1092,68	1087,65	104,4604
43,13961	-959,137	-106,661	1089,56	1080,86	1087,32	104,51
43,53954	-988,081	-123,338	1085,83	1077,77	1082,99	104,56
43,94947	-1020,52	-106,774	1080,74	1073,27	1079,44	104,5931
44,25465	-1041,92	-114,765	1077,79	1069,22	1073,98	104,6253
44,6496	-1070,3	-115,377	1072,5	1065,75	1069,89	104,6767
44,9867	-1091,62	-121,648	1070,72	1062,23	1067,26	104,7103
45,2729	-1112,67	-108,11	1067,04	1058,18	1063,56	104,7589
45,64893	-1140,61	-120,695	1061,77	1051,6	1057,46	104,7917
45,88327	-1154,4	-120,125	1058,38	1049,18	1054,62	104,826
46,07376	-1168,16	-112,515	1053,08	1043,91	1052,03	104,8423
46,27522	-1181,72	-107,354	1048,82	1039,35	1046,43	104,8752
46,65421	-1208,28	-108,867	1040,16	1030,15	1037,34	104,9074
46,99829	-1230,98	-107,058	1027,46	1014,05	1024,72	104,9388
47,18878	-1240,44	-106,147	1022,56	1007,59	1019,04	104,9702
47,40321	-1255,87	-100,13	1016,16	996,53	1009,2	104,9849
47,6685	-1270,96	-94,4006	1009,46	989,5	1003,55	105,0157
47,82508	-1277	-94,2191	1007,94	987,09	1002,52	105,0463
48,08438	-1295,24	-108,565	1013,38	989,66	1005,53	105,0776
48,40553	-1316,53	-96,8017	1019,38	995,93	1012,25	105,0936
48,59303	-1329,11	-113,408	1020,87	1001,29	1016,71	105,1242
48,93613	-1348,17	-106,748	1028,49	1007,93	1021,88	105,1536
49,09269	-1357,95	-112,98	1027,66	1013,32	1027,92	105,1829
49,29315	-1370,86	-102,639	1030,59	1014,99	1028,33	105,1829
49,60133	-1393,94	-108,114	1032,38	1019,05	1030,06	105,2295
49,83672	-1407,26	-95,9583	1032,53	1019,82	1030,97	105,2608
50,2077	-1433,55	-122,458	1032,87	1021,34	1030,72	105,2911
50,60966	-1460,12	-94,8828	1031,5	1021,67	1028,27	105,3367
51,0305	-1486,79	-98,8578	1030,16	1019,99	1025,99	105,3672

51,34466	-1506,76	-117,344	1027,51	1016,52	1025,47	105,4103
51,7775	-1533,08	-125,22	1017,61	1021,62	1020,94	105,4546
52,14954	-1562,73	-95,4532	1021,96	1013,12	1018,64	105,4851
52,24924	-1569,38	-114,749	1020,46	1012,19	1018,54	105,4997
52,45772	-1582,48	-94,4133	1021,94	1011,79	1016,75	105,5283
52,64419	-1592,34	-96,1511	1020,11	1010,31	1014,52	105,5421
52,87956	-1608,74	-122,024	1018,27	1008,33	1013,83	105,5716
53,17776	-1628,34	-114,978	1014,8	1005,62	1011,2	105,5997
53,45802	-1647,85	-99,63	1014,08	1005,41	1009,44	105,6281
53,7991	-1667,32	-98,0598	1009,93	1000,19	1005,36	105,6567
53,98563	-1680,34	-109,715	1010,23	1000,03	1005,14	105,6714
54,34966	-1706,05	-92,7195	1006,36	996,66	1001,11	105,7133
54,64886	-1725,33	-118,726	1006,46	994,79	998,52	105,7421
54,98891	-1744,51	-106,008	1001,1	992,25	997,65	105,7689
55,27515	-1763,69	-93,238	1000,18	990,99	995,99	105,7959
55,39486	-1770,07	-94,0085	998,84	990,23	995,33	105,8245
55,65316	-1789,18	-98,9783	996,19	988,54	992,61	105,8514
55,99423	-1808,25	-98,6162	995	985,96	989,57	105,8651
56,28146	-1827,17	-95,454	993,01	983,54	988,67	105,8935
56,39416	-1833,45	-94,0096	991,62	983,24	987,63	105,92
56,65748	-1852,34	-100,24	991,14	981,24	985,62	105,9473
57,07833	-1877,54	-110,301	986,87	976,66	983,26	105,9749
57,39847	-1899,44	-109,96	984,54	976,16	980,66	106,0015
57,39847	-1899,44	-109,96	984,54	976,16	980,66	106,0015
57,81837	-1921,34	-101,57	981,87	972,89	978,38	106,042
58,08164	-1939,97	-110,537	979,35	970,48	976,73	106,0695
58,48257	-1964,76	-109,841	977,06	967,75	971,93	106,11
58,82166	-1986,48	-96,0835	975,04	965,28	971,29	106,1498
59,1927	-2008,08	-106,76	970,84	962,22	967,73	106,1766
59,59064	-2032,67	-97,3769	967,89	959,78	964,64	106,2156
60,00652	-2060,35	-107,427	965,95	956,99	961,65	106,2416
60,40446	-2084,87	-102,197	963,4	954,88	959,34	106,2814
60,58895	-2094,11	-106,903	962,12	954,1	958,6	106,3063
60,79242	-2106,4	-106,733	961,26	952,03	957,72	106,3187
61,00186	-2121,71	-103,573	957,41	949,21	953,72	106,3449
61,28807	-2137,02	-100,325	956,4	947,49	952,29	106,3717
61,67004	-2161,53	-105,599	952,97	944,36	948,69	106,4107
62,08494	-2186,1	-99,0828	950,88	941,48	947,26	106,4502
62,59958	-2219,84	-100,985	945,3	936,76	941,87	106,4874
62,94267	-2238,33	-104,048	942	934,98	939,72	106,5124

63,20397	-2256,83	-104,739	940,09	932,05	938,31	106,537
63,29969	-2259,91	-104,75	939,02	932,57	937,15	106,5499
63,68568	-2284,65	-104,605	936,92	929,76	934,38	106,5755
63,84124	-2294,28	-104,545	935,82	928,27	933,09	106,5992
64,1295	-2312,73	-103,78	932,6	925,8	930,14	106,6226
64,42867	-2331,48	-105,518	930,6	923,17	927,74	106,6468
64,84358	-2359,88	-105,141	926,61	918,38	923,56	106,6823
65,23352	-2382,13	-106,513	924,19	915,68	919,85	106,7062
65,436	-2394,93	-107,237	922,45	914,49	918,51	106,7304
65,62247	-2408,07	-108,032	920,05	912,69	915,28	106,7549
66,1461	-2443,67	-110,286	913,11	905,86	910,83	106,7905
66,45924	-2463,52	-111,248	909,16	902,61	907,35	106,814
66,64374	-2476,87	-111,482	908,64	900,04	904,5	106,8259
66,87911	-2490,41	-113,803	904,36	896,79	902,11	106,8489
66,87911	-2490,41	-113,803	904,36	896,79	902,11	106,8489
67,27505	-2517,76	-114,254	897,54	891,38	896,47	106,8836
67,65307	-2545,73	-117,319	891,86	886,02	889,93	106,9063
67,88758	-2560,08	-121,578	888,19	882,03	887,41	106,9289
68,18578	-2581,86	-123,278	883,34	877,22	881,98	106,951
68,28052	-2589,23	-124,394	881,42	875,17	879,35	106,9622
68,66051	-2619,39	-126,518	871,87	865,93	870,68	106,984
69,00259	-2646,81	-134,119	863,15	855,59	861,01	107,0061
69,28384	-2667,25	-138,069	853,42	847,08	852,27	107,0277
69,40352	-2679,33	-137,097	849,35	842,18	846,47	107,0498
69,9351	-2722,33	-149,264	825,32	818,08	823,58	107,0825
70,4208	-2768,4	-161,018	788,4	782,85	788,65	107,115
70,68609	-2792,76	-162,98	764,38	758,44	764,39	107,1361
70,83769	-2807,91	-166,507	745,25	740,01	746,24	107,1573
71,22864	-2849,53	-175,204	679,54	675,4	681,92	107,178
71,43309	-2871,14	-179,018	635,18	630,73	636,68	107,1983
71,84998	-2917,51	-161,298	494,41	491,74	497,48	107,2267
72,14721	-2944,52	-134,879	378,45	375,05	380,39	107,2443
72,38855	-2959,26	-110,746	299,35	293,92	300,24	107,2529
72,64884	-2975,62	-77,4951	196,66	192,82	198,13	107,2682
72,80542	-2979,7	-66,3398	169,01	165,03	170,45	107,2821
73,1864	-2990,39	-37,8778	103,48	100,01	102,92	107,295
73,48262	-2993,91	-17,1737	52,72	49,32	53,96	107,306
73,82669	-2996,26	-9,85451	44,59	44,82	48,73	107,3153
73,9334	-2996,42	-9,63475	43,4	43,5	47,22	107,3196
74,29344	-2997,23	-5,58713	39,08	38,86	42,26	107,3276



74,52781	-2997,49	-5,40312	36,03	37,84	40,3	107,3348
74,83399	-2997,65	-3,91812	36,27	37,92	39,16	107,3418
75,20301	-2997,78	-4,06923	36,77	37,79	37,9	107,352
75,42541	-2997,8	-4,72616	36,96	37,52	37,24	107,3553
75,60593	-2997,84	-4,37597	37,47	37,41	37,17	107,3624
75,8413	-2997,8	-3,6595	36,85	36,81	36,75	107,3704
76,12953	-2997,83	-3,94157	37,31	36,8	36,64	107,3734
76,53445	-2998,14	-5,17666	37,28	36,62	36,92	107,3888

**Tabulka 22:** Měření brzdění stejnosměrným proudem

t [s]	M [N.m]	n [ot/min]	I <sub>U</sub> [A]	U <sub>A</sub> [V]
0	3,27106	2999,95	179,87	-0,316
0,250303	3,52564	2999,93	179,95	0,517
0,406919	3,52564	2999,93	179,95	0,517
0,609343	3,52564	2999,93	179,95	0,517
0,737998	3,5583	2999,94	181,16	-0,315
0,89858	3,5583	2999,94	181,16	-0,315
1,106041	3,5583	2999,94	181,16	-0,315
1,338418	3,2975	2999,96	180,19	0,52
1,501976	3,2975	2999,96	180,19	0,52
1,830178	3,37752	2999,97	180,03	-0,317
2,00162	3,37752	2999,97	180,03	-0,317
2,00162	3,37752	2999,97	180,03	-0,317
2,251977	3,45493	2999,97	180,28	0,516
2,406537	3,45493	2999,97	180,28	0,516
2,609023	3,45493	2999,97	180,28	0,516
2,833395	-8,52467	2997,9	0	0,441
2,833395	-8,52467	2997,9	0	0,441
3,101701	-8,52467	2997,9	0	0,441
3,101701	-8,52467	2997,9	0	0,441
3,480692	-6,9899	2994,53	0	1,139
3,480692	-6,9899	2994,53	0	1,139
3,480692	-6,9899	2994,53	0	1,139
3,480692	-6,9899	2994,53	0	1,139
4,210738	-5,63162	2989,82	0	-1,258
4,30047	-5,63162	2989,82	0	-1,258
4,401202	-5,63162	2989,82	0	-1,258
4,401202	-5,63162	2989,82	0	-1,258
4,812129	-4,59214	2987,2	0	-0,647

4,812129	-4,59214	2987,2	0	-0,647
4,812129	-4,59214	2987,2	0	-0,647
5,450394	-4,45423	2983,38	0	0,4437
5,700752	-4,45423	2983,38	0	0,4437
5,700752	-4,45423	2983,38	0	0,4437
6,000936	-3,99093	2981,13	0	-0,4253
6,200419	-3,99093	2981,13	0	-0,4253
6,200419	-3,99093	2981,13	0	-0,4253
6,620265	-3,68959	2978,87	0	-0,9308
6,620265	-3,68959	2978,87	0	-0,9308
6,620265	-3,68959	2978,87	0	-0,9308
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
7,150876	-3,55996	2975,43	0	-0,616
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887
9,622235	-80,279	2872,8	1006,96	-4,887



18,81963	-84,7733	2392,43	1006,34	-4,9
18,81963	-84,7733	2392,43	1006,34	-4,9
18,81963	-84,7733	2392,43	1006,34	-4,9
18,81963	-84,7733	2392,43	1006,34	-4,9
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
24,71789	-87,5793	2073,04	1006,96	-4,909
26,98479	-88,739	1947,22	1007,16	-4,912
26,98479	-88,739	1947,22	1007,16	-4,912
26,98479	-88,739	1947,22	1007,16	-4,912
26,98479	-88,739	1947,22	1007,16	-4,912
28,08787	-89,3545	1884,24	1005,2	-4,9
28,08787	-89,3545	1884,24	1005,2	-4,9
28,08787	-89,3545	1884,24	1005,2	-4,9
28,08787	-89,3545	1884,24	1005,2	-4,9
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915

29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
29,1889	-89,8221	1822,92	1006,83	-4,915
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
34,82086	-92,3701	1507,26	1006,67	-4,921
40,25131	-94,8522	1177,67	1007,88	-4,928
40,61037	-94,8522	1177,67	1007,88	-4,928
40,83176	-94,7924	1148,38	1007,83	-4,922
41,00233	-94,7924	1148,38	1007,83	-4,922
41,25064	-94,9922	1118,78	1007,78	-4,922
41,6107	-94,9922	1118,78	1007,78	-4,922
42,00066	-95,227	1089,66	1007,7	-4,923
42,25099	-95,3588	1059,95	1007,67	-4,923
42,41153	-95,3588	1059,95	1007,67	-4,923
42,73866	-95,9066	1030,71	1007,67	-4,925
43,00098	-95,9066	1030,71	1007,67	-4,925
43,40491	-95,7093	1000,86	1007,59	-4,919
43,61035	-95,7093	1000,86	1007,59	-4,919
43,90357	-95,9828	971,48	1007,57	-4,924
44,10104	-95,9828	971,48	1007,57	-4,924
44,40719	-96,2668	941,486	1006,73	-4,924
44,61065	-96,2668	941,486	1006,73	-4,924
44,9009	-96,5835	911,944	1007,21	-4,929

45,10134	-96,5835	911,944	1007,21	-4,929
45,41051	-96,8388	881,807	1007,18	-4,927
45,73865	-97,2871	852,081	1007,16	-4,931
46,10667	-97,2871	852,081	1007,16	-4,931
46,10667	-97,2871	852,081	1007,16	-4,931
46,50062	-97,6735	821,723	1007,13	-4,927
46,83173	-98,0663	791,785	1007,11	-4,918
47,10101	-98,0663	791,785	1007,11	-4,918
47,40717	-98,7374	761,146	1007,16	-4,938
47,61062	-98,7374	761,146	1007,16	-4,938
47,90087	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
48,10134	-99,135	730,89	1007,21	-4,932
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
49,61626	-101,625	630,457	1006,95	-4,939
55,08563	-172,603	224,201	1005,53	-4,946
55,08563	-172,603	224,201	1005,53	-4,946
55,08563	-172,603	224,201	1005,53	-4,946
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848

56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
56,18771	-414,491	-59,1721	1004,23	-5,848
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
58,36289	-3,61274	-0,87337	1006,59	-4,95
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
59,47492	0,077694	0,402726	1006,61	-4,947
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
60,62085	1,48583	0,168709	1006,64	-4,94
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951

62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
62,88579	0,422405	0,160891	1006,64	-4,951
68,99145	3,3875	0,347232	0	0,5509
68,99145	3,3875	0,347232	0	0,5509
68,99145	3,3875	0,347232	0	0,5509
69,82121	0,200009	0	0	0,3895
69,82121	0,200009	0	0	0,3895
69,82121	0,200009	0	0	0,3895
70,70086	0,277296	-0,28707	0	0,2838
71,10079	0,216763	0	0	0,2335
71,35213	0,234181	0	0	0,1919
71,44387	0,234181	0	0	0,1919
71,83785	0,305001	0	0	0,1578
72,10015	0,305001	0	0	0,1578
72,43725	0,246402	0	0	0,1298
72,84514	0,084948	0	0	0,107
72,84514	0,084948	0	0	0,107
73,2002	0,084948	0	0	0,107
73,69984	0,232576	0	0	0,0882
74,09977	0,164758	0	0	0,0728
74,54159	0,096552	0	0	0,0601
74,83882	0,312618	0	0	0,0497
75,00036	0,312618	0	0	0,0497
75,34943	0,21327	0	0	0,0412
75,4362	0,21327	0	0	0,0412
75,60873	0,21327	0	0	0,0412
76,00171	0,081501	0	0	0,0342