

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ RYCHLOSTI A POLOHY
STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR KAKÁČ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ RYCHLOSTI A POLOHY STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU

SENSORLESS CONTROL OF REVOLUTIONS AND POSITION OF DC MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR KAKÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV PRAJZNER

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Petr Kakáč

ID: 136533

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Bezsenzorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s různými typy stejnosměrných kartáčových motorů malých výkonů na malé napětí a s běžnými způsoby jejich řízení. Navrhnete systém pro řízení polohy a rychlosti otáčení, na základě kompenzace známých motorových charakteristik a ověřte, že pracuje spolehlivě za všech podmínek. Uvažte vliv napájecího napětí (velikost, rušení, zvlnění po usměrnění ze střídavého zdroje) a vliv opotřebení komutátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Products Honeywell. Servopohony pro ventily. [online], 2010, Dostupné z URL:

<http://products.ecc.emea.honeywell.com/cz/ecatdata/pdf_m5410_m5410c1001.html>.

[2] SKALICKÝ, J. Elektrické servopohony. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2001. 86 s. ISBN 80-214-1978-4.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Václav Prajzner

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

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

Tato závěrečná práce se zabývá řízením a regulací stejnosměrných kartáčových motorů, použitých v aktuátorech firmy Honeywell. V úvodu jsou popsány druhy stejnosměrných kartáčových motorů a možnosti jejich regulace. Zvolili jsme metodu kompenzace zatěžovací charakteristiky. Základním požadavkem na tuto práci je požadavek na zajištění konstantních otáček motoru, při různém zatěžovacím momentu. Pro tento požadavek je nutné vytvoření matematického statického modelu motoru, vypočítání, ověření konstant daného motoru a v neposlední řadě také implementace statického modelu na daný motor. Dále se práce zaměřuje na limity takové regulace motoru, případně na omezení, která nám vznikají podmínkami v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stejnoseměrný motor, aktuátor, měření, regulace, řízení

ABSTRACT

This thesis deals with the management and control of DC brush motors used in Honeywell actuators. The introduction describes the types of DC brush motors and possibilities of regulation. We chose the method of compensation of the load characteristics. The basic requirement for this job is a requirement to ensure constant engine speed under various load torque. For this requirement it is necessary to develop a mathematical model of the static engine, calculate, verify that the motor constants and, not least, the implementation of the static model for a given engine. The work focuses on the limits of such an engine control or the limitations that we created conditions in practice.)

KEYWORDS

DC motor, actuator, measurement, regulation, control

KAKÁČ, Petr *Bezsenzorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného kartáčového motoru malého výkonu - metodou kompenzace zatěžovací charakteristiky*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 81 s. Vedoucí práce byl Ing. Václav Prajzner,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezsenzorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného kartáčového motoru malého výkonu - metodou kompenzace zatěžovací charakteristiky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Prajznerovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Aktuátor firmy HONEYWELL	13
1.1 Aktuátor M5410	13
2 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY	14
2.1 Druhy stejnosměrných motorů	14
2.2 Motor s permanentními magnety jeho princip a činnost	15
2.2.1 Konstrukce	15
2.2.2 Princip činnosti	18
2.3 Matematický model motoru	19
2.4 Možnosti regulace:	21
2.4.1 Napájecí můstek	21
3 Model motoru	23
3.1 Typická charakteristika	23
3.2 Změřená charakteristika	24
3.3 Výpočet konstanty motoru	25
3.3.1 Výpočet pro typickou charakteristiku výrobce	25
3.3.2 Výpočet pro typickou změřenou charakteristiku	26
3.4 Ověření konstanty pro typickou charakteristiku výrobce	28
3.4.1 Početně	28
3.4.2 Graficky	28
3.5 Ověření konstanty pro změřenou charakteristiku	32
3.5.1 Početně	32
3.5.2 Graficky	33
4 Měření	34
5 Regulace	40
5.1 Regulační schéma	41
5.2 Řízení	41
6 Aplikace metody	47
7 Diskuse výsledků	49
8 Závěr	51

Literatura	52
Seznam příloh	53
A Seznam příloh, obrázků a tabulek	54
A.1 Tabulky	54
A.2 Grafy	72
A.3 Nový motor 1	72
A.4 Nový motor 2	74
A.5 Motor po 80K cyklu	76
A.6 Motor po 100K cyklu	78

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Aktuátor M5410	13
2.1	Hysterezní křivky pro tři teploty	16
2.2	Závislost indukce na teplotě	16
2.3	Závislost otáček a odporu vinutí na teplotě	17
2.4	Princip motoru-jedna smyčka	18
2.5	Napájecí můstek	22
3.1	Typická charakteristika motoru pro 24V	23
3.2	Typická charakteristika motoru pro 17V; 28°C	24
3.3	Typická charakteristika motoru pro 17V; 68°C	25
3.4	Závislost konstant na teplotě	27
3.5	Rovnice regrese	27
3.6	Závislost otáček a proudu na momentu	29
3.7	Závislost výkonu a účinnosti na momentu	30
3.8	Porovnání zatěž. char. 28°C	33
3.9	Porovnání zatěž. char. 68°C	33
4.1	Závislost otáček na momentu pro t=28°C; nový motor 1,2	34
4.2	Závislost otáček na momentu pro t=68°C; nový motor 1,2	35
4.3	Závislost otáček na momentu pro t=28°C; použitý motor 60K,100K cyklu	35
4.4	Závislost otáček na momentu pro t=68°C; použitý motor 60K,100K cyklu	36
4.5	Závislost otáček na momentu pro t=68°C;průměry motorů	37
4.6	Závislost otáček na momentu pro t=68°C;průměry motorů	37
4.7	Závislost otáček na momentu pro t=28°C,t=68°C;celk. průměr	39
4.8	Závislost otáček na momentu pro t=28°C,t=68°C;celk. průměr	39
5.1	Regulační schéma	41
5.2	Závislost napětí na momentu pro 28°C a troje různé otáčky	42
5.3	Závislost napětí na momentu pro 68°C a troje různé otáčky	43
5.4	Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C	43
5.5	Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$;28°C	45
5.6	Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$;50°C	45
5.7	Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$;60°C	46
6.1	Charakteristika pro 17V	47
6.2	Mapa otáček na momentu 10 - 17V	48
7.1	Porovnání zatěžovacích charakteristik	49
A.1	Zatěžovací charakteristika pro t=28°C	72
A.2	Zatěžovací charakteristika pro t=68°C	73

A.3	Závislost napětí na momentu	73
A.4	Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$	74
A.5	Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$	75
A.6	Závislost napětí na momentu	75
A.7	Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$	76
A.8	Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$	77
A.9	Závislost napětí na momentu	77
A.10	Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$	78
A.11	Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$	79
A.12	Závislost napětí na momentu	79
A.13	Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C	80
A.14	Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C	81

SEZNAM TABULEK

2.1	Závislost otáček a odporu vinutí na teplotě	17
3.1	Ověření konstanty – výpočet chyby	31
3.2	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	32
3.3	Závislost proudu na zatěžovacím momentu	32
4.1	Porovnání průměrů nových a starých motorů	36
4.2	Výsledný průměr motorů	38
4.3	Závislost proudu na momentu změřený průměr	38
5.1	Závislost napětí na momentu	42
5.2	Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$	44
A.1	Hodnoty odečtené z typ. charakteristiky výrobce	54
A.2	Hodnoty vypočítané	55
A.3	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	55
A.4	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	56
A.5	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	56
A.6	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	57
A.7	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	57
A.8	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	58
A.9	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	58
A.10	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	59
A.11	Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu	59
A.12	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	60
A.13	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	60
A.14	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	61
A.15	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	61
A.16	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	62
A.17	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	62
A.18	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	63
A.19	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	63
A.20	Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu	63
A.21	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	64
A.22	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	64
A.23	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	65
A.24	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	65
A.25	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	66
A.26	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	66
A.27	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	67
A.28	Závislost otáček na zatěžovacím momentu	67

A.29 Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu	67
A.30 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	68
A.31 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	68
A.32 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	69
A.33 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	69
A.34 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	70
A.35 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	70
A.36 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	71
A.37 Závislost otáček na zatěžovacím momentu	71
A.38 Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu	71
A.39 Zatěžovací charakteristiky změřeno, bez/s teplotní závislostí	72

ÚVOD

Stejnoseměrný kartáčový motor objevil již v 19. století Michael Farrady. Na praktické využití takového motoru jsme si museli počkat o něco déle.[3]

Jak již název napovídá nedílnou součástí takového motoru jsou právě kartáče. Tyto kartáče jsou největší slabinou motoru. Opotřebením kartáčů klesá výkon takového motoru. Zároveň jsou kartáče zdrojem vysokofrekvenčních rušivých pulzů. Tohoto jevu může být využito pro ovládání, regulaci takového motoru, ale to není cílem této práce. Za předpokladu, že můžeme opotřebením kartáčů zanedbat – a to například jestliže od motoru nepožadujeme nepřetržitý provoz, při kterém by docházelo k velkému opotřebením kartáčů, potom lze říci, že se jedná o velmi jednoduchý a spolehlivý motor.[4] Je proto logické, že si takový motor našel mnohá uplatnění. Hojně je využíván například v automatizaci budov, kde jsou většinou použity motory malých výkonů, které slouží například k ovládání žaluzií, klapek ve vzduchotechnice, případně k ovládání ventilů topení.

V této práci se zabýváme stejnosměrným motorem malého výkonu, který pomocí aktuátoru firmy Honeywell bude ovládat ventil topení. Cílem je docílit plynulé rychlosti otáčení ventilu a tím přibližně konstantní dobu otevření a zavření ventilu. Základní požadavek není kladen na zjištění polohy motoru, ale především na již zmíněnou konstantní dobu otevírání a zavírání. To znamená, že budeme požadovat úplné otevření, případně zavření ventilu.

V praxi lze použít různé způsoby pro řízení takového motoru. Některé možné způsoby si později popíšeme, ale nejdříve je vhodné uvést použitý aktuátor od firmy Honeywell, neboť právě ve spojení s tímto aktuátorem bude motor spojen. Pro tuto práci byl použitý aktuátor M5410 a stejnosměrný motor Mabuchi RK370-C-081050. Veškeré návrhy uvedené v této práci jsou zaměřeny právě na tento typ motoru a aktuátoru, které budou tvořit jeden celek. Pro tento případ jsme zvolili metodu kompenzace zatěžovací charakteristiky. Tato metoda nám umožňuje velice snadno regulovat daný motor a její realizace není náročná na použité součástky. To je jedním z hlavních důvodů zvolení této metody, neboť právě díky své jednoduchosti a nízkým nárokům na součástky, je možné takto regulované ovládání levně vyrobit. Základním požadavkem pro realizaci této metody je zjišťování (snímání) odebíraného proudu motorem. Na základě vyhodnocení odebíraného proudu, případně na základě změny odebíraného proudu, lze zjistit jak musíme upravit napájecí napětí daného motoru. Více bude řečeno v další části.

1 AKTUÁTOR FIRMY HONEYWELL

Nejdříve se obeznámíme s ovládaným aktuátorem, poté si rozebereme jednotlivé druhy stejnosměrných kartáčových motorů a především námi použitý model.

1.1 Aktuátor M5410

Jedná se o aktuátor vyrobený firmou Honeywell, který se používá pro ovládání ventilu topení. Tento aktuátor obsahuje stejnosměrný kartáčový motor, řídicí elektroniku a převodovku s mechanismem pro otevření/zavření ventilu.

Aktuátor M5410 se vyrábí ve dvou variantách napájení:

- M5410C1001 (24Vac)
- M5410L1001 (230Vac)

V našem případě budeme využívat k napájení transformátor s výstupním napětím 24Vac, proto použijeme model M5410C1001.



Obr. 1.1: Aktuátor M5410

Aktuátor M5410C1001 je určen pro dvojpohovou regulaci. Slouží k ovládání malých lineárních ventilů. Používají se pro elektronickou regulaci teplé i studené vody, například v: solárních systémech, ve fan – coilových jednotkách, indukčních jednotkách, ohřivačích, ochlazovačích a pod.

Na aktuátoru jsou tři svorky pro připojení napájení, kdy černá a modrá jsou připojeny trvale a připojením/odpojením hnědého kontaktu měníme směr otáčení.[5]

2 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

2.1 Druhy stejnosměrných motorů

- **Motory s vinutím ve statoru**

U stejnosměrného motoru s nezávislým buzením je budící vinutí napájeno z vlastního zdroje napětí. Proud protékající budícím vinutím je tedy nezávislý na proudu, který protéká kotvou elektromotoru. Otáčky takového elektromotoru můžeme redukovat napětím na kotvě, nebo budícím proudem.

- **Motory s permanentními magnety ve statoru**

Jedná se o speciální případ motorů s cizím buzením. Namísto cívky, která se připojí na zdroj napětí a poté vytváří magnetické pole, v tomto případě ji nahradíme permanentním magnetem. Tím nám odpadá nutnost dalšího zdroje napájení. V tomto případě jsou otáčky regulovány především změnou napětí na kotvě. Touto možností regulace se zabývá moje závěrečná práce.

- **Derivační motory**

Derivační motory mají podobnou konstrukci jako motory s cizím buzením, ale budící vinutí nemá vlastní zdroj napětí. Budící vinutí je paralelně připojeno na vinutí kotvy a tím i na společný zdroj napětí.

- **Motory se sériovým buzením**

U tohoto druhu motoru je budící vinutí připojeno sériově na vinutí kotvy. Proto se velikost magnetického pole určuje z proudu kotvy. Při spuštění a zatížení, vytvoří velký proud velké magnetické pole, tím vznikne velký točivý moment. Tyto motory mají největší moment, ale jsou náchylné k přetočení (pokud nemají zátěž – chod na prázdno není dovolen).

- **Kompandní motory**

Kompandní motory jsou stejnosměrné motory s paralelním i sériovým buzením. Obě buzení zapojujeme tak, aby jejich pole působila souhlasně. Kompandní motory spojují vlastnosti sériových a derivačních motorů a mají využití například u zdvihacích, lisovacích, či válcovacích strojů. Obecně všude tam, kde by rozběhový moment derivačních a nezávisle buzených motorů nedostačoval.

[1]

2.2 Motor s permanentními magnety jeho princip a činnost

V této práci se budeme zabývat regulací stejnosměrného kartáčového motoru se statorem tvořeným z permanentních magnetů. Proto považuji za vhodné na tomto typu motoru vysvětlit jeho činnost a možnosti regulace.

2.2.1 Konstrukce

Motor se skládá z nepohyblivé části – statoru, z pohyblivé části – rotoru a komutátoru.

Stator

Stator je tvořen permanentními magnety. V případě námi použitého motoru je stator z magneticky tvrdých feritových magnetů. Feritové magnety jsou v dnešní době nejpoužívanějším materiálem používaným pro výrobu permanentních magnetů. Magneticky tvrdé ferity dělíme na:

- **Anizotropní:** při jejich výrobě–lisování jsou vystaveny působení magnetického pole. Vykazují dobré vlastnosti pouze v jednom směru.
- **Izotropní:** mají přibližně stejné vlastnosti ve všech směrech magnetování. Při lisování nejsou vystaveny magnetickému působení.

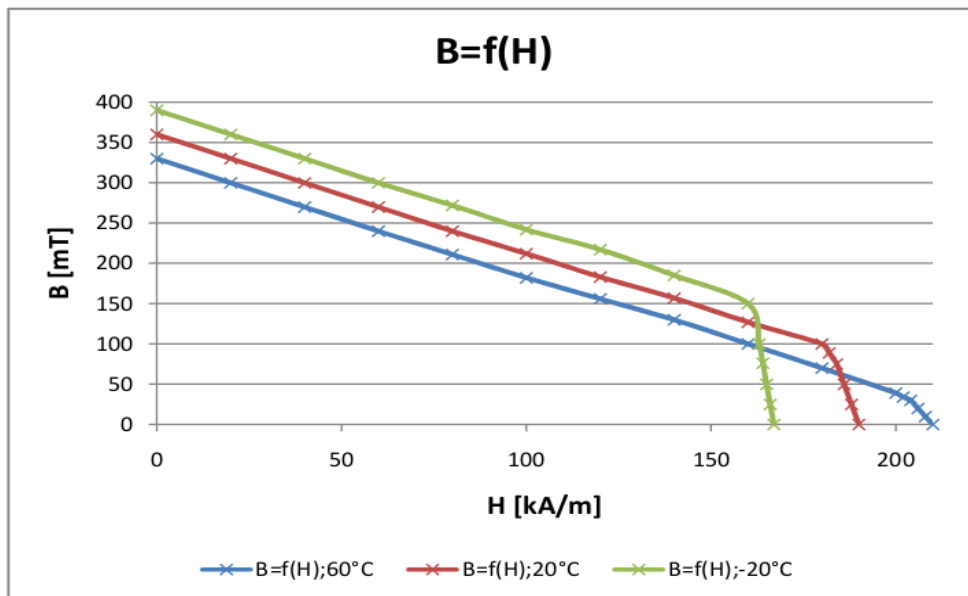
Pro naši práci jsou důležité především magnetické vlastnosti feritů a jejich teplotní závislosti. Pracovní teplota feritů se pohybuje od -40°C až do $+250^{\circ}\text{C}$. Se vzrůstající teplotou klesá remanentní indukce o $0,2\%/Kelvin$, zatímco koerzivní síla magnetického pole roste o $0,3\%/Kelvin$. V našem případě nás bude zajímat především změna remanentní indukce při rostoucí teplotě. Pro názornost uvádíme hysterezní křivku pro tři teploty 2.1a závislost remanentní indukce na teplotě 2.2 [7].

Rotor

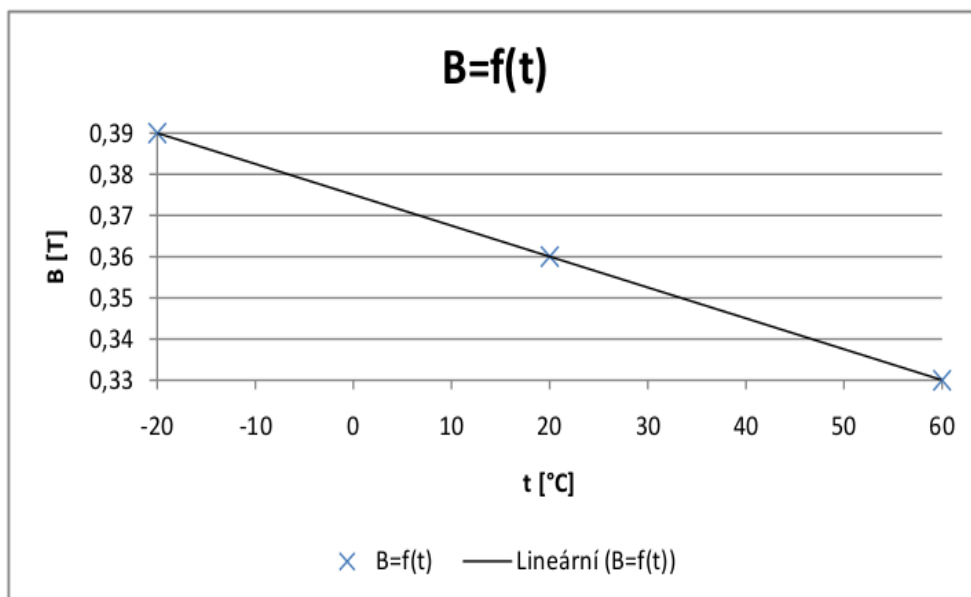
Rotoru se také říká kotva (pro charakteristický tvar). Na kotvě (rotoru) jsou navinuty cívky (vinutí), které jsou vyvedeny na komutátor (rotační přepínač). Jednotlivé cívky jsou navinuty z lakovaného měděného drátu. Pro naše účely je vhodné se blíže seznámit s vlastnostmi daného drátu, které mohou ovlivnit řízení a regulaci našeho motoru. Jedná se především o teplotní závislost, která nám udává o kolik se zvýší odpor vinutí v závislosti na teplotě. Výpočet změny odporu při změně teplotě se vypočítá pomocí vzorce:

$$R_{\theta} = R_{25}[1 + \alpha_{25}(\theta - \theta_{25})] \quad (2.1)$$

Teplotní součinitel mědi má hodnotu: $0,00392[1/\text{K}]$, z katalogového listu známe hodnotu odporu při 25°C a díky tomu si můžeme změnu odporu vypočítat.



Obr. 2.1: Hysterezní křivky pro tři teploty

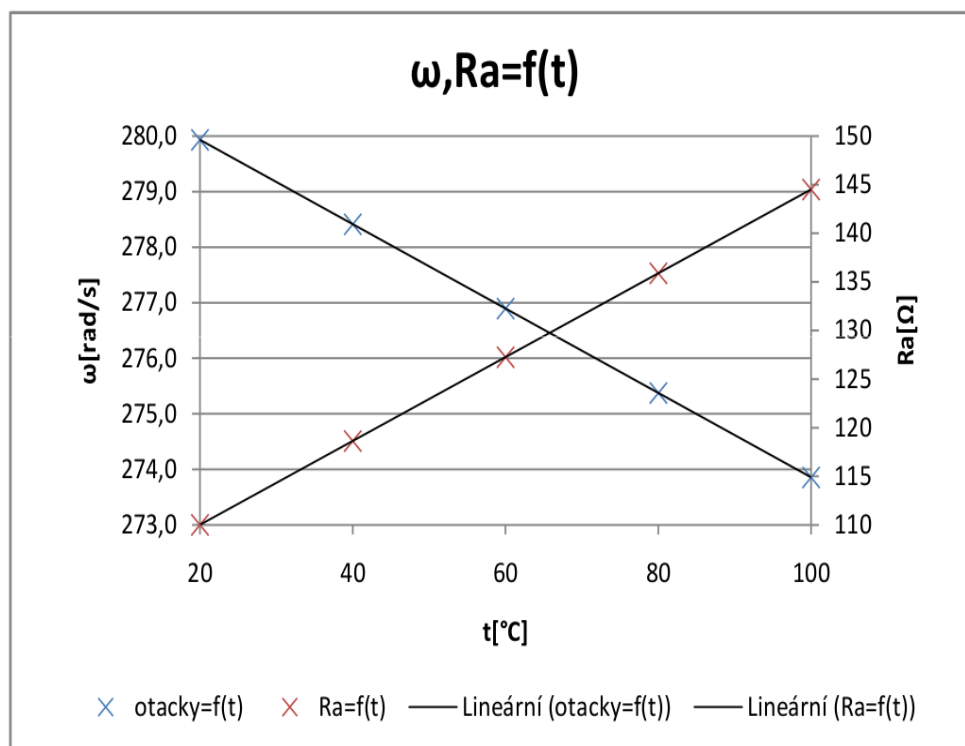


Obr. 2.2: Závislost indukce na teplotě

Pomocí vzorce 2.1 je možné vypočítat závislost odporu vinutí a otáček motoru na teplotě. Vypočítané hodnoty jsou znázorněny v tabulce 2.1 a grafu 2.3. Závislost otáček je znázorněna pro maximální otáčky, pro tzv. otáčky naprázdno, ale v případě zatížení motoru se projeví výrazněji (viz další kapitoly).

Tab. 2.1: Závislost otáček a odporu vinutí na teplotě

Výpočet odporu Ra na teplotě			
t[°C]	Ra[Ω]	ω[rad/s]	ω[1/min]
20	110,00	279,93	2673,14
40	118,62	278,41	2658,65
60	127,25	276,89	2644,15
80	135,87	275,38	2629,65
100	144,50	273,86	2615,15

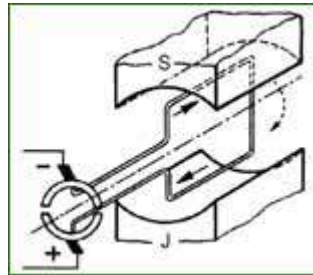


Obr. 2.3: Závislost otáček a odporu vinutí na teplotě

Kartáče: kartáče (nejčastěji uhlíkové) se dotýkají komutátoru a tím při točení motoru zajišťují změnu polaritu vinutí, takže se motor stále točí.

2.2.2 Princip činnosti

Nejvhodnější je představit si princip motoru na elementárním stroji tvořeným jednou smyčkou vinutí v rotoru, umístěnou v poli permanentních magnetů (statoru). To je patrné z obrázku.2.4 [6] [2] Jak je vidět na obrázku, uzavřeným obvodem jednoho



Obr. 2.4: Princip motoru-jedna smyčka

závitu prochází elektrický proud. Vodič se nachází v magnetickém poli, takže na něj působí síla podle vztahu:

$$F = BIl \quad (2.2)$$

kde B je magnetická indukce, I je proud protékající vodičem a l je délka vodiče v magnetickém poli. Směr síly lze určit podle pravidla levé ruky, kde palec ukazuje směr proudu a prsty směr síly. Tím dochází k vychýlení – otáčení motoru.

2.3 Matematický model motoru

Matematický model motoru je dán dvěma základními rovnicemi:

$$U_i = C\Phi\omega \quad (2.3)$$

$$M = C\Phi I \quad (2.4)$$

První říká, že při otáčení úhlovou rychlostí ω , se ve vinutí rotoru indukují napětí. C je konstanta motoru, Φ je magnetický tok. Podle druhé rovnice působením magnetického toku a proudu I vzniká moment síly.

Další rovnice:

$$U = U_i + R_a I \quad (2.5)$$

Tato rovnice nám říká že: Napájecí napětí je dáno indukovaným napětím v motoru a úbytkem napětí na odporu vinutí. Dosazením za U_i, I a vyjádřením otáček ω dostaneme rovnici, která popisuje práci motoru v ustáleném stavu. Zároveň obsahuje všechny proměnné, kterými by se dala úhlová rychlost motoru řídit.

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M \quad (2.6)$$

Pro naši potřebu je vhodné ještě rovnici doplnit o hodnotu odporu R_a a velikost proudu I_0 , které vzorec neuvažoval. Tím nám vznikne výsledná rovnice, kterou později využijeme při výpočtu konstanty $C\Phi$.

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I_0 R_a}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M \quad (2.7)$$

Význam jednotlivých členů:

- ω : otáčky motoru
- U : napájecí napětí
- M : zatěžovací moment
- I_0 : počáteční proud, který motorem protéká, i když motor nevykonává žádnou práci
- R_a : odpor vinutí motoru
- $C\Phi$: konstanta motoru

Pomocí této rovnice je možné vypočítat konstantu $C\Phi$ a díky ní sestavit model motoru reflektující zatěžovací charakteristiku motoru danou výrobcem.

Z důvodu teplotní závislosti některých členů rovnice je nutné rovnici upravit tak, aby se velikost (hodnota) jednotlivých členů závislých na teplotě podle teploty změnila. V případě teplotní závislosti odporu vinutí i teplotní závislosti magnetů statoru

se jedná o závislost lineární, tudíž dané proměnné budou reprezentovány samostatnými funkcemi. Zároveň je potřebné rozlišit momentovou a otáčkovou konstantu $C\Phi$. Jedná se o tzv. BEMF a TORQUE konstanty.

$$\omega = \frac{U - I_0 R_{25} [1 + \alpha_{25} (\delta - \delta_{25})]}{C\Phi_{BEMF} = f(t)} - \frac{R_{25} [1 + \alpha_{25} (\delta - \delta_{25})]}{(C\Phi_{TORQ} = f(t))^2} M \quad (2.8)$$

2.4 Možnosti regulace:

- **Změnou napětí kotvy:**

Jedná se o nejrozšířenější metodu. Tuto metodu budeme využívat i v naší práci. Změnou napětí na kotvě motoru dochází ke změně otáček motoru. To znamená, že plynulou regulací napětí docílíme plynulou změnu otáček motoru. Velikost otáček můžeme regulovat nad i pod jmenovité otáčky (nad i pod jmenovitou hodnotu napájecího napětí). Vpodstatě říkáme, že změnou napětí kotvy měníme zatěžovací charakteristiku. Právě regulace pomocí změny zatěžovací charakteristiky je druh námi požadované metody regulace daného motoru.

- **Změnou budícího proudu:**

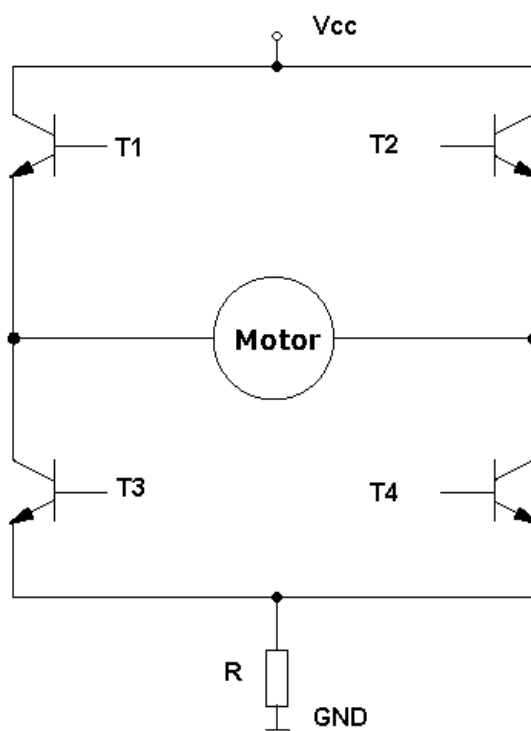
Regulace otáček pomocí budícího proudu lze uskutečnit pouze pokud není stator motoru tvořen permanentními magnety. Pokud budící proud snižujeme, otáčky motoru se zvýší.

- **Změnou odporu vinutí:**

Metoda změny odporu kotvy je pravděpodobně nejméně používanou metodou. Tato metoda pracuje na principu umělého zvýšení hodnoty odporu vinutí, přidáním rezistoru, což je velice ztrátová regulace.

2.4.1 Napájecí můstek

K napájení stejnosměrného motoru obvykle využíváme tzv. H můstek, díky kterému jsme schopni měnit směr otáčení motoru. Můstek nám zároveň poskytuje údaj o odebíraném proudu, který je důležitým údajem pro další regulaci motoru. Můstek je tvořen čtveřicí tranzistorů, kdy vždy dva jsou v sepnutém a dva v rozepnutém stavu. Podle toho, které dva tranzistory sepne, se bude motor otáčet. Jestliže budou tranzistory T1 s T4 sepnuty a T2 s T3 rozepnuty bude se motor otáčet na jednu stranu. Pro změnu směru otáčení T1 s T4 rozepneme a T2 s T3 sepne. Odpor R nám skouží k získání informace o odebíraném proudu.



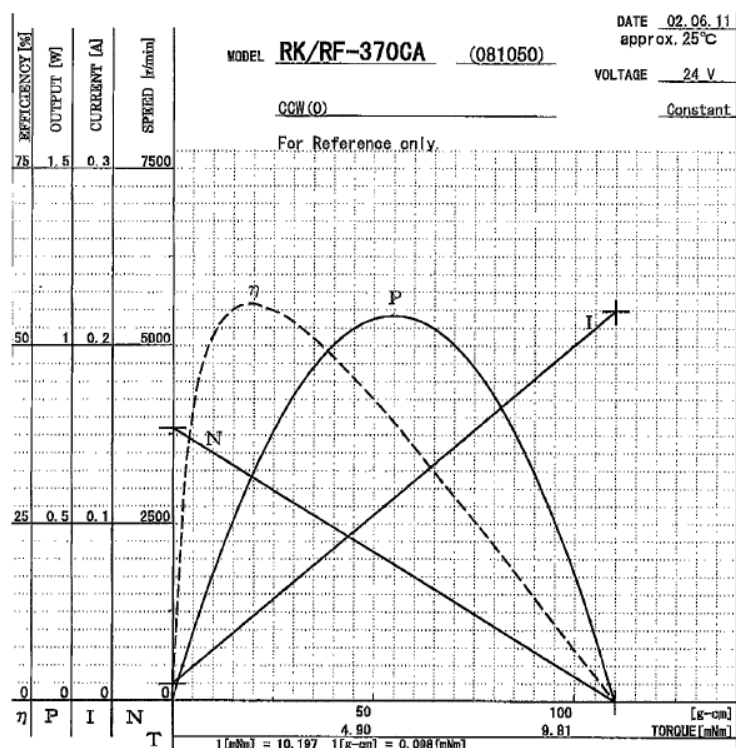
Obr. 2.5: Napájecí můstek

3 MODEL MOTORU

Nyní lze přejít k vypracování. V úvodu jsme si vysvětlili princip činnosti stejnosměrného motoru, nyní si vytvoříme matematický (statický) model motoru a odečteme konstantu motoru $C\Phi$. Po zjištění konstanty $C\Phi$ si její přesnost ověříme na vytvořeném statickém modelu. Výsledné hodnoty lze porovnat s typickou charakteristikou udávanou výrobcem motoru a s charakteristikou námi změřených motorů. Dále vytvoříme regulační schéma, na základě kterého bude motor řízen. Dalším úkolem bude zjistit, jakým způsobem bude nutné měnit napájecí napětí v závislosti na požadovaných otáčkách a zatěžovacím momentu. V neposlední řadě si uvedeme limitní a omezující jevy, které výslednou regulaci ovlivňují.

3.1 Typická charakteristika

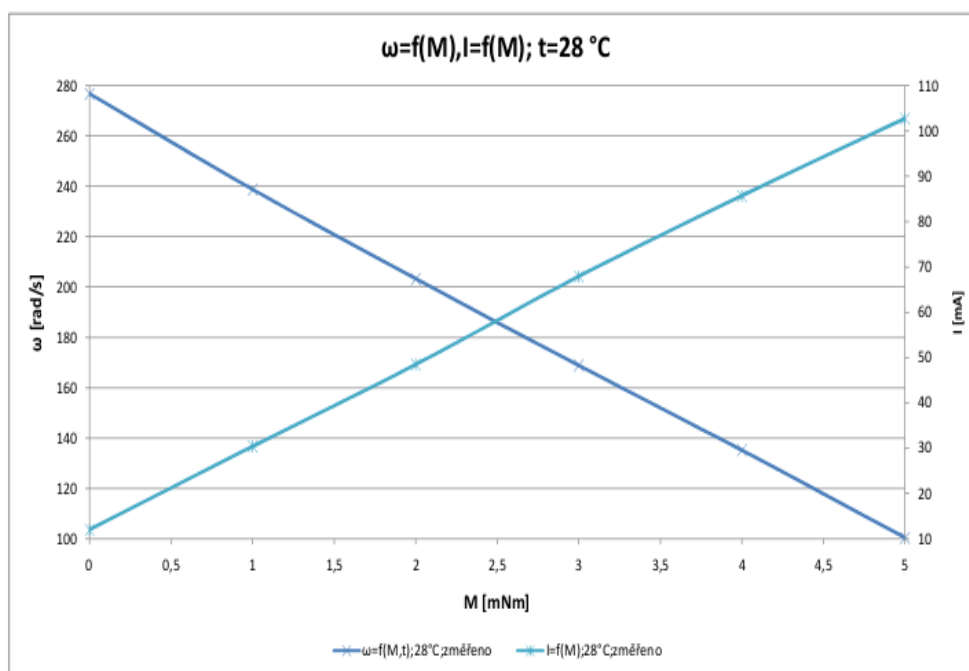
Nyní se podíváme na typickou charakteristiku uváděnou výrobcem. Jedná se o charakteristiku závislosti otáček, odebíraného proudu, výkonu a účinnosti v závislosti na zatěžovacím momentu. Tuto charakteristiku výrobce uvádí pro nominální napětí 24 V. Z typické charakteristiky výrobce jsme si odečetli všechny podstatné hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce A.1



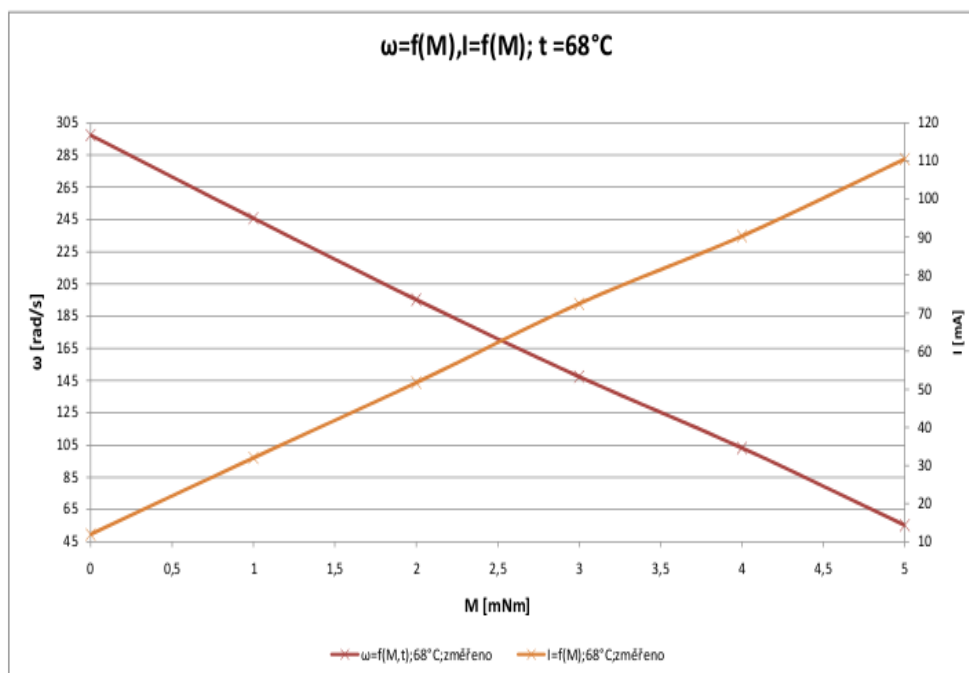
Obr. 3.1: Typická charakteristika motoru pro 24V

3.2 Změřená charakteristika

Jedná se o průměrnou charakteristiku ze čtyř změřených motorů. Pro výpočet konstanty a její porovnání bude uvedena charakteristika pro napájecí napětí $17V$ a teploty $28^{\circ}C$ a $68^{\circ}C$. Charakteristiky pro ostatní napájecí napětí a tabulky jsou uvedeny v měření a v přílohách A.1.



Obr. 3.2: Typická charakteristika motoru pro $17V$; $28^{\circ}C$



Obr. 3.3: Typická charakteristika motoru pro 17V; 68°C

3.3 Výpočet konstanty motoru

3.3.1 Výpočet pro typickou charakteristiku výrobce

V této části provedeme výpočet *BEMF* a *TORQUE* konstant, které budou sloužit k vytvoření modelu motoru odpovídajícímu zatěžovací charakteristice od výrobce. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici pouze typickou charakteristiku pro 25°C, uvažujeme konstanty ve vzorci jako teplotně nezávislé. Jak již bylo řečeno v úvodu, pro výpočet konstanty $C\Phi$ použijeme vzorec, který obsahuje všechny proměnné.

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_a I_0}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M \quad (3.1)$$

Výpočet konstanty:

- **Hodnota momentu má nulovou hodnotu:** za předpokladu, že hodnota momentu je rovna nule, víme, že má motor maximální otáčky–tzv. otáčky naprázdno. Tím lze vzorec upravit do tvaru:

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_a I_0}{C\Phi} \Rightarrow C\Phi_{BEMF} = \frac{U - R_a I_0}{\omega} \quad (3.2)$$

- **Hodnota momentu je maximální:** jestliže je hodnota zatěžovacího momentu rovna maximu, potom víme, že otáčky motoru jsou nulové a díky tomu

lze rovnici motoru upravit následovně:

$$\frac{U - R_a I_0}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M = 0 \Rightarrow C\Phi_{TORQUE} = \frac{MR_a}{U - R_a I_0} \quad (3.3)$$

Do této rovnice tedy dosazujeme M_{max} a jako hodnotu proudu uvedeme I_0 . Po dosazení známých hodnot jsme dostali výsledky:

- $C\Phi_{BEMF}=0,0568[-]$
- $C\Phi_{TORQUE}=0,0518[-]$

3.3.2 Výpočet pro typickou změřenou charakteristiku

Abychom výsledný model motoru pokud možno, co nejvíce přiblížili skutečným motorům, provedli jsme změřením zatěžovací charakteristiky pro dva nové a dva již použité motory. Z takto naměřených hodnot jsme vytvořili průměrný reálný motor a jeho charakteristiku. Odůvodnění je uvedeno v části *Měření 4*. Charakteristiku reálných motorů jsme změřily při dvou různých teplotách a zjistili jsme, že se liší, což znamená jistou teplotní závislost konstant použitých ve vzorci. (*Model motoru 3.4*).

Pro výpočet *BEMF* a *TORQUE* konstant proto použijeme vzorec:

$$\omega = \frac{U - I_0 R_{25} [1 + \alpha_{25} (\delta - \delta_{25})]}{C\Phi_{BEMF}(t)} - \frac{R_{25} [1 + \alpha_{25} (\delta - \delta_{25})]}{(C\Phi_{TORQ}(t))^2} M \quad (3.4)$$

Tento vzorec již obsahuje teplotní závislost odporu vinutí a je zde také patrné, že hodnota konstanty *BEMF* a *TORQUE* bude také teplotně závislá. Abychom zjistili jakým způsobem jsou konstanty *BEMF* a *TORQUE* teplotně závislé, využijeme naměřených hodnot a vypočítáme si je pro dvě různé teploty. Díky tomu si budeme moci zobrazit jejich závislost graficky a určit funkci podle které se bude jejich hodnota s teplotou měnit. Pro jednotlivé výpočty využijeme vzorce 3.2 a 3.3 do kterých dosadíme hodnoty které jsme změřili, případně z naměřených hodnot dopočítáme hodnoty potřebné.

Výpočet pro 28°C

$$C\Phi_{BEMF}=0,0566 [-]$$

$$C\Phi_{TORQUE}=0,0557 [-]$$

Kde:

- $R_a = 111,3\Omega$
- $\omega_{max} = 276,8\text{rad/s}$
- $M_{max} = 7,84\text{mNm}$
- $U = 17V$
- $I_0 = 12\text{mA}$

Výpočet pro 68°C

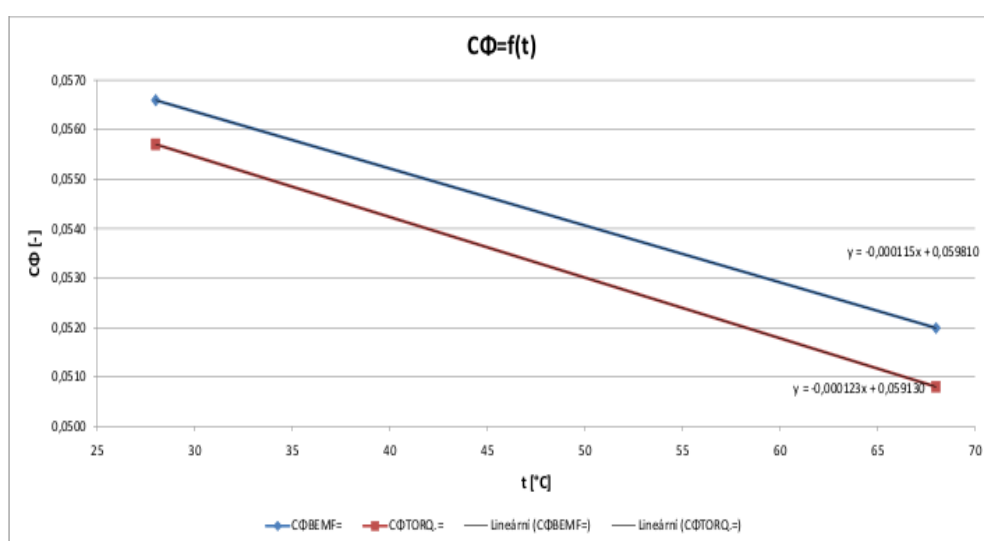
$$C\Phi_{BEMF}=0,05199 \text{ [-]}$$

$$C\Phi_{TORQUE}=0,0508 \text{ [-]}$$

Kde:

- $R_a = 128,5\Omega$
- $\omega_{max} = 297,33\text{rad/s}$
- $M_{max} = 6,11\text{mNm}$
- $U = 17\text{V}$
- $I_0 = 12\text{mA}$

Nyní máme vypočteny konstanty pro dvě teploty a zobrazíme si je graficky:



Obr. 3.4: Závislost konstant na teplotě

Z grafu je patrné, že hodnota konstant s teplotou lineárně klesá. Funkce vyjadřující závislost konstant na teplotě jsou vyjádřeny pomocí rovnic regrese 3.5:

rce regrese			$C\Phi=C\Phi_{max} - k*t$		
$C\Phi_{bemf} =$	$0,05981-0,000115*t$		$C\Phi_{BEMFmax} =$	0,05981	$k_{BEMF} =$ 0,000115
$C\Phi_{torq} =$	$0,05913-0,000123*t$		$C\Phi_{TORQ,max} =$	0,05913	$k_{TORQ} =$ 0,000123

Obr. 3.5: Rovnice regrese

Pro jednotlivé konstanty tedy platí:

- $C\Phi_{BEMF}=0,05981-0,000115*t[-]$
- $C\Phi_{TORQUE}=0,05913-0,000123*t[-]$

3.4 Ověření konstanty pro typickou charakteristiku výrobce

Abychom mohli rozhodnout, zda je vypočítaná konstanta dostatečně přesná, vypočteme podle ní velikost otáček, proudu, výkonu a účinnosti v závislosti na zatěžovacím momentu. Výsledky poté porovnáme s hodnotami odečtenými z typické charakteristiky motoru. Na základě rozdílu hodnot vypočtených a odečtených lze rozhodnout, zda je vypočítaná konstanta dostatečně přesná. Porovnání hodnot provedeme jak početně tak i graficky, což je podle mého názoru ještě názornější.

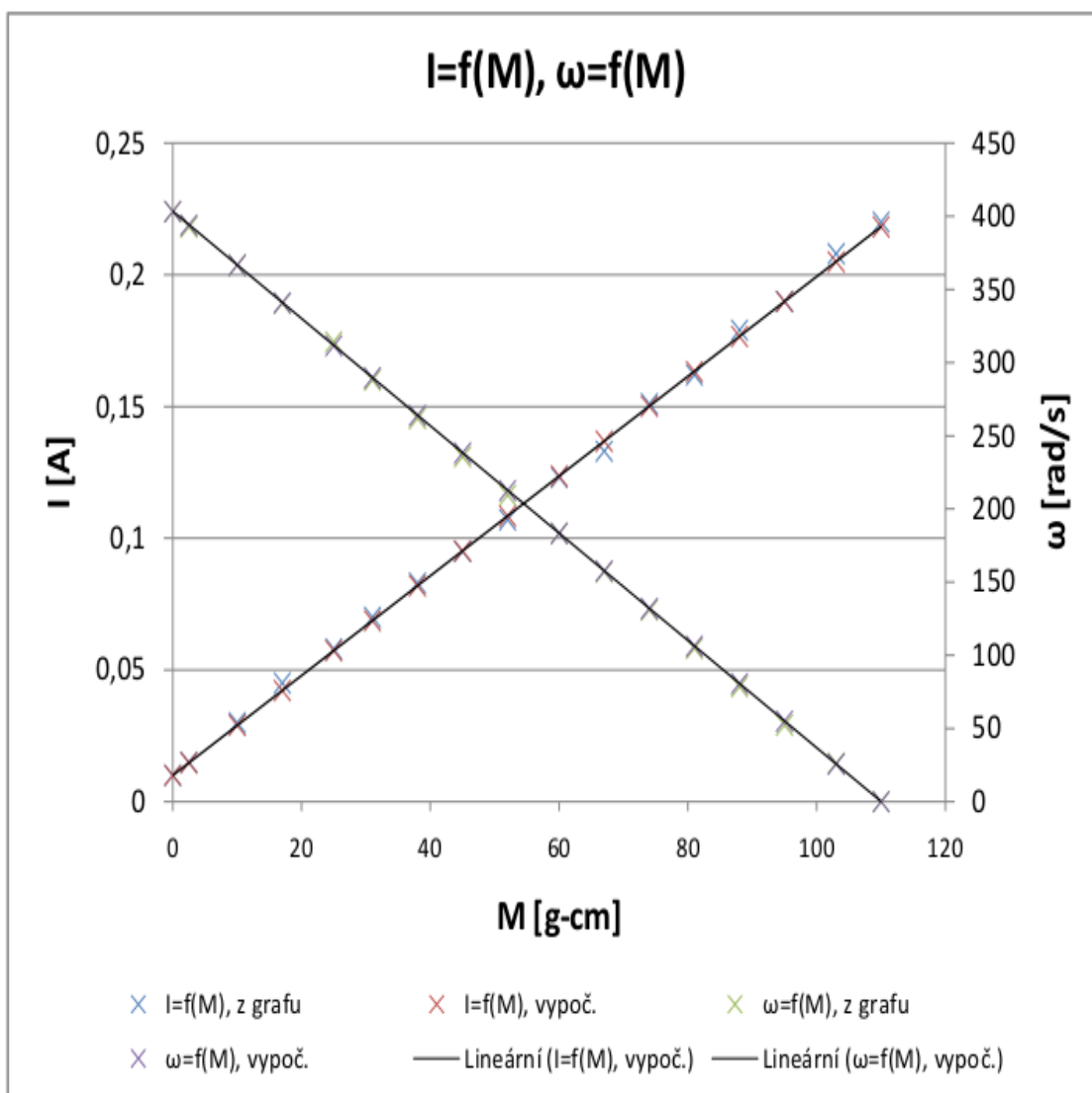
3.4.1 Početně

Přiložená tabulka obsahuje všechny hodnoty, které jsme mohli porovnat a zároveň počítá jejich chybu (je uvedena absolutní hodnota chyby vyjádřená v %. Viz 3.1

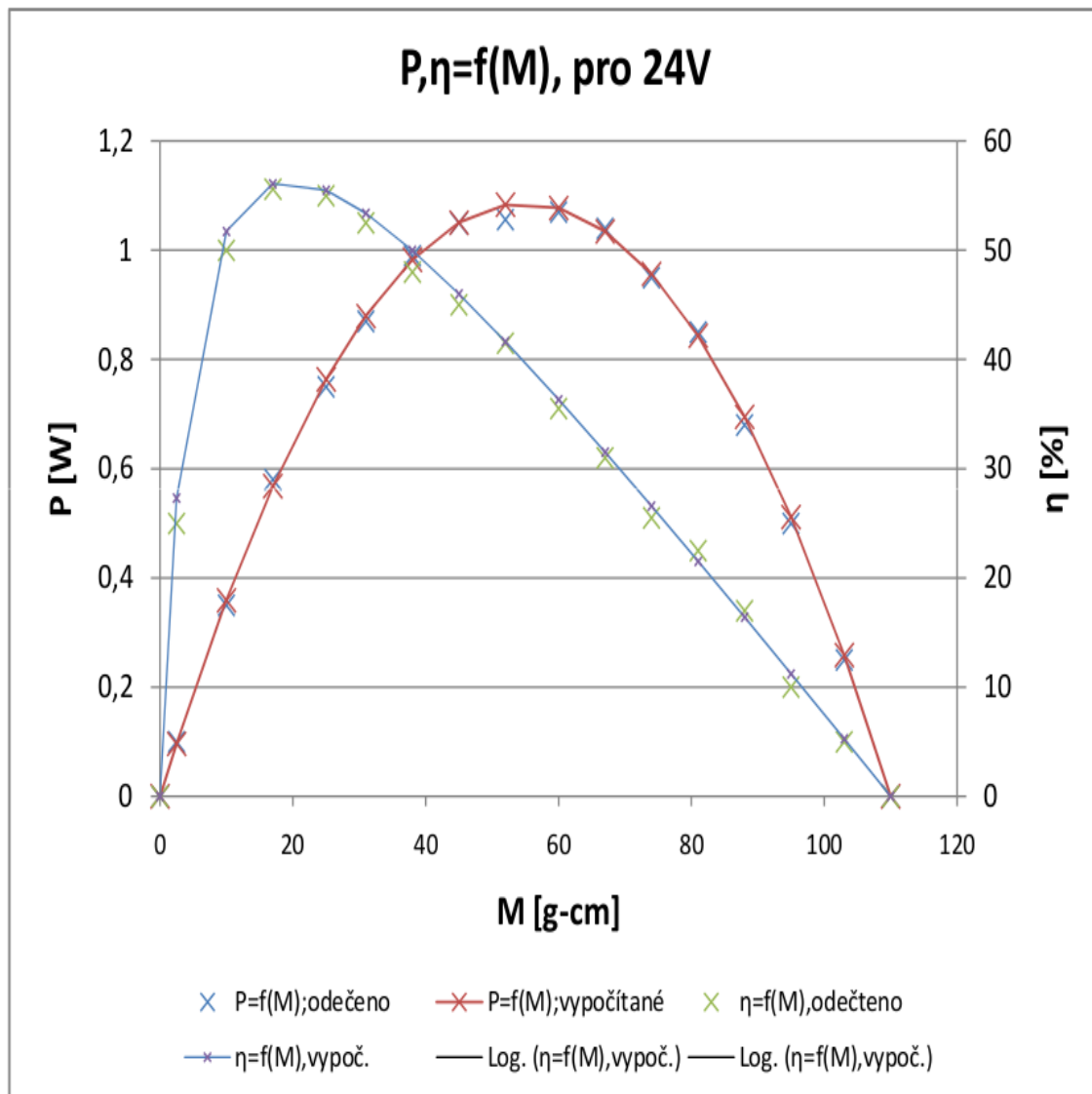
3.4.2 Graficky

Z uvedených grafů je patrné, že hodnoty vypočítané pomocí námi použitých konstant $C\Phi_{M=0}=0,0568[-]$ a $C\Phi_{\omega=0}=0,0518[-]$ jsou pro typickou charakteristiku uváděnou výrobcem dostatečně přesné.

V tabulce jsme si vyjádřili ke každé proměnné maximální hodnotu chyby. Maximální hodnota činí asi 6 %. Jak jsme zjistili výpočtem i měřením, zatěžovací charakteristika se s rostoucí teplotou mění a na tuto změnu tyto konstanty nereagují. Takže přestože hodnoty takto určených konstant odpovídají typické charakteristice v reálných případech jsou nedostatečné.



Obr. 3.6: Závislost otáček a proudu na momentu



Obr. 3.7: Závislost výkonu a účinnosti na momentu

Tab. 3.1: Ověření konstanty – výpočet chyby

M [g·cm]	ω			I			P			η				
	odečteno [rad/s]	vypočítáno [rad/s]	chyba [%]	odečteno [A]	vypočítáno [A]	chyba [%]	odečteno [W]	vypočítáno [W]	chyba [%]	odečteno [%]	vypočítáno [%]	chyba [%]		
0	403,17	403,17	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00		
2,5	392,70	394,01	0,33	0,02	0,01	1,79	0,10	0,10	3,47	25,00	27,30	2,30		
10	366,52	366,52	0,00	0,03	0,03	3,58	0,35	0,36	2,63	50,00	51,74	1,74		
17	340,34	340,86	0,15	0,05	0,04	6,28	0,58	0,57	2,09	55,60	56,11	0,51		
25	314,16	311,54	0,83	0,06	0,06	1,18	0,75	0,76	1,77	55,00	55,49	0,49		
31	287,98	289,55	0,55	0,07	0,07	1,90	0,87	0,88	1,11	52,50	53,37	0,87		
38	261,80	263,89	0,80	0,08	0,08	1,30	0,99	0,98	0,73	48,00	49,99	1,99		
45	235,62	238,24	1,11	0,10	0,10	0,17	1,05	1,05	0,06	45,00	46,00	2,00		
52	209,44	212,58	1,50	0,11	0,11	1,32	1,06	1,08	2,59	41,50	41,64	0,14		
60	183,26	183,26	0,00	0,12	0,12	0,45	1,07	1,08	0,71	35,50	36,34	0,84		
67	157,08	157,60	0,33	0,13	0,14	2,86	1,04	1,03	0,50	31,00	31,52	0,52		
74	130,90	131,95	0,80	0,15	0,15	0,63	0,95	0,96	0,72	25,50	26,57	1,07		
81	104,72	106,29	1,50	0,16	0,16	0,80	0,85	0,84	0,74	22,50	21,53	0,97		
88	78,54	80,63	2,67	0,18	0,18	1,37	0,68	0,70	2,26	17,00	16,41	0,59		
95	52,36	54,98	5,00	0,19	0,19	0,11	0,50	0,51	2,37	10,00	11,24	1,24		
103	26,18	25,66	2,00	0,21	0,20	1,47	0,25	0,26	3,59	5,00	5,27	0,27		
110	0,00	0,00	-	0,22	0,22	0,83	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00		
max chyba (abs.hod.)[%]:				5,00			6,28			3,59			2,30	

3.5 Ověření konstanty pro změřenou charakteristiku

V této části si porovnáme vypočtené konstanty reagující na změnu teploty s reálně odměřenými motory.

3.5.1 Početně

Následující tabulka nám porovnává hodnoty průměrného motoru s teoretickým výpočtem a je v ní obsažen i rozdíl mezi teoretickou a reálnou charakteristikou.

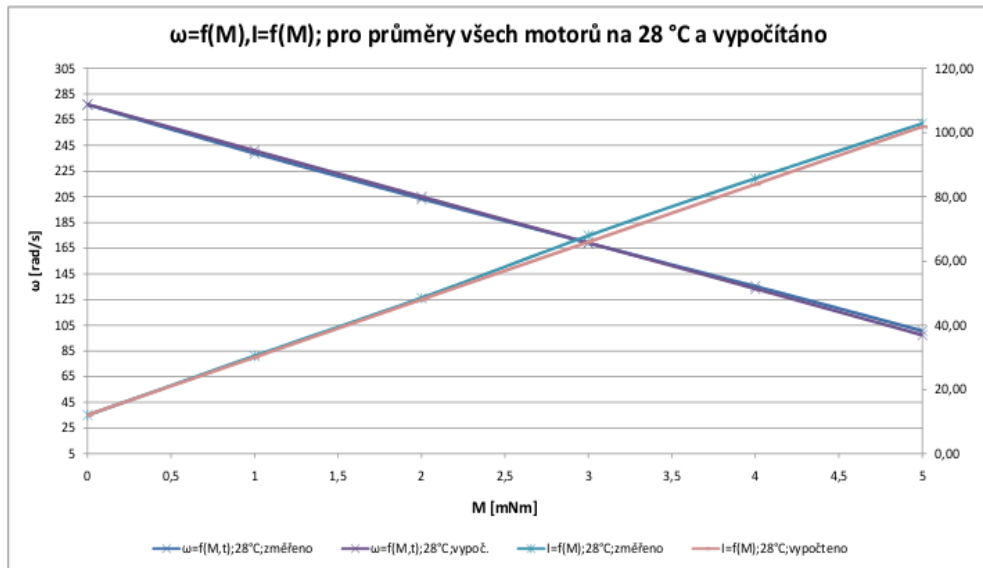
Tab. 3.2: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

M [Nm]	M [mNm]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\omega$ [1/min]	$\Delta\omega$ [1/min]
0	0	276,81	297,32	276,80	297,33	0,01	-0,01	0,06	0,08
0,001	1	240,92	247,44	238,79	245,78	2,13	1,66	20,33	15,88
0,002	2	205,03	197,56	203,29	195,25	1,74	2,31	16,60	22,09
0,003	3	169,14	147,69	168,89	147,42	0,25	0,27	2,37	2,55
0,004	4	133,24	97,81	135,22	103,12	-1,97	-5,31	18,85	50,73
0,005	5	97,35	47,93	100,48	55,19	-3,12	-7,25	29,83	69,27
		vypočítáno		průměr motorů		rozdíl teor a změř.		rozdíl teor a změř.	
		28°C	68°C	28°C	68°C	28°C	68°C	28°C	68°C

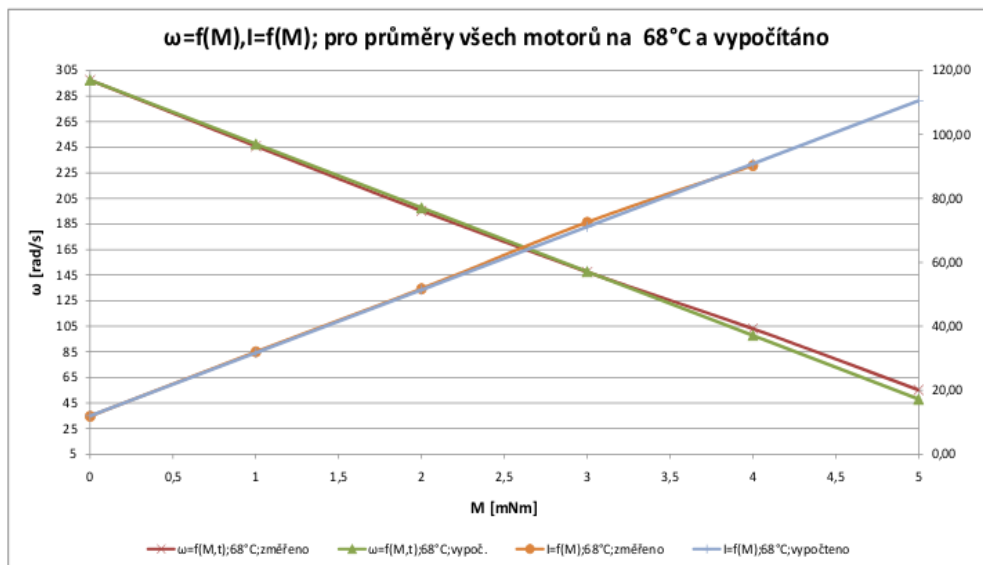
Tab. 3.3: Závislost proudu na zatěžovacím momentu

I ;t=28°C	I ;t=68°C	I ;t=28°C	I ;t=68°C	ΔI [mA];28°C	ΔI [mA];68°C	M [mNm]
11,98	11,88	12,00	12,00	0,03	0,13	0
30,40	32,00	29,96	31,70	0,44	0,30	1
48,48	51,75	47,92	51,40	0,56	0,35	2
67,90	72,50	65,87	71,09	2,03	1,41	3
85,70	90,25	83,83	90,79	1,87	0,54	4
102,75	110,50	101,79	110,49	0,96	0,01	5
prům. změř.		vypočítáno				

3.5.2 Graficky



Obr. 3.8: Porovnání zatěž. char. 28°C



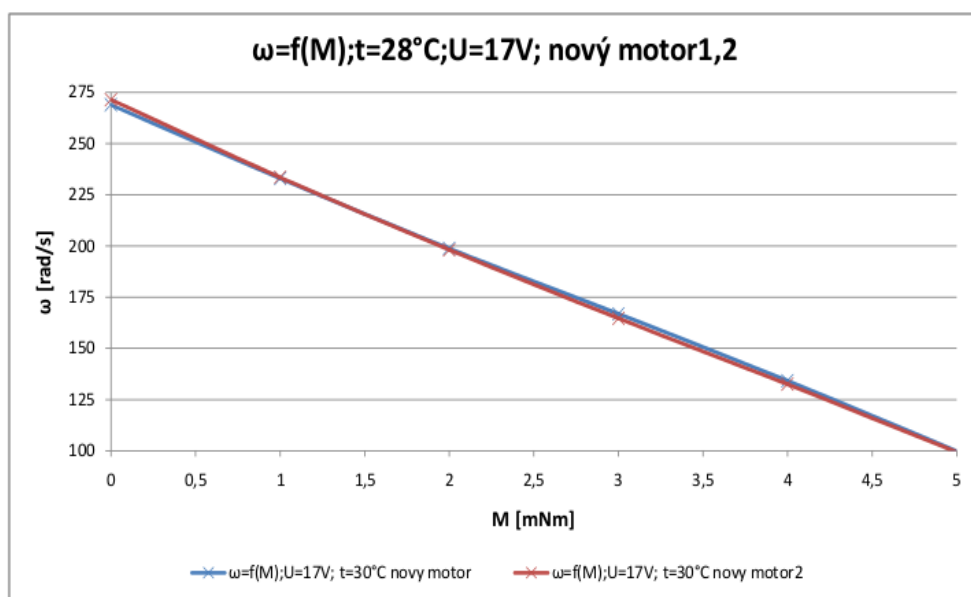
Obr. 3.9: Porovnání zatěž. char. 68°C

4 MĚŘENÍ

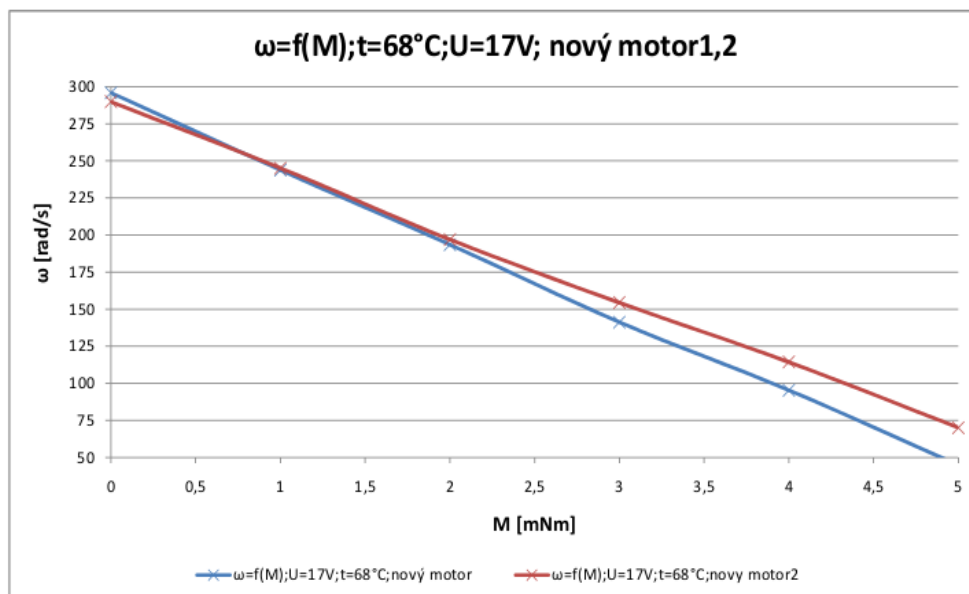
Pro jednotlivé motory byla změřena zatěžovací charakteristika pro napájecí napětí $10V, 13V, 15V, 17V$ a teploty $28^{\circ}C$ a $68^{\circ}C$. Dále jsme změřili závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu při teplotě $28^{\circ}C, 50^{\circ}C, 60^{\circ}C$. Tabulky a grafy pro všechna napětí a teploty jsou uvedeny v přílohách A.1A.1.

Měření bylo provedeno na dvou nových motorech a dvou použitých. Jednotlivá měření mezi sebou porovnáme, abychom mohli určit, zda lze se změřených motorů vypočítat průměrný motor a k němu vztáhnout výpočty pro model motoru.

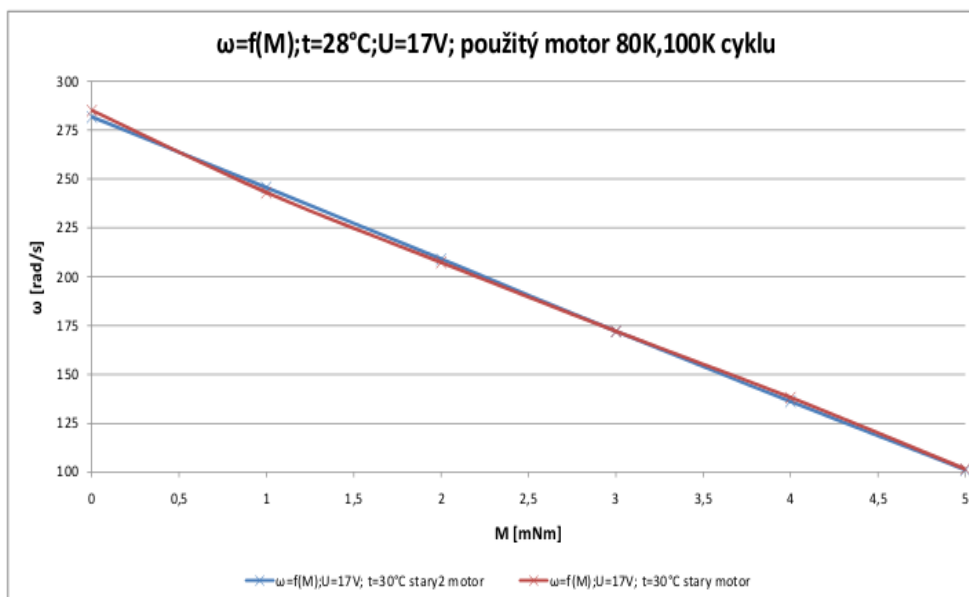
Nejprve porovnáme dva nové a dva použité motory při teplotách $28^{\circ}C$ a $68^{\circ}C$.



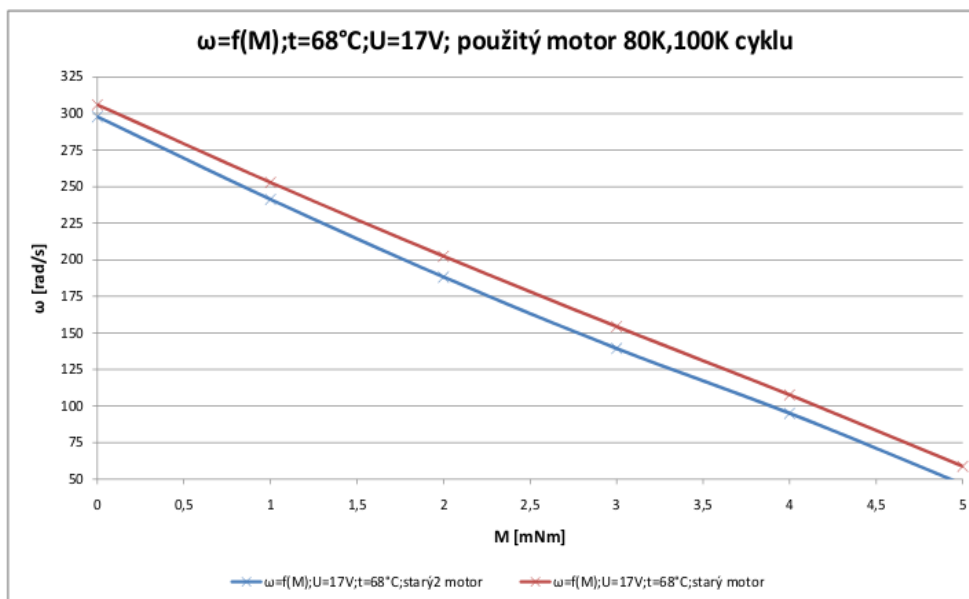
Obr. 4.1: Závislost otáček na momentu pro $t=28^{\circ}C$; nový motor 1,2



Obr. 4.2: Závislost otáčiek na momentu pro $t=68^{\circ}\text{C}$; nový motor 1,2



Obr. 4.3: Závislost otáčiek na momentu pro $t=28^{\circ}\text{C}$; použitý motor 60K,100K cyklu

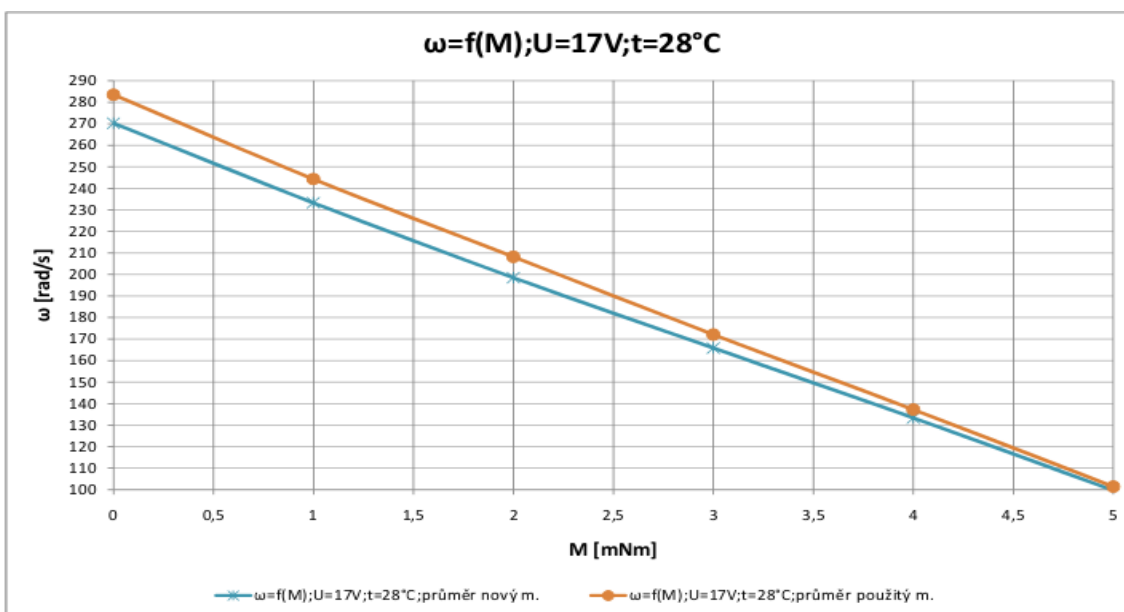


Obr. 4.4: Závislost otáček na momentu pro $t=68^{\circ}\text{C}$; použitý motor 60K,100K cyklu

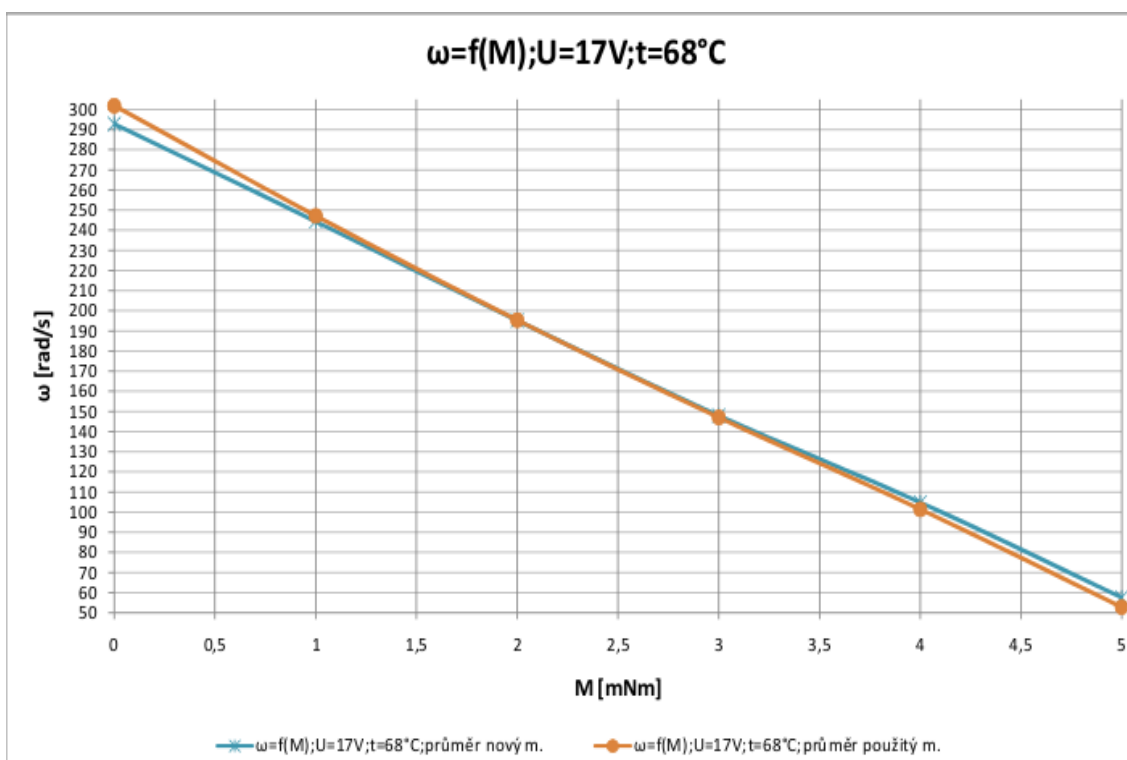
Z grafů je patrné, že se dva nové a dva použité od sebe zásadně neliší. Díky tomu lze vypočítat průměrný nový a průměrný použitý motor a ty potom porovnáme mezi sebou.

Tab. 4.1: Porovnání průměrů nových a starých motorů

M [Nm]	M [mNm]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]
0	0	270,18	292,80	283,42	301,85
0,001	1	233,26	244,42	244,31	247,14
0,002	2	198,44	195,20	208,13	195,30
0,003	3	165,72	147,86	172,05	146,97
0,004	4	133,31	104,88	137,13	101,37
0,005	5	99,59	57,60	101,37	52,78
		průměr. nový m.		průměr. starý m.	
		28°C	68°C	28°C	68°C



Obr. 4.5: Závislost otáček na momentu pro $t=28^{\circ}C$; průměry motorů



Obr. 4.6: Závislost otáček na momentu pro $t=68^{\circ}C$; průměry motorů

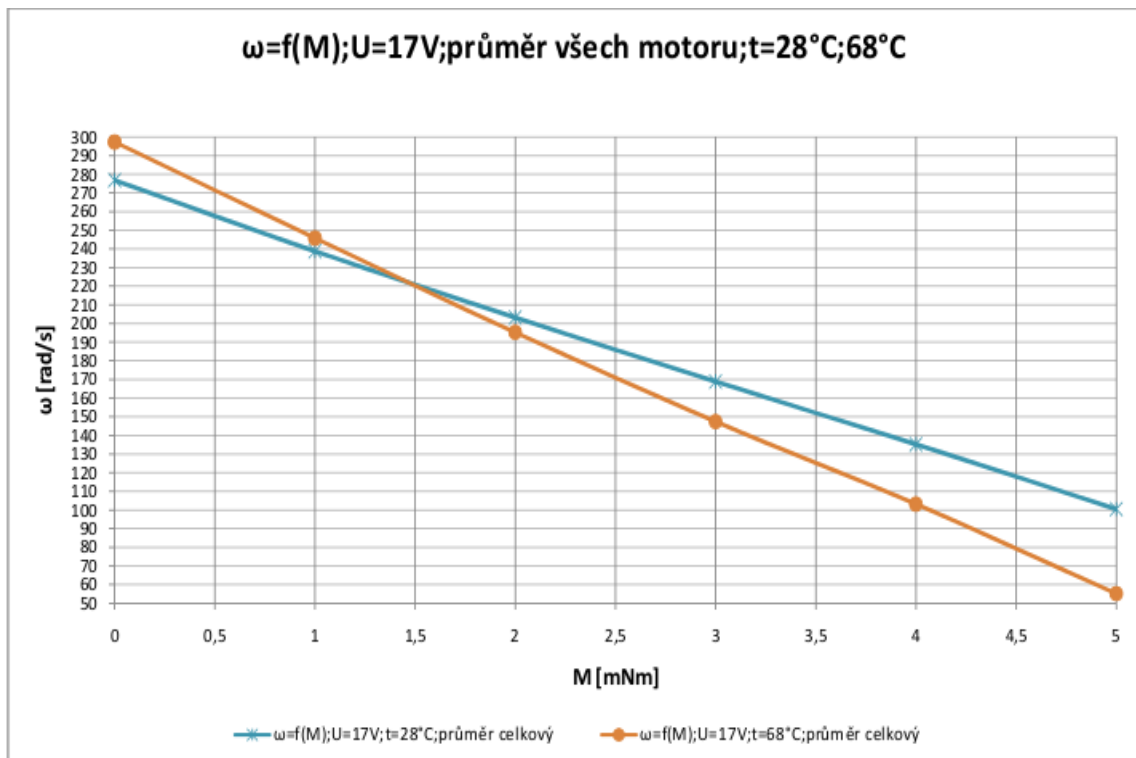
Jak je vidět z tabulky a grafů průměrné hodnoty nových a použitých motorů se od sebe liší pouze minimálně. Znamená to, že opotřebení kartáčů motoru, případně komutátoru, či stárnutí magnetů ve statoru se na výsledné charakteristice projeví zanedbatelně. Díky tomu lze vytvořit průměrný motor. S hodnotami z tohoto motoru poté budeme počítat při výpočtech modelu motoru.

Tab. 4.2: Výsledný průměr motorů

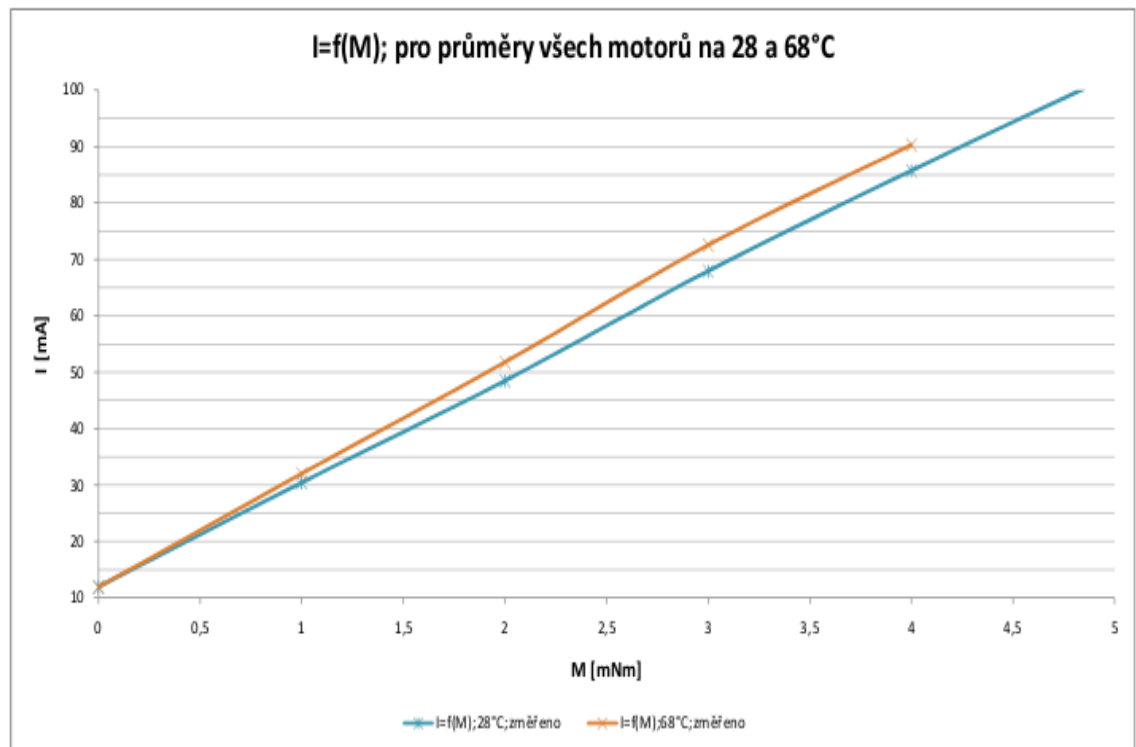
M [Nm]	M [mNm]	ω [rad/s]	ω [rad/s]
0	0	276,80	297,33
0,001	1	238,79	245,78
0,002	2	203,29	195,25
0,003	3	168,89	147,42
0,004	4	135,22	103,12
0,005	5	100,48	55,19
		průměr motorů	
		28°C	68°C

Tab. 4.3: Závislost proudu na momentu změřený průměr

I ;t=28°C	I ;t=68°C	M [Nm]	M [mNm]
11,98	11,88	0	0
30,40	32,00	0,001	1
48,48	51,75	0,002	2
67,90	72,50	0,003	3
85,70	90,25	0,004	4
102,75	110,50	0,005	5



Obr. 4.7: Závislost otáček na momentu pro $t=28^{\circ}C, t=68^{\circ}C$; celk. průměr



Obr. 4.8: Závislost otáček na momentu pro $t=28^{\circ}C, t=68^{\circ}C$; celk. průměr

5 REGULACE

Regulace stejnosměrného kartáčového motoru pomocí kompenzace zatěžovací charakteristiky je jednou z nejjednodušších a nejlevnějších metod. Právě pro své nízké náklady na výrobu je žádanou regulací tam, kde nám nejde o maximální přesnost. Regulátor neobsahuje žádný senzor polohy ani otáček. K dispozici máme údaj o odebíraném proudu, který odpovídá zatěžovacímu momentu. Zároveň je to i kontrolní údaj pro případ úplného otevření/zavření ventilu, či zaseknutí převodovky. Víme, že s rostoucím zatěžovacím momentem roste i proud, který motor odebírá. Jestliže by napájecí napětí bylo konstantní, docházelo by v závislosti na zatěžovacím momentu ke změně otáček motoru a tím i různému času otevření/zavření ventilu, což je nežádoucí. V našem případě požadujeme, aby motor udržoval zvolené otáčky konstantní. Použitý aktuátor neumožňuje nastavovat různé otáčky motoru, ale jestliže by se použil jiný aktuátor, bylo by možné na začátku zvolit z více možností otáček. Aby bylo možné udržet otáčky konstantní, je nutné měnit napětí motoru. Znamená to, že hodnota napětí je funkcí zatěžovacího momentu při konstantních otáčkách.

Rovnice pro změnu napájecího napětí:

$$U = \omega(C\Phi_{BEMF}(t)) + I_0 R_{a25} [1 + \alpha_{25}(\theta - \theta_{25})] + \frac{(C\Phi_{BEMF}(t)) R_{a25} [1 + \alpha_{25}(\theta - \theta_{25})]}{(C\Phi_{TORQUE}(t))^2} M \quad (5.1)$$

Kde platí:

- $C\Phi_{BEMF}(t) = 0,05981 - 0,000115 \cdot t [-]$
- $C\Phi_{TORQUE}(t) = 0,05913 - 0,000123 \cdot t [-]$

Jedinou neznámou v našem vzorci je zatěžovací moment. Počáteční proud, hodnotu odporu vinutí při teplotě $25^\circ C$ i funkci konstant $C\Phi$ známe a hodnotu otáček si zvolíme.

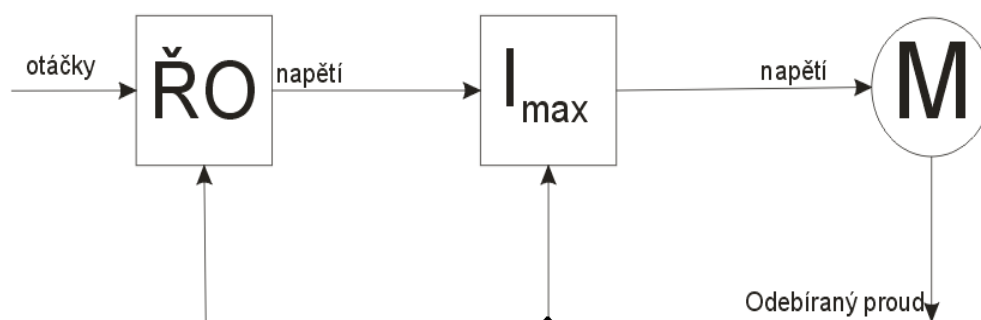
My ale nemáme možnost měřit přímo zatěžovací moment, proto, jak již bylo řečeno, bude vycházet z hodnoty odebíraného proudu. Proto dosadíme za moment rovnici:

$$M = C\Phi_{TORQUE} I; \text{ kde } : C\Phi_{TORQUE} = f(t) \quad (5.2)$$

Po dosazení rovnice 5.2 dostáváme výslednou rovnici pro řízení daného motoru:

$$U = \omega(C\Phi_{BEMF}(t)) + I_0 R_{a25} [1 + \alpha_{25}(\theta - \theta_{25})] + \frac{(C\Phi_{BEMF}(t)) R_{a25} [1 + \alpha_{25}(\theta - \theta_{25})]}{C\Phi_{TORQUE}(t)} I \quad (5.3)$$

5.1 Regulační schéma



Obr. 5.1: Regulační schéma

Popis jednotlivých částí:

- **ŘO:** je nejdůležitějším blokem, který obsahuje řídicí algoritmus a určuje regulaci systému. Umožňuje nám nastavit požadované otáčky (pro náš typ aktuátoru je dovolena jen jedna hodnota, pro jiný typ bychom si mohli zvolit z více otáček) a jako proměnná do něj vstupuje hodnota odebíraného proudu, která odpovídá zatěžovacímu momentu. Hodnotu odebíraného proudu dosadíme do vzorce:5.3. Díky tomu získáme hodnotu na kterou musíme nastavit napětí na motoru.
- I_{max} : jedná se o kontrolní blok, který nám chrání celou soustavu před poškozením. Díky této hodnotě jsme schopní říct, jestli se aktuátor nachází v krajní poloze, nebo jestli nedošlo k zaseknutí, či nějaké jiné poruše. Zároveň umožňuje omezení proudu motorem.

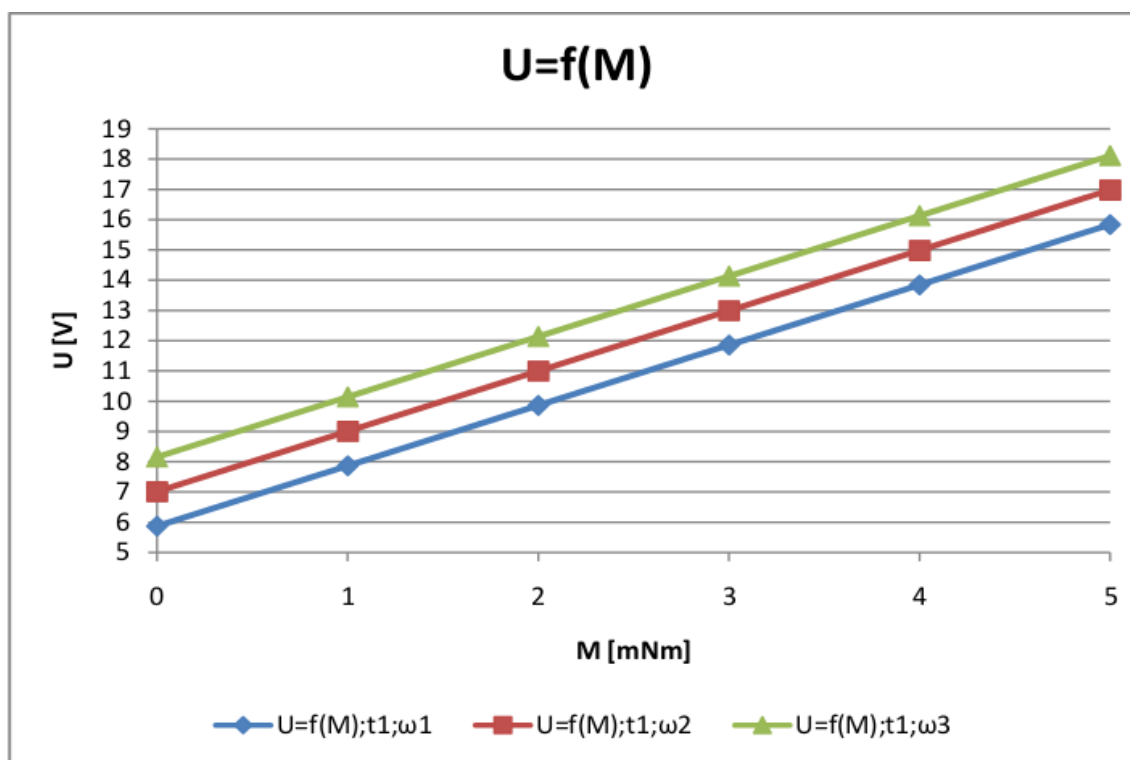
5.2 Řízení

Jak již bylo řečeno, napájecí napětí se určí ze vztahu:5.3. Nyní si ukážeme, jak vypadá tabulka, podle které se nastavuje napájecí napětí v závislosti na zatěžovacím momentu. Tabulka obsahuje hodnoty pro troje nastavení otáček (80rad/s, 100rad/s, 120rad/s) a pro teploty 28°C a 68°C . Jedná se o otáčky, u kterých předpokládáme, že by mohly být v praxi použity a o teploty, na kterých jsme motory měřily. Zároveň rozsah momentu je uveden od 0 do 5mNm, což je z důvodu, že při otevírání ventilu nám pomáhá pružina a potřebný moment bude menší, než nominální, který předpokládáme v rozsahu 2 až 3mNm.

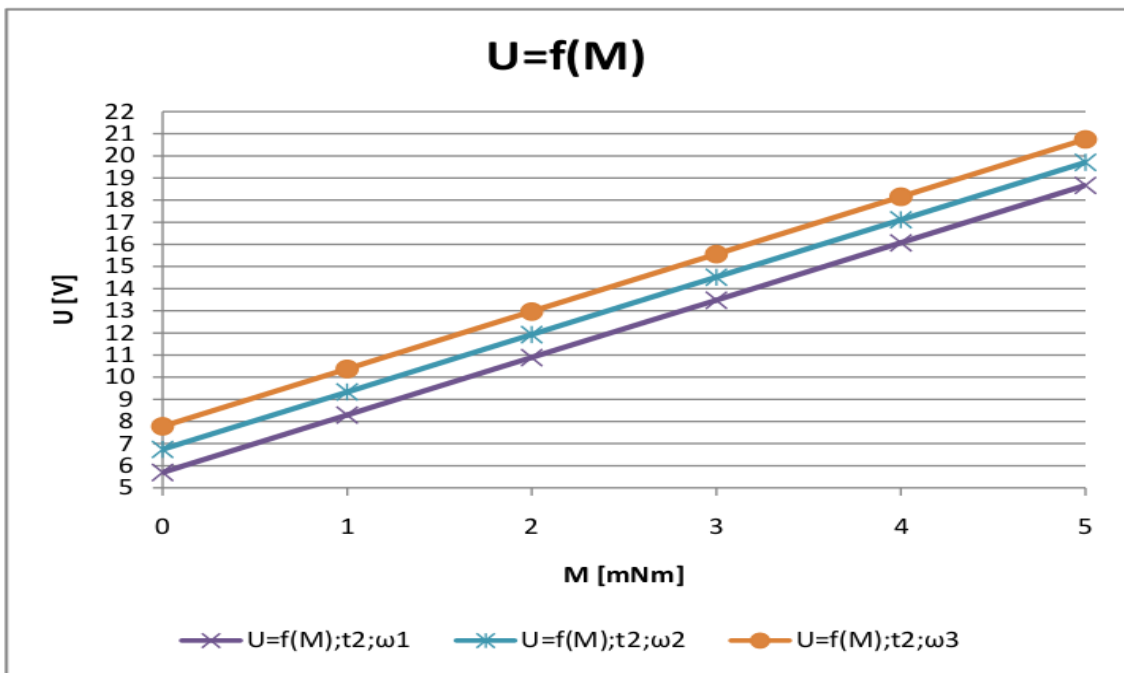
Pro pochopení a lepší přehlednost je závislost napětí na momentu také vynesena graficky.

Tab. 5.1: Zavislost napětí na momentu

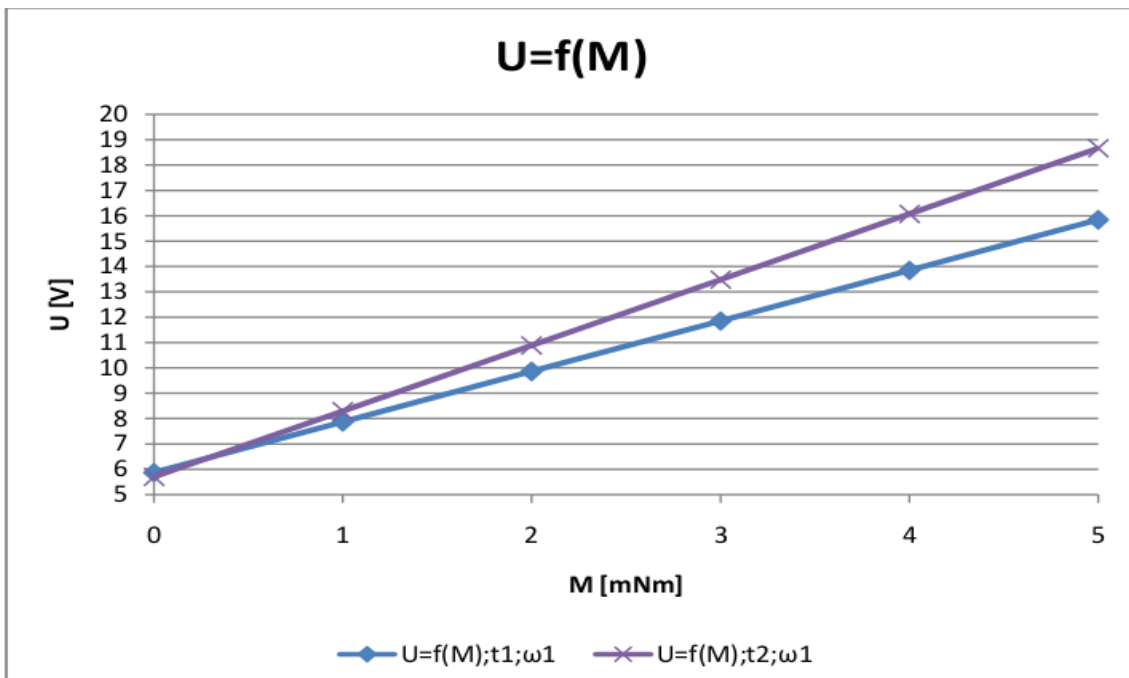
		$\omega_1[\text{rad/s}]$		$\omega_2[\text{rad/s}]$		$\omega_3[\text{rad/s}]$	
		pro t1	pro t2	pro t1	pro t2	pro t1	pro t2
M[mNm]	M[Nm]	U[V]	U[V]	U[V]	U[V]	U[V]	U[V]
0	0	5,87	5,70	7,01	6,74	8,15	7,78
1	0,001	7,87	8,29	9,01	9,33	10,15	10,37
2	0,002	9,86	10,89	11,00	11,93	12,14	12,97
3	0,003	11,85	13,48	12,99	14,52	14,13	15,56
4	0,004	13,85	16,07	14,99	17,11	16,12	18,15
5	0,005	15,84	18,67	16,98	19,71	18,12	20,75
6	0,006	17,83	21,26	18,97	22,30	20,11	23,34



Obr. 5.2: Zavislost napětí na momentu pro 28°C a troje různé otáčky



Obr. 5.3: Závislost napětí na momentu pro 68°C a troje různé otáčky



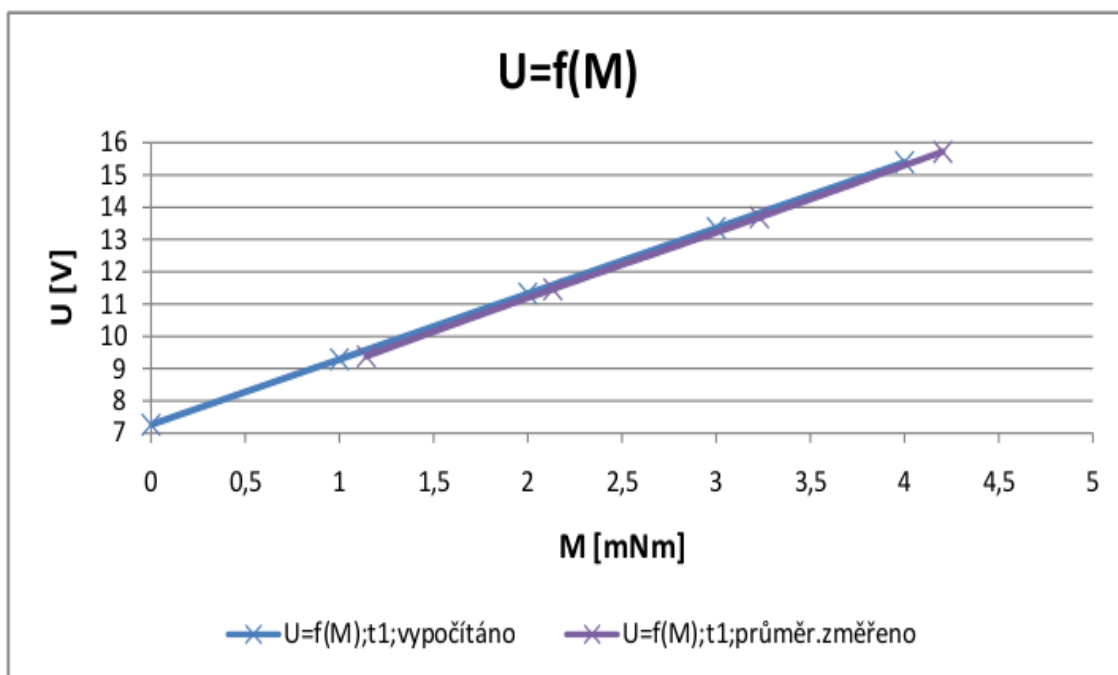
Obr. 5.4: Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C

Ostatní grafy v příloze A.6.

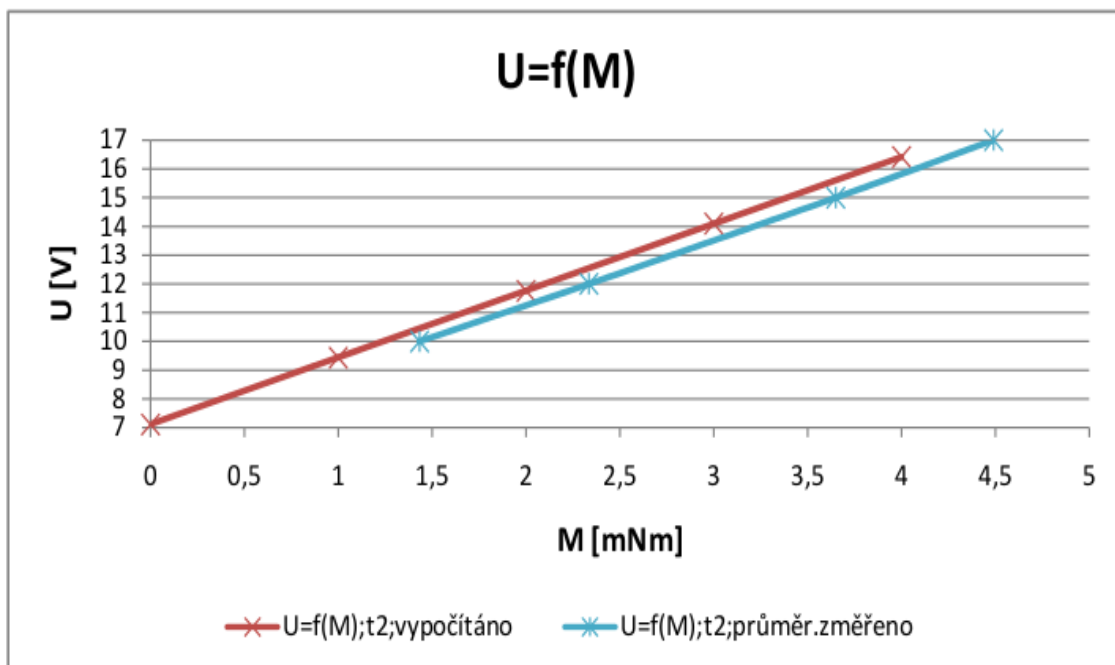
Porovnání s naměřenými charakteristikami:

Tab. 5.2: Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$

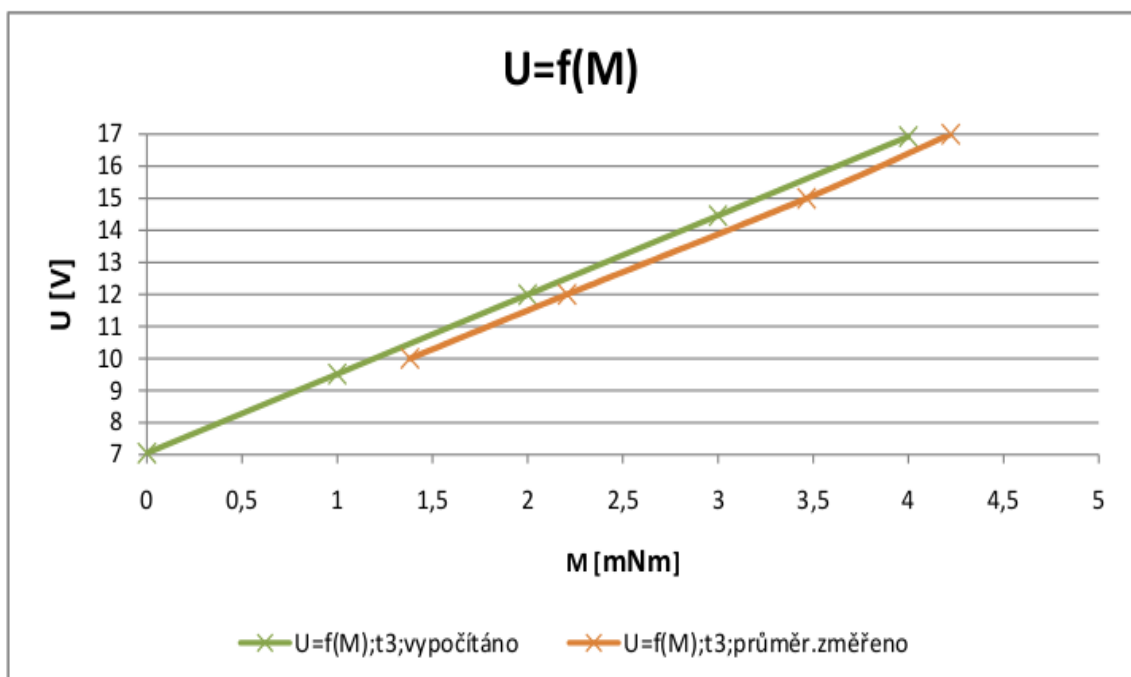
		Vypočítáno			Průměr všech motorů					
		pro t1	pro t2	pro t3	pro t1		pro t2		pro t3	
M[mNm]	M[Nm]	U[V]	U[V]	U[V]	M[Nm]	U[V]	M[Nm]	U[V]	M[Nm]	U[V]
0	0	7,26	7,11	7,04	1,14	9,38	1,43	10	1,3825	10
1	0,001	9,29	9,44	9,51	2,13	11,46	2,34	12	2,2075	12
2	0,002	11,32	11,76	11,98	3,23	13,69	3,65	15	3,465	15
3	0,003	13,35	14,09	14,46	4,20	15,72	4,49	17	4,2225	17
4	0,004	15,39	16,42	16,93						



Obr. 5.5: Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$; 28°C



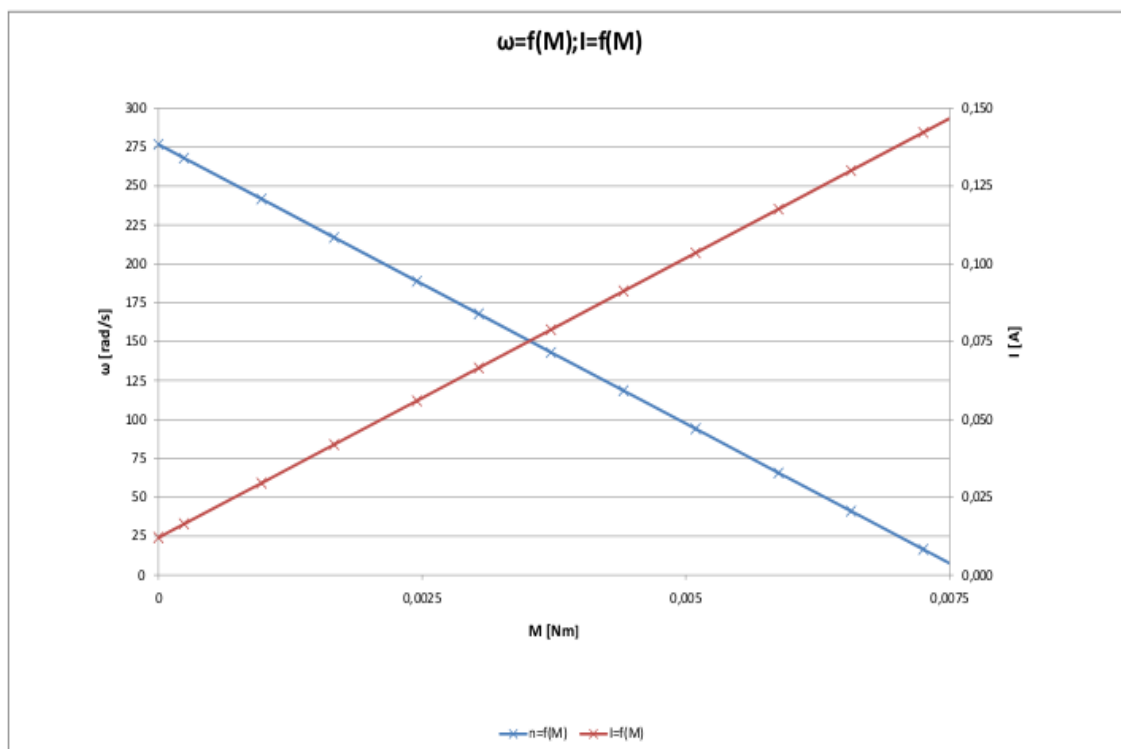
Obr. 5.6: Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$; 50°C



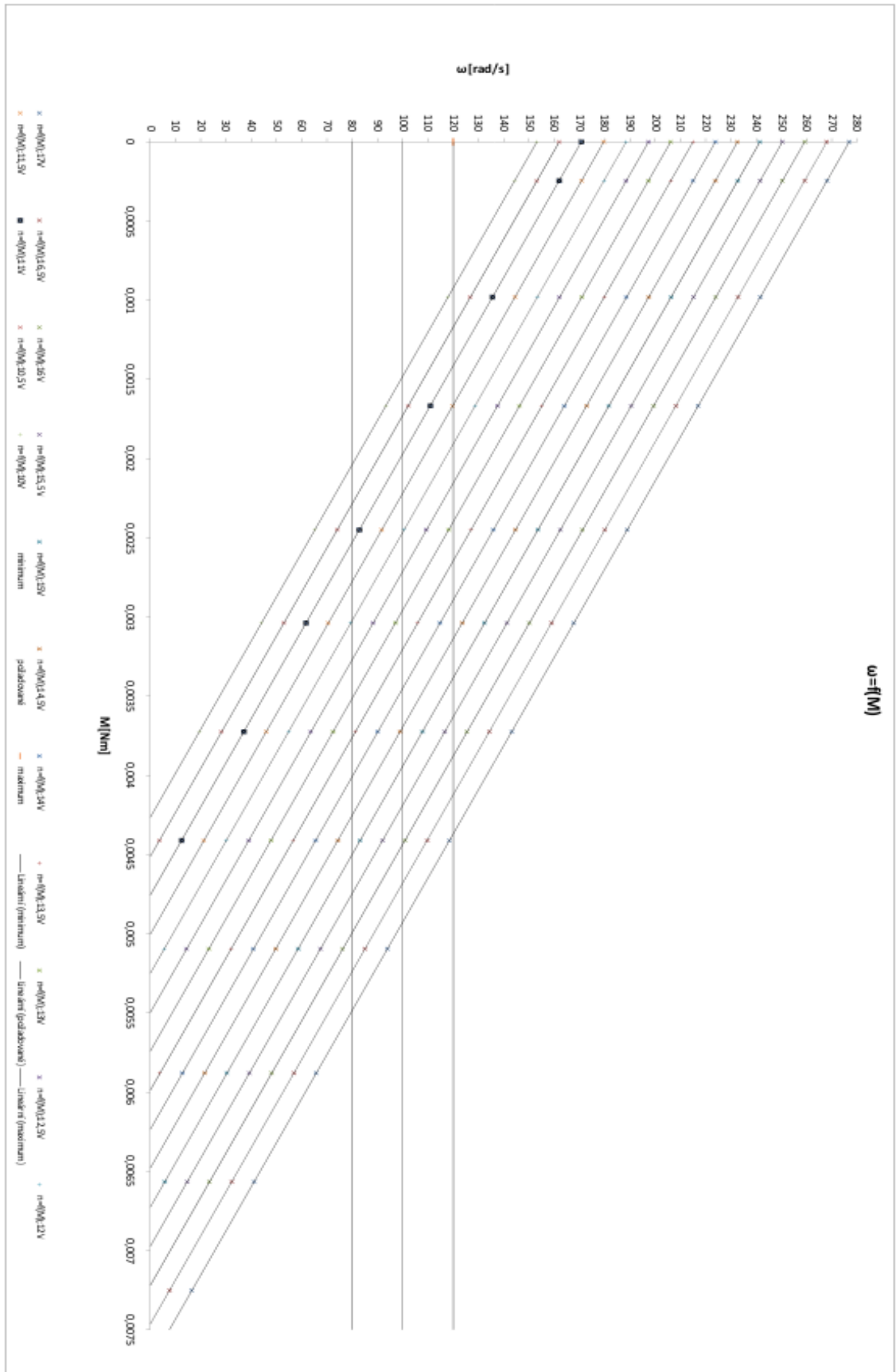
Obr. 5.7: Porovnání naměřených hodnot s teoretickými $U=f(M)$; 60°C

6 APLIKACE METODY

Typická charakteristika výrobce uvažuje napájecí napětí 24V a byla měřena při laboratorní teplotě 25°C. Pro tuto hodnotu jsme počítali konstanty $C\Phi$ a jsou pro tuto hodnotu napájení počítány všechny ostatní hodnoty, ať už to jsou otáčky, proud, výkon. Takto vypočítané hodnoty nám souhlasí s typickou charakteristikou výrobce, ale nemohou souhlasit s reálnými motory. Proto jsme určili funkci závislosti odporu vinutí i funkci závislosti konstant motoru na teplotě. Takový model motoru již odpovídá reálným motorům. Výrobce uvažoval napájecí napětí 24V, my ale víme, že náš motor bude napájen z transformátoru, který má na svém výstupu teoreticky 24V, ale vzhledem k jeho toleranci a k úbytkům na diodách lze spočítat, že skutečné napětí, které jsme schopni na motoru zaručit je pouze 17V. To znamená, že 17V je naše U_{max} . Proto jsme se rozhodli, že budeme motor regulovat v rozsahu napětí asi od 10 do 17V. Pro vysvětlení jak budeme v regulaci omezení nám poslouží schéma(mapa) závislosti otáček na momentu pro napětí od 10V do 17V 6.2, kde jsou vyznačeny předpokládné hodnoty požadovaných otáček. Dále si ukážeme typickou zatěžovací charakteristiku pro naše maximální napětí:17V.



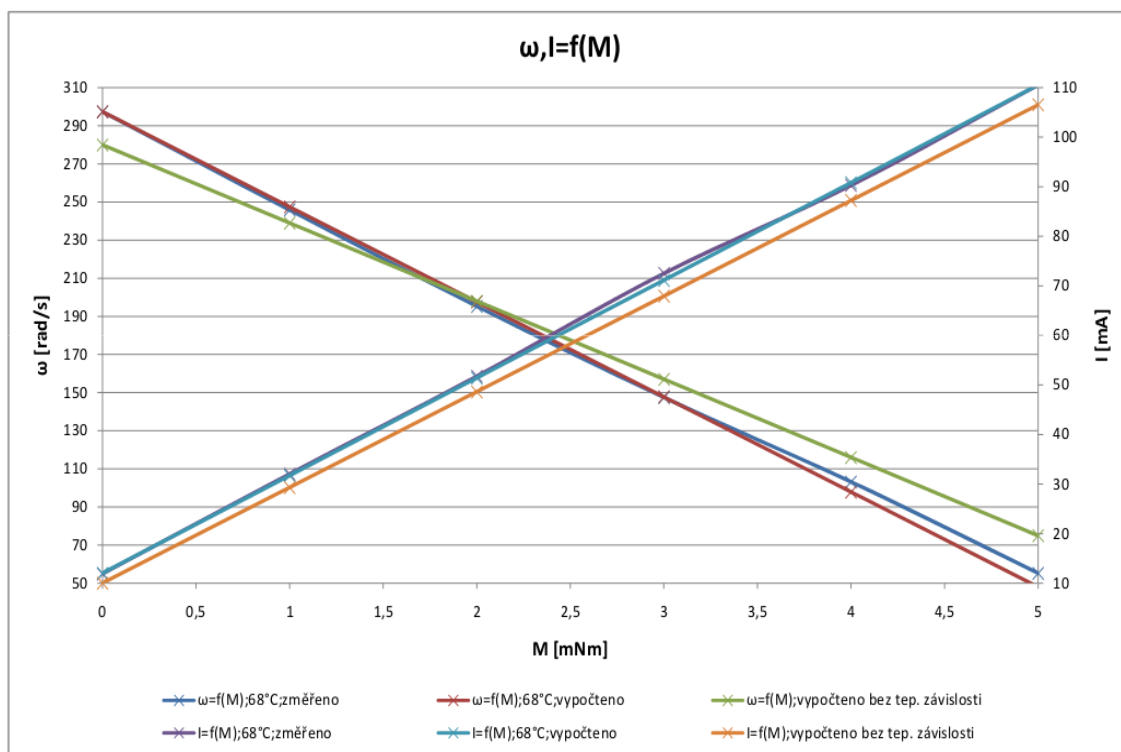
Obr. 6.1: Charakteristika pro 17V



Obr. 6.2: Mapa otáčiek na momentu 10 - 17V

7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V teoretickém úvodu jsme si rozebrali použitý aktuátor a motor. Představili jsme si rovnice, kterými je daný motor popsán a upravili jsme si je do tvaru, aby vyhovovali našim požadavkům. Provedli jsme výpočet konstant motoru a následně vytvořili model motoru podle typické charakteristiky udávané výrobcem a také podle průměrné naměřené charakteristiky. Model motoru vytvořený podle typické charakteristiky výrobce uvažuje napájecí napětí 24V a teplotu 25°C. Pro tyto podmínky se náš model osvědčil, avšak takto vytvořený model nereaguje na změny vyvolané v důsledku změny teploty motoru. Jedná se především o změnu odporu R_a a změnu konstant motoru. Proto jsme vzorec doplnili o změnu hodnoty odporu R_a i o změnu konstant motoru. Zjistili jsme že s rostoucí teplotou odpor R_a lineárně roste, zatímco velikost konstant motoru lineárně klesá. Model, který obsahuje již tyto funkce obsahuje se ukázal jako dostatečně přesný vzhledem k změřeným charakteristikám motorů. Pro porovnání naměřené charakteristiky s výpočtem bez teplotní závislosti a s teplotní závislostí nám slouží tabulka A.39 a graf 7.1.



Obr. 7.1: Porovnání zatěžovacích charakteristik

Pro regulaci napájecího napětí jsme použili již zmíněný vzorec popisující náš motor. Z něj jsme si vyjádřili napájecí napětí a poté ještě nahradili zatěžovací moment odebíraným proudem. Tato úprava byla provedena z důvodu, že celé řízení motoru bude provedeno právě podle údaje o odebíraném proudě. V části *Měření* jsme kromě zatěžovací charakteristiky změřili i závislost napájecího napětí při daných otáčkách a pro různé teploty. Dané charakteristiky jsme si porovnali s charakteristikou vypočtenou a zjistili jsme, že se příliš neliší. Nejpřesněji vyšla pro měření na teplotě 28°C . Při ostatních teplotách je měření zatíženo jistou chybou danou kolísáním teploty kolem teploty požadované. I přes tuto chybu lze říci, že náš teoretický model odpovídá naměřeným hodnotám. Všechna měření byla provedena na měřícím zařízení firmy Honeywell. Měřící zařízení se skládalo z:

- měřícího přípravku
- optického snímače otáček
- termočlátku pro měření teploty motoru
- napájecího zdroje
- počítače se SW pro měření charakteristik motorů
- digitálního multimetru FLUX

Pomocí měřícího přípravku bylo možné na motoru nastavit požadovaný zatěžovací moment, napětí, případně otáčky motoru. Hodnota otáček motoru byla určována optickým snímačem, na plášti motoru byl umístěn termočlánek pro určení teploty motoru. Pomocí digitálního multimetru jsme chtěli měřit odpor vinutí motoru před a po měření a na základě této informace si výpočtem ověřit teplotu motoru. Zjistili jsme však, že tento způsob je velmi nepřesný, neboť výsledky měření byly závislé na poloze kartáčů na komutátoru. Proto jsme se rozhodli využít pouze informace získané z pláště motoru.

8 ZÁVĚR

V této práci jsme se zabývali bezsensorovým řízením stejnosměrného kartáčového motoru, spolu s aktuátorem firmy Honeywell. Nejprve jsme vysvětlili použitý aktuátor a následně jsme se zabývali motorem. Vysvětlili jsme si druhy a vlastnosti stejnosměrných kartáčových motorů, jejich konstrukci a princip činnosti. V části konstrukce byly blíže vysvětleny použité materiály a jejich vlastnosti. Jedná se především o teplotní závislost použitých materiálů.

Vytvořili jsme matematický model motoru a uvedené možnosti regulace. V našem případě jsme zvolili metodu kompenzace zatěžovací charakteristiky, kde regulace probíhá na základě změny napájecího napětí. Důležitou částí práce je výpočet konstanty motoru, která je jedinou neznámou ve vzorci, který daný motor popisuje. Konstantu motoru jsme vypočítali pro typickou charakteristiku udávanou výrobcem a pro typickou charakteristiku námi změřenou. Model pro námi změřenou charakteristiku, na rozdíl od modelu pro typickou charakteristiku výrobce, reaguje na změny teploty, proto by tento model mohl být uplatněn prakticky. Vypočítané modely jsme početně i graficky ověřili. Model počítaný pro námi naměřenou charakteristiku jsme si ověřili na dvou různých teplotách, čímž jsme si potvrdili, že takto vytvořený model je schopen pracovat při různých teplotních podmínkách.

Jako podklad pro výpočet konstant motoru nám posloužilo i měření, které jsme provedli na dvou nových a dvou již použitých motorech. Díky porovnání výsledků jednotlivých měření jsme určili typickou charakteristiku a hodnoty z této charakteristiky jsme využili pro výpočet modelu motoru.

V další části jsme se zabývali regulačním schematem a řízením motoru. Tato část slouží k vysvětlení, na základě čeho bude regulace fungovat, co je pro nás vstupní informace a co na základě ní budeme regulovat. Zjistili jsme, že pro udržení konstantních otáček při různém zatěžovacím momentu je napájecí napětí funkcí již zmíněného zatěžovacího momentu (respektive proudu, který motor odebírá). Princip jsme si vysvětlili na příkladu tří požadovaných otáček, i když pro námi použitý aktuátor není možné si volit z více otáček. Přesto je dobré tuto možnost uvést, neboť tato metoda může být použita i v jiném druhu aktuátoru, kde tato možnost může být.

Po uvážení možnosti napájení jsme zjistili, že nelze vycházet z nominální hodnoty napájecího napětí, neboť tuto hodnotu nejsme schopni zaručit. Proto je zde uvedena naše maximální hodnota napájení a jak pro ni bude vypadat zatěžovací charakteristika, nebo mapa závislost otáček na momentu pro různá napájecí napětí. Mapa závislosti otáček na momentu pro různá napětí nám slouží především jako informace o rozsahu napětí a z toho plynoucích možnostech zatížení daného motoru.

LITERATURA

- [1] BASTIAN, Peter. *Praktická elektrotechnika*. 1. vydání. Praha: Europa - Sobotáles cz., 2004, 295 s. ISBN 80-86706-07-9.
- [2] MAXON. *Malé stejnosměrné motory*. [online],2002, Dostupné z URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf>.
- [3] Michael Faraday,ENCYKLOPEDIA BRITANNICA. *Inc. Encyclopedie Britannica*[online].2012[cit.10.11.2012]. Dostupné z URL: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/201705/Michael-Faraday>>.
- [4] PETŘÍČEK, Antonín. *Stejnoseměrné motory s permanentními magnety*.. 1. vydání. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1970. 80 s. ISBN TK-A-0153.690 .
- [5] Products Honeywell. *Servopohony pro ventily*. [online],2010, Dostupné z URL: <http://products.ecc.emea.honeywell.com/cz/ecatdata/pdf_m5410_m5410c1001.html>.
- [6] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2001. 86 s. ISBN 80-214-1978-4.
- [7] *Magneticky tvrdé ferity*. [online],Dostupné z URL: <<http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticky-tvrde-ferity/>>.

SEZNAM PŘÍLOH

A Seznam příloh, obrázků a tabulek	54
A.1 Tabulky	54
A.2 Grafy	72
A.3 Nový motor 1	72
A.4 Nový motor 2	74
A.5 Motor po 80K cyklu	76
A.6 Motor po 100K cyklu	78

A SEZNAM PŘÍLOH, OBRÁZKŮ A TABULEK

A.1 Tabulky

Tab. A.1: Hodnoty odečtené z typ. charakteristiky výrobce

Odečteno z grafu pro 24V						
n[1/min]	n [rad/s]	M [g-cm]	M[Nm]	I[A]	P[W]	n[%]
3850	403,1711	0	0	0,01	0	0
3750	392,6991	2,5	0,000245	0,015	0,1	25
3500	366,5191	10	0,00098	0,03	0,35	50
3250	340,3392	17	0,001666	0,045	0,58	55,6
3000	314,1593	25	0,00245	0,058	0,75	55
2750	287,9793	31	0,003038	0,07	0,87	52,5
2500	261,7994	38	0,003724	0,083	0,99	48
2250	235,6194	45	0,00441	0,095	1,05	45
2000	209,4395	52	0,005096	0,107	1,056	41,5
1750	183,2596	60	0,00588	0,123	1,07	35,5
1500	157,0796	67	0,006566	0,133	1,04	31
1250	130,8997	74	0,007252	0,151	0,95	25,5
1000	104,7198	81	0,007938	0,162	0,85	22,5
750	78,53982	88	0,008624	0,179	0,68	17
500	52,35988	95	0,00931	0,19	0,5	10
250	26,17994	103	0,010094	0,208	0,25	5
0	0	110	0,01078	0,22	0	0

Tab. A.2: Hodnoty vypočítané

VYPOČÍTANÉ HODNOTY PRO 24V						
M [g-cm]	M[Nm]	ω [rad/s]	I1 [A]	PeI[W]	Pmech[W]	η [%]
0	0	403,17	0,01	0,24	0,000	0,00
2,5	0,000245	394,01	0,01	0,35	0,097	27,30
10	0,00098	366,52	0,03	0,69	0,359	51,74
17	0,001666	340,86	0,04	1,01	0,568	56,11
25	0,00245	311,54	0,06	1,38	0,763	55,49
31	0,003038	289,55	0,07	1,65	0,880	53,37
38	0,003724	263,89	0,08	1,97	0,983	49,99
45	0,00441	238,24	0,10	2,28	1,051	46,00
52	0,005096	212,58	0,11	2,60	1,083	41,64
60	0,00588	183,26	0,12	2,97	1,078	36,34
67	0,006566	157,60	0,14	3,28	1,035	31,52
74	0,007252	131,95	0,15	3,60	0,957	26,57
81	0,007938	106,29	0,16	3,92	0,844	21,53
88	0,008624	80,63	0,18	4,24	0,695	16,41
95	0,00931	54,98	0,19	4,56	0,512	11,24
103	0,010094	25,66	0,20	4,92	0,259	5,27
110	0,01078	0,00	0,22	5,24	0,000	0,00

Nový motor 1

Tab. A.3: Závislost otáčiek na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac}$ [°C]	26	$t_{na\ konc}$ [°C]	27,6	U_{nap} [V]	10
R_a na zac [Ω]	113,3	R_a na kon [Ω]	122,7		
				opac smer	
M[mNm]	ω[1\min]	ω [rad/s]	I [mA]	ω[1\min]	ω [rad/s]
0	1471	154,04	10,6	1542	161,48
1	1142	119,59	28		
2	831	87,02	46		
3	532	55,71	63,5	531	55,61
4	170	17,80	92		
5					

Tab. A.4: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	69	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	68
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	145	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	133
$U_{nap} [V]$	10		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	1604	167,97	10,5
1	1103	115,51	30
2	644	67,44	51
3	210	21,99	69,4
4			
5			

Tab. A.5: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	26	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	26,5	$U_{nap} [V]$	13
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	113	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	116		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	1952	204,41	11,1	2066	216,35
1	1612	168,81	30		
2	1292	135,30	47		
3	972	101,79	64	1014	106,19
4	668	69,95	84		
5	378	39,58	103		

Tab. A.6: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	69	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	68
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	137	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	140
$U_{nap} [V]$	13		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2133	223,37	10,9
1	1642	171,95	31,5
2	1180	123,57	51,4
3	722	75,61	70
4	280	29,32	99
5			

Tab. A.7: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	26,6	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,5	$U_{nap} [V]$	15
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	109,4	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	112		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2285	239,28	11,6	2417	253,11
1	1932	202,32	30		
2	1603	167,87	48,6		
3	1295	135,61	66,1	1366	143,05
4	978	102,42	85,8		
5	648	67,86	101		

Tab. A.8: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	70	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	68
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	144	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	140
$U_{nap} [V]$	15		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2511	262,95	11,8
1	1988	208,18	32
2	1513	158,44	52
3	1059	110,90	73
4	505	52,88	96
5			

Tab. A.9: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	24,6	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29,5	$U_{nap} [^{\circ}C]$	17
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	121,4	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	118,4		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2568	268,92	11,7	2785	291,64
1	2225	233,00	29,9	2411	252,48
2	1898	198,76	48,1	2036	213,21
3	1593	166,82	66,6	1680	175,93
4	1281	134,15	84,8	1360	142,42
5	953	99,80	102		

Tab. A.10: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68,5	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	67
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	143	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	140
$U_{nap} [V]$	17		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2825	295,83	12,3
1	2328	243,79	32
2	1848	193,52	51
3	1349	141,27	73
4	911	95,40	89
5	430	45,03	110

Tab. A.11: Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	25,5	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	26,6
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	122,6	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	124
$\omega[1\min]$	1000		
M[mNm]	U [V]		
1	9,56		
2	11,9		
3	13,75		
4	15,76		
5	17,72		

Nový motor 2

Tab. A.12: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	29	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,8	$U_{nap} [V]$	10
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	124	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	117		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	1475	154,46	11		
1	1133	118,65	29		
2	812	85,03	48		
3	495	51,84	65	516	54,04
4	130	13,61	89		

Tab. A.13: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	132	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	128
$U_{nap} [V]$	10		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	1561	163,47	11
1	1109	116,13	30
2	683	71,52	50
3	264	27,65	67

Tab. A.14: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28,8	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,9	$U_{nap} [V]$	13
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	111	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	124		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	1965	205,77	12		
1	1612	168,81	31		
2	1286	134,67	49		
3	965	101,05	67	1022	107,02
4	659	69,01	83		
5	335	35,08	110		

Tab. A.15: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	65
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	135	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	128
$U_{nap} [V]$	13		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2109	220,85	11
1	1641	171,85	31
2	1222	127,97	50
3	800	83,78	69
4	375	39,27	93

Tab. A.16: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,6	$U_{nap} [V]$	15
$R_{a\ na\ zac} [\Omega]$	122	$R_{a\ na\ kon} [\Omega]$	111		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2270	237,71	13		
1	1912	200,22	32		
2	1587	166,19	50		
3	1257	131,63	69	1400	146,61
4	945	98,96	87		
5	632	66,18	103		

Tab. A.17: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	67,7
$R_{a\ na\ zac} [\Omega]$	137	$R_{a\ na\ kon} [\Omega]$	130
$U_{nap} [V]$	15		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2435	254,99	12
1	1957	204,94	32
2	1518	158,96	52
3	1082	113,31	73
4	675	70,69	90
5	221	23,14	105

Tab. A.18: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	24,5	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28	$U_{nap} [V]$	17
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	115	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	122		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2592	271,43	12		
1	2230	233,53	31		
2	1892	198,13	50		
3	1572	164,62	68	1708	178,86
4	1265	132,47	86		
5	949	99,38	104		

Tab. A.19: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	63
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	129	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	128
$U_{nap} [V]$	17		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2767	289,76	13,5
1	2340	245,04	31
2	1880	196,87	52
3	1475	154,46	70
4	1092	114,35	88
5	670	70,16	112

Tab. A.20: Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28,3	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29,4
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	115,3	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	122
$\omega[1\min]$	1000		
M[mNm]	U [V]		
1	9,11		
2	11,15		
3	13,16		
4	15,16		
5	17,29		

Motor 80K cyklu

Tab. A.21: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,2	$U_{nap} [V]$	10
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	109	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	110,5		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	1545	161,79	10,5		
1	1174	122,94	28,9		
2	851	89,12	48,6	950	99,48
3	532	55,71	66		
4	201	21,05	88		

Tab. A.22: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66,3
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	142	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	132
$U_{nap} [V]$	10		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	1638	171,53	10,5
1	1161	121,58	28,7
2	698	73,09	48
3	279	29,22	65

Tab. A.23: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	29	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29,1	$U_{nap} [V]$	13
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	109,7	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	110		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2056	215,30	10,3		
1	1662	174,04	29,6	1797	188,18
2	1334	139,70	51		
3	1010	105,77	64		
4	680	71,21	82		
5	379	39,69	105		

Tab. A.24: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	68,4
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	146	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	134
$U_{nap} [V]$	13		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2188	229,13	8,4
1	1682	176,14	29
2	1192	124,83	49
3	746	78,12	68
4	281	29,43	89

Tab. A.25: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28,5	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29,3	$U_{nap} [V]$	15
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	111,3	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	111		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2391	250,38	11,8		
1	1999	209,33	33		
2	1655	173,31	51		
3	1322	138,44	67	1442	151,01
4	982	102,83	87		
5	655	68,59	101		

Tab. A.26: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66,6
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	144	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	134
$U_{nap} [V]$	15		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2552	267,24	9,7
1	2062	215,93	30
2	1587	166,19	48
3	1130	118,33	69
4	694	72,68	89
5	197	20,63	111

Tab. A.27: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	27,2	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	27,5	$U_{nap} [V]$	17
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	108,4	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	111,3		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2722	285,05	12,2		
1	2321	243,05	30,7		
2	1979	207,24	47,8		
3	1643	172,05	70	1781	186,51
4	1319	138,13	86		
5	970	101,58	100		

Tab. A.28: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66,8
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	141	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	135
$U_{nap} [V]$	17		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2922	305,99	9,7
1	2415	252,90	31
2	1933	202,42	49
3	1475	154,46	70
4	1028	107,65	89
5	562	58,85	107

Tab. A.29: Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	27,7	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29,8
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	109,4	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	113,1
$\omega[1\min]$	1000		
M[mNm]	U [V]		
1	8,85		
2	10,8		
3	12,85		
4	14,94		
5	17,15		

Motor 100K cyklu

Tab. A.30: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	29	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,5	$U_{nap} [V]$	10
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	108	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	106		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	1519	159,07	10		
1	1178	123,36	29		
2	841	88,07	48		
3	512	53,62	67	545	57,07
4	190	19,90	94		

Tab. A.31: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	67
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	133	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	127
$U_{nap} [V]$	10		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	1613	168,91	10
1	1103	115,51	33
2	639	66,92	53
3	238	24,92	71

Tab. A.32: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	29	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	29	$U_{nap} [V]$	13
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	107	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	108		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2027	212,27	11		0
1	1672	175,09	30		
2	1320	138,23	48		
3	977	102,31	67	1060	111,0029
4	632	66,18	85		
5	355	37,18	100		

Tab. A.33: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	133	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	128
$U_{nap} [V]$	13		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2135	223,58	11
1	1650	172,79	31
2	1122	117,50	54
3	706	73,93	72
4	279	29,22	90

Tab. A.34: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac}$ [°C]	28,5	$t_{na\ konc}$ [°C]	29	U_{nap} [V]	15
R_a na zac [Ω]	107	R_a na kon [Ω]	108		
				opac smer	
M[mNm]	ω[1\min]	ω [rad/s]	I [mA]	ω[1\min]	ω [rad/s]
0	2366	247,77	11		
1	2016	211,12	29		
2	1670	174,88	47		
3	1320	138,23	66	1372	143,68
4	984	103,04	84		
5	650	68,07	102		

Tab. A.35: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac}$ [°C]	68	$t_{na\ konc}$ [°C]	67,9
R_a na zac [Ω]	135	R_a na kon [Ω]	128
U_{nap} [V]	15		
M[mNm]	ω[1\min]	ω [rad/s]	I [mA]
0	2502	262,01	11
1	2012	210,70	31
2	1487	155,72	53
3	1003	105,03	77
4	545	57,07	97

Tab. A.36: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,6	$U_{nap} [V]$	17
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	105	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	107		
				opac smer	
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$
0	2691	281,80	12		
1	2345	245,57	30		
2	1996	209,02	48		
3	1643	172,05	67	1699	177,92
4	1300	136,14	86		
5	966	101,16	105		

Tab. A.37: Závislost otáček na zatěžovacím momentu

$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	68	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	66,5
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	132	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	129
$U_{nap} [V]$	17		
M[mNm]	$\omega[1\min]$	$\omega [rad/s]$	I [mA]
0	2843	297,72	12
1	2305	241,38	34
2	1797	188,18	55
3	1332	139,49	77
4	908	95,09	95
5	446	46,71	113

Tab. A.38: Závislost napájecího napětí na zatěžovacím momentu

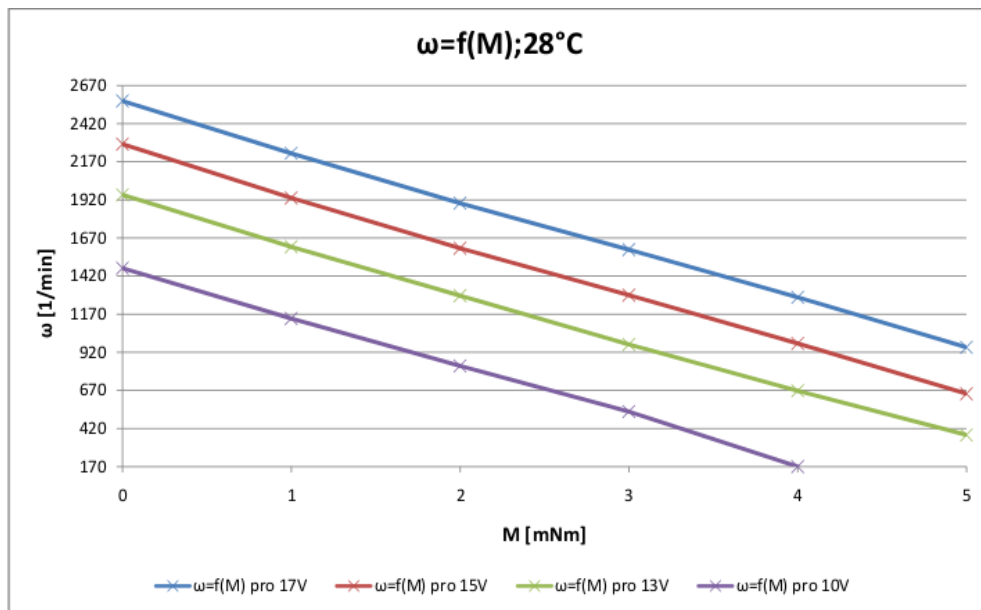
$t_{na\ zac} [^{\circ}C]$	28,7	$t_{na\ konc} [^{\circ}C]$	28,5
$R_a\ na\ zac [\Omega]$	107	$R_a\ na\ kon [\Omega]$	108
$\omega[1\min]$	1000		
M[mNm]	U [V]		
1,57	10		
2,53	12		
3,92	15		
4,81	17		

Tab. A.39: Zatěžovací charakteristiky změřeno, bez/s teplotní závislostí

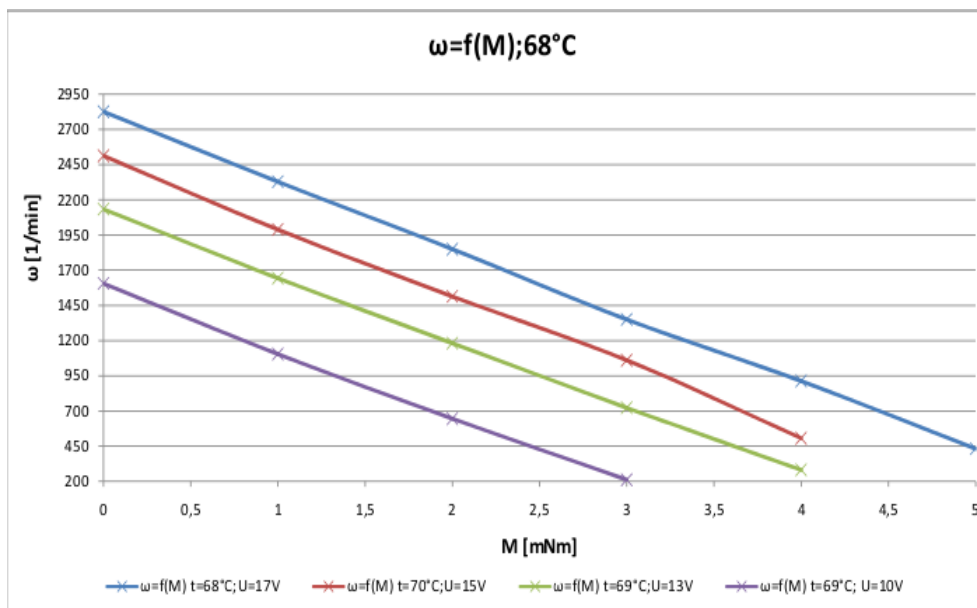
konstanty vypočítané pro 28°C				konstanty vypočítané pro 68°C			
$C\Phi_{\text{BEMF}}=$	0,0566	$C\Phi_{\text{TORQ}}=$	0,0557	$C\Phi_{\text{BEMF}}=$	0,05199	$C\Phi_{\text{TORQ}}=$	0,0508
M [Nm]	M [mNm]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	ω [rad/s]	I [mA]; t=68°C
0	0	276,81	297,32	276,80	297,33	279,93	11,88
0,001	1	240,92	247,44	238,79	245,78	238,93	32,00
0,002	2	205,03	197,56	203,29	195,25	197,94	51,75
0,003	3	169,14	147,69	168,89	147,42	156,94	72,50
0,004	4	133,24	97,81	135,22	103,12	115,95	90,25
0,005	5	97,35	47,93	100,48	55,19	74,95	110,50
		vypočítáno		průměr motorů		bez tep záv	změřeno
		28°C	68°C	28°C	68°C		

A.2 Grafy

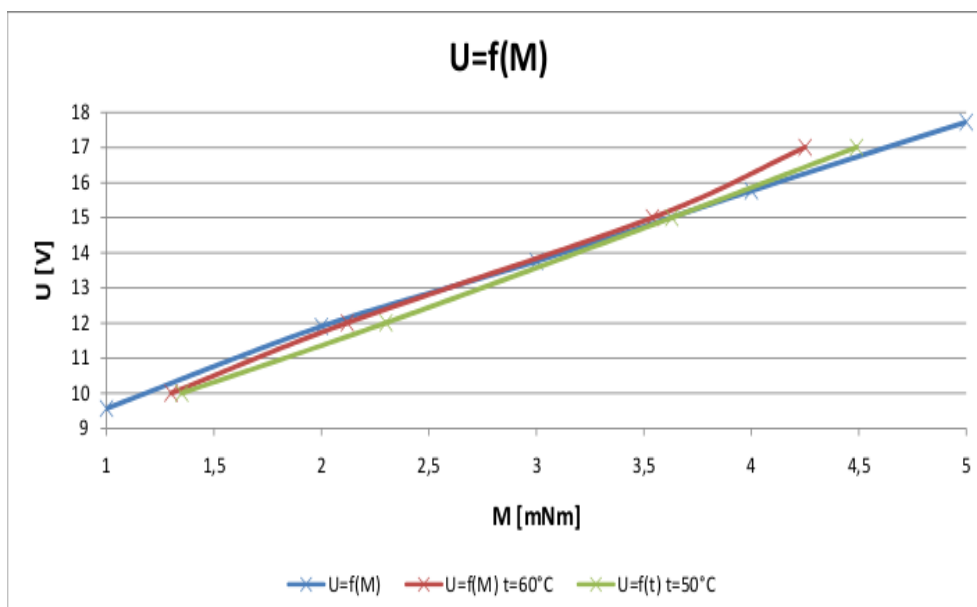
A.3 Nový motor 1



Obr. A.1: Zatěžovací charakteristika pro $t=28^\circ\text{C}$

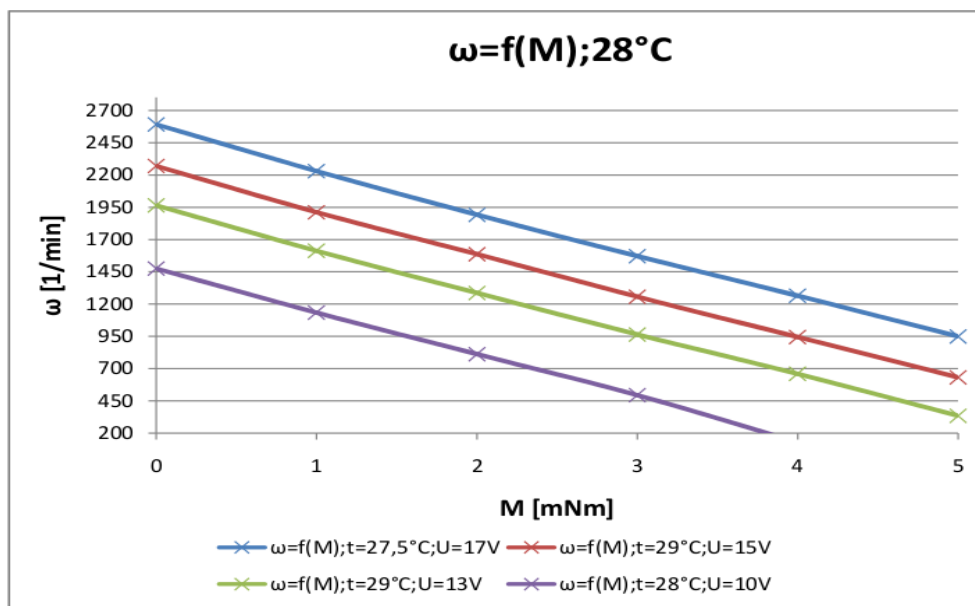


Obr. A.2: Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$

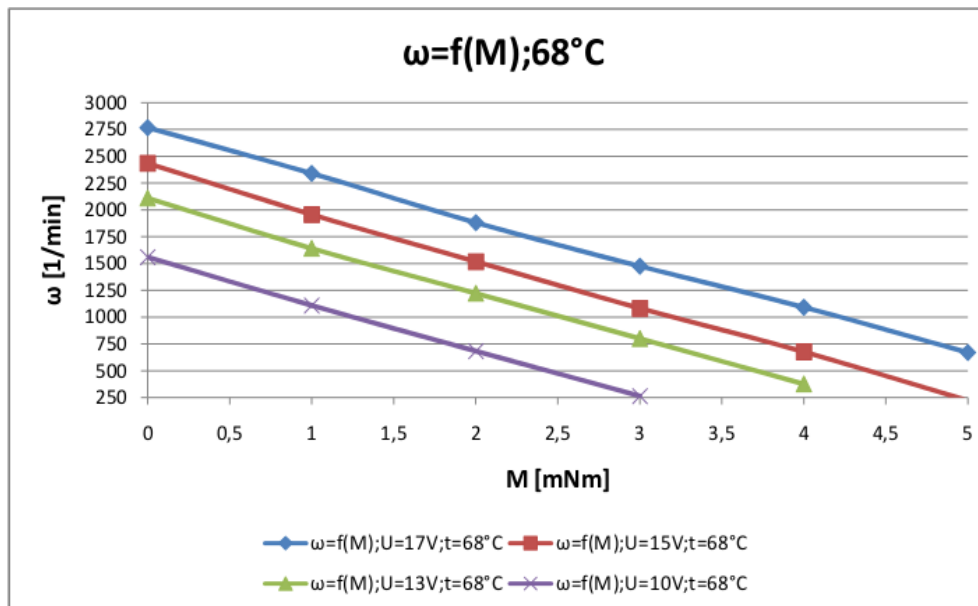


Obr. A.3: Závislost napětí na momentu

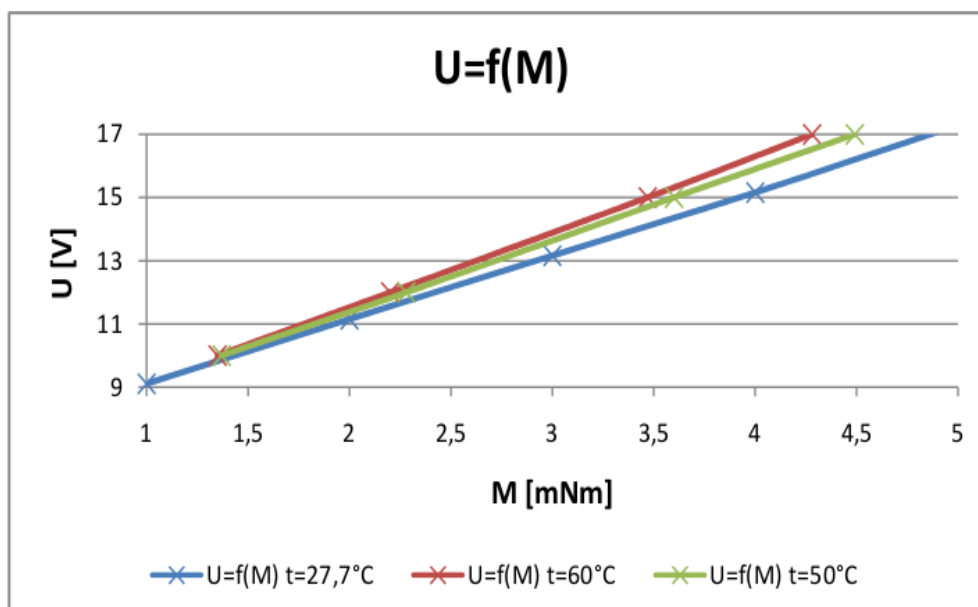
A.4 Nový motor 2



Obr. A.4: Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$

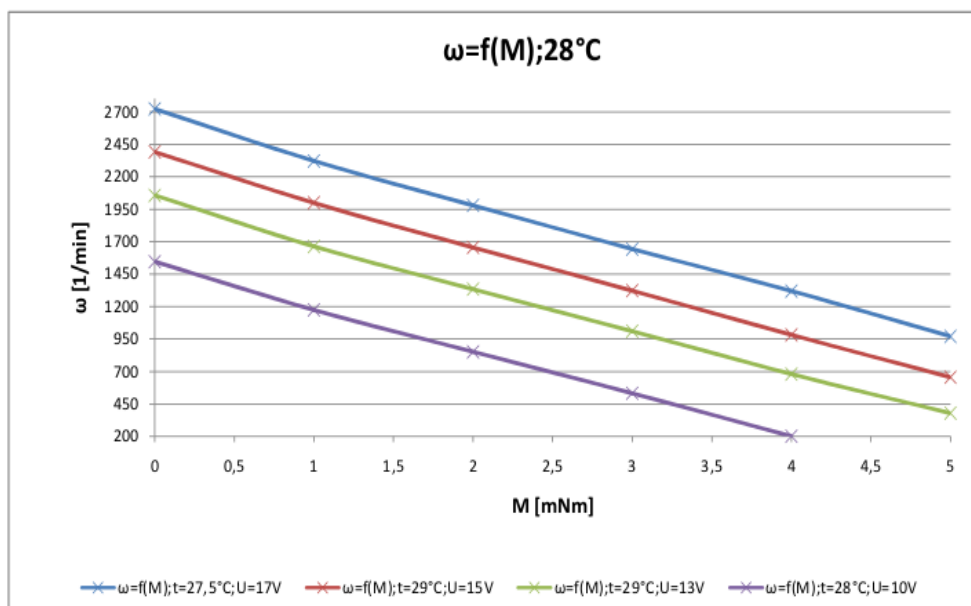


Obr. A.5: Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$

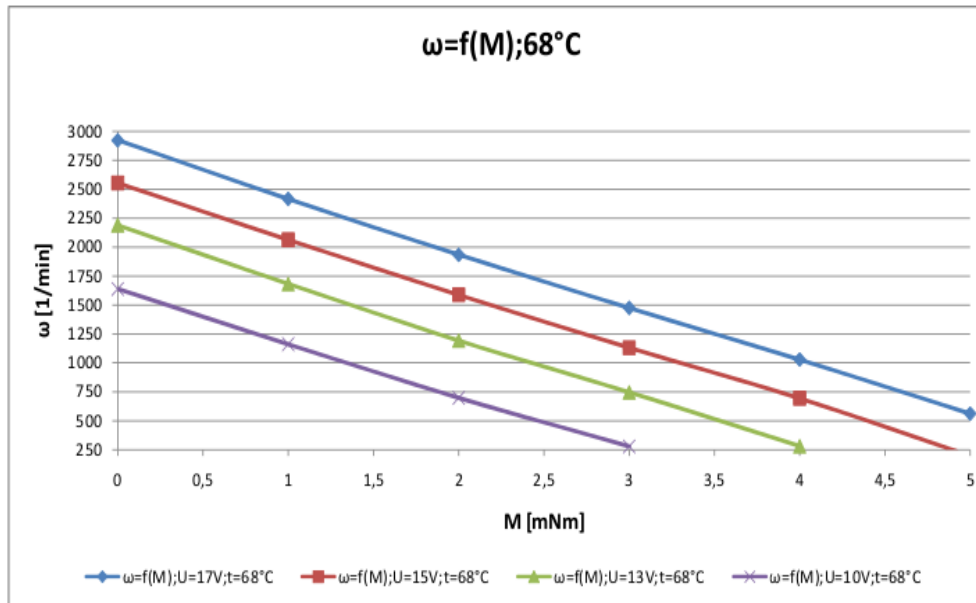


Obr. A.6: Závislost napětí na momentu

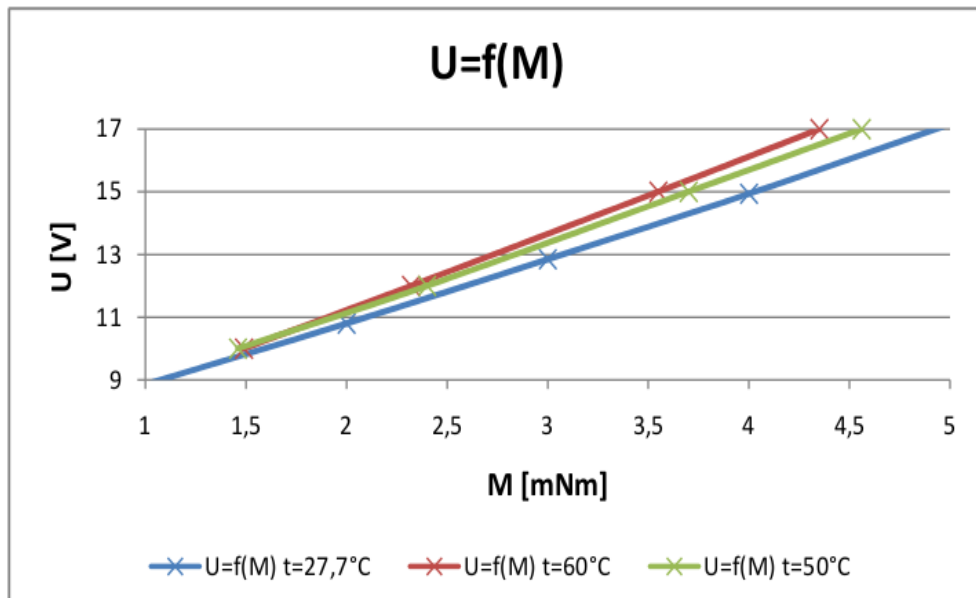
A.5 Motor po 80K cyklu



Obr. A.7: Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$

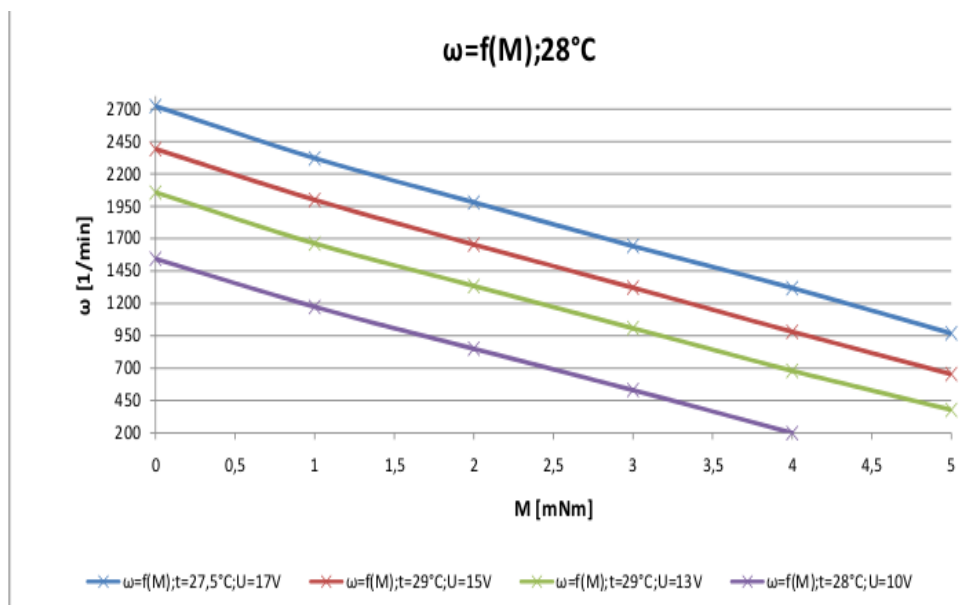


Obr. A.8: Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$

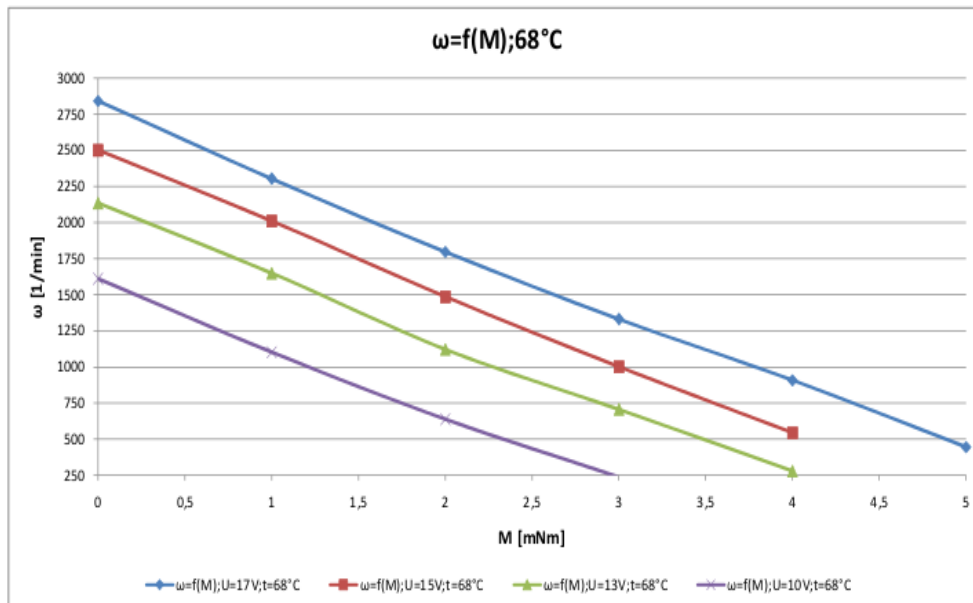


Obr. A.9: Závislost napětí na momentu

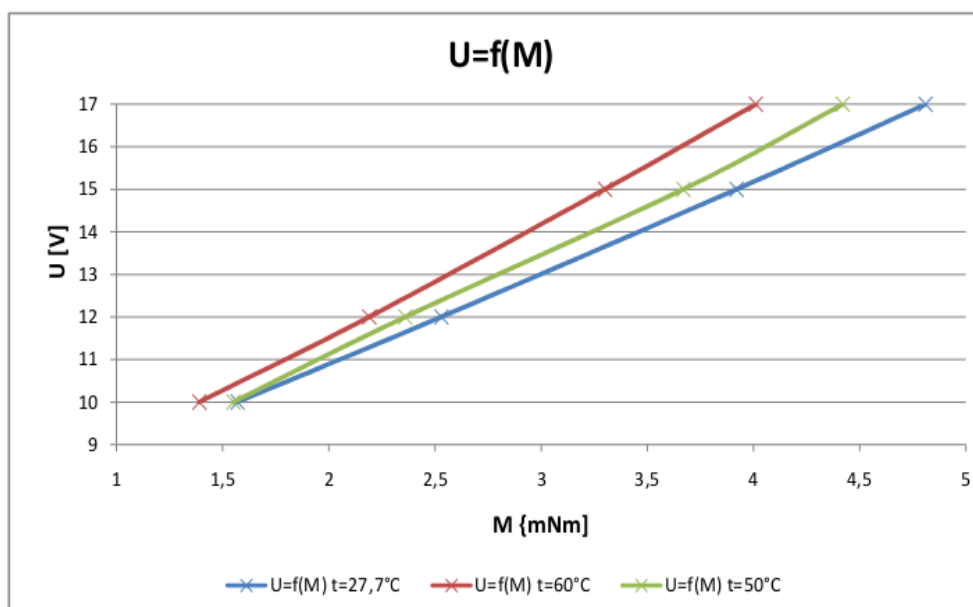
A.6 Motor po 100K cyklu



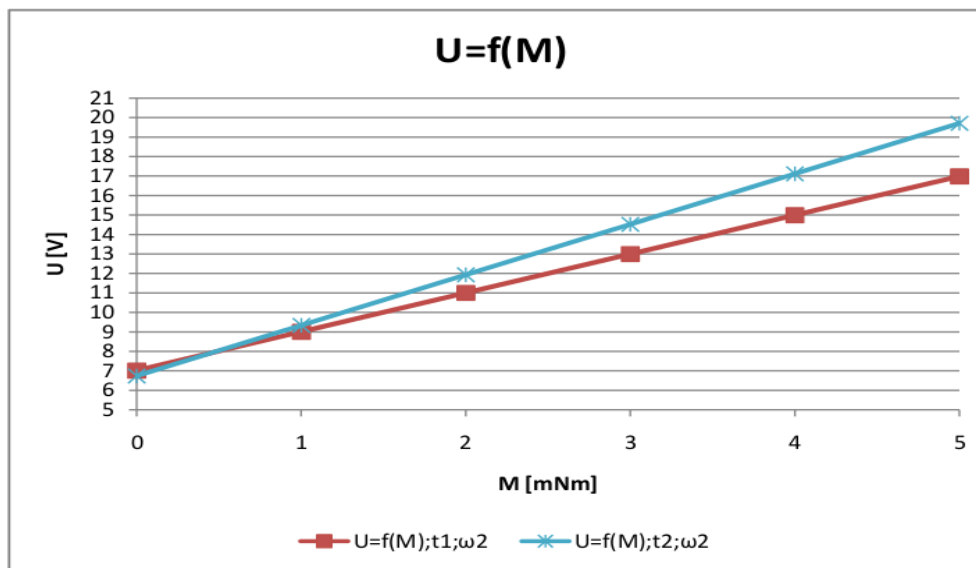
Obr. A.10: Zatěžovací charakteristika pro $t=28^{\circ}\text{C}$



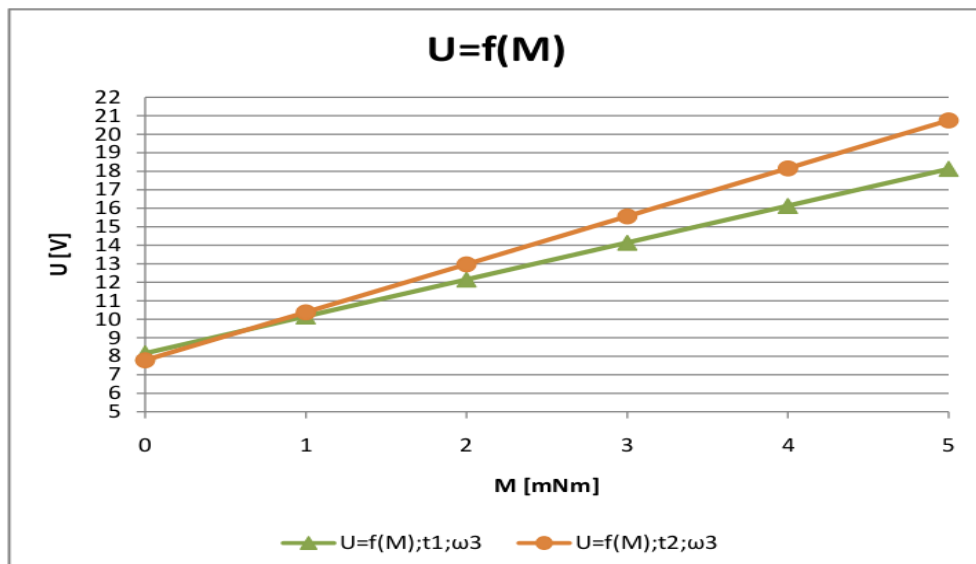
Obr. A.11: Zatěžovací charakteristika pro $t=68^{\circ}\text{C}$



Obr. A.12: Závislost napětí na momentu



Obr. A.13: Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C



Obr. A.14: Závislost napětí na momentu pro 28°C a 68°C