



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Automatické měření charakteristik krokových motorů

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Michal Filip**

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Automatic measurement of stepper motor characteristics

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Michal Filip**

Supervisor: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Filip**
Osobní číslo: **M14000198**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Automatické měření charakteristik krokových motorů**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Detailně se seznamte se základními vlastnostmi, výhodami a nevýhodami krokových motorů.
2. Na reálné sestavě krokového a stejnosměrného motoru s napájecími moduly vytvořte program, který umožňuje manuální a automatické měření charakteristik krokového motoru.
3. Jako nadstavbu vytvořte funkční vizualizaci pomocí Powerpanelu od firmy BaR. Program bude také umožňovat ovládání měření přes internet.
4. Podrobně vyhodnoťte naměřené výsledky a funkčnost programu.



Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Kompletní pohony s krokovými motory, Microcon s.r.o.**
- [2] **Stepping motors and their microprocessor controls, Sugawara, Akira, Oxford, 1994**
- [3] **Katalogové listy a firemní literatura BaR**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kubín, Ph.D.**

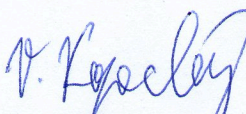
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce: **doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.**


Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16. května 2016

Podpis:

Michal Pilyk



Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Jiřímu Kubínovi, Ph.D. za jeho odborné vedení práce a podnětné rady.

Dále bych chtěl poděkovat svému konzultantovi panu Doc. Ing. Josefu Černoorskému, Ph.D. za jeho odborné rady.

V neposlední řadě mé největší poděkování patří rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.



Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem vzdálené úlohy pro měření charakteristik krokových motorů. V úvodu je práce zaměřena na analýzu krokového motoru. Velký důraz je kladen především na jeho charakteristiky. Praktická část se zabývá návrhem měření charakteristik krokového motoru 80MPH1.300S14-01, kde jako zátěž krokového motoru je použit stejnosměrný motor Doga DO1684113B04/3059.

Pro měření momentové charakteristiky je zvolen systém postupného zvyšování momentu až do varování ztráty kroku. Využití funkce varování o ztrátě kroku je možné jen díky knihovně ACP10_MC (knihovna na řízení krokových motorů) a PLC karty X20SM1436. Tato funkce porovnává nastavené mezní hodnoty proudu s aktuálními hodnotami proudu na krokovém motoru. Funkce při dosažení mezních hodnot proudu nastaví svůj výstup na jedničku. Statická charakteristika je měřena z rovnovážného stavu nabuzeného krokového motoru. Postupným zvyšováním zátěžného momentu se vychyluje rotor z rovnovážného stavu. Při změně polohy rotoru se aktuální hodnoty natočení rotoru a zátěžného momentu zapíše do pole. Tento postup je aplikován až do varování o ztrátě kroku. Momentová charakteristika je rozdělena na dvě samostatné části. Start/stop charakteristika je založena na zvyšování zátěžného momentu, který se má z nulových otáček skokově roztočit bez ztráty kroku. Pokud krokový motor ztratí krok, zapíše se aktuální hodnoty zátěžného momentu a frekvence kroku. Charakteristika řízeného zrychlování je založena na kontinuálním zvyšování zátěžného momentu až do varování o ztrátě kroku. Obě charakteristiky jsou měřeny v rozsahu frekvencí od 0,01 do 1,57 Hz. Jednotlivé naměřené charakteristiky se zobrazují pomocí předem naprogramovaného algoritmu pro XY graf ve vizualizaci. Program je koncipován tak, že je možné změřit charakteristiky přímo u motoru pomocí PowerPanelu a nebo přes internet. U obou těchto variant měření je možné zvolit, zda chce uživatel vyhodnotit charakteristiky manuálně nebo automaticky. Závěr práce se zabývá porovnáním naměřených hodnot a aplikováním měření pro potřeby průmyslu. Celé měření bylo programováno v Automation studiu ve strukturovaném textu na PLC platformě od firmy B&R.

Klíčová slova

Řízení motorů, Programování PLC, Charakteristiky motorů, Krokové motory, Vizualizace



Abstract

This diploma thesis deals with remote tasks to measure steppers motor characteristics. In the introductory chapter the work focuses on analysis of stepping motors. A great emphasis is laid on its characteristics. The practical part deals with the measurement of characteristic of stepping motor 80MPH1.300S14-01 where is used a direct motor Doga DO1684113B04/3059 as a load for the stepping motor.

For measuring a torque characteristic an increasing load was used until the warning of loss step. The functional use of warning of a loss step is able thanks to the library ACP10_MC (library for controlling stepping motors) and PLC card X20SM1436. This function compares settled limited values of stream with current values of stream of stepping motor. The function sets its number to one when it reaches the limited values. The static characteristic is measured from the balanced condition energized stepping motor. A rotor deviates from balanced condition by progressive increase in power moment. If the position of rotor changes the current values of rotor's movement are written into a field. This method is applied until the warning of loss step. The moment characteristic is divided into two parts. Star/stop characteristic is based on increase of load moment which is supposed to spin from zero revolution in a leap way without loss of step. If the stepping motor loses its step, the current values of steam moment are written down as well as the frequency of step. Characteristic of controlled acceleration is based on continual increase of steam moment to the warning of loss step. Both characteristics are measured in a scope of frequencies from 0,01 to 1,57 Hz. The particular measured characteristics are shown thanks to pre-programmed algorithm for XY graph in visualization. The program is framed in a way that it is possible to measure characteristics right next to the motor thanks to a PowerPanel or via the Internet. In both options of measurement it is possible to choose if the user wants to evaluate characteristics manually or automatically. The conclusion of the work deals with the comparison of measured values and with applying measurement for industrial needs. The measurement was programmed in Automation studio in structured text to the platform PLC by B&R company.

Key words

Drives control, Programming PLC, Characteristic motor, Stepper motor, Visualization



Obsah

Obsah.....	7
Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	10
Úvod.....	12
1 Krokové motory	13
1.1 Princip krokového motoru.....	15
1.1.1 Krokový motor s pasivním rotorem.....	15
1.1.2 Krokový motor s aktivním rotorem.....	15
1.2 Řízení krokového motoru	17
1.2.1 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze.....	17
1.2.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází	19
1.2.3 Osmitaktní řízení	20
1.2.4 Mikrokrokování.....	21
1.3 Charakteristiky krokového motoru.....	22
1.3.1 Statická charakteristika krokového motoru	22
1.3.2 Momentová charakteristika krokového motoru.....	22
2 Měření charakteristik krokového motoru	28
2.1 Statická charakteristika.....	37
2.2 Momentová charakteristika	40
2.2.1 Charakteristika start/stop	40
2.2.2 Charakteristika řízeného zrychlování	43
3 Vizualizace	46
3.1 Ovládání měření přes Powerpanel.....	46
3.1.1 Knihovna Visapi.....	48
3.1.2 Změna souřadného systému	50



3.1.3	XY graf.....	52
3.2	Ovládání měření přes vzdálený přístup.....	54
4	Naměřené charakteristiky.....	57
4.1	Statická charakteristika.....	57
4.2	Momentová charakteristika.....	59
4.2.1	Start/ stop charakteristika.....	59
4.2.2	Charakteristika řízeného zrychlování.....	61
	Závěr.....	64
	Bibliografie.....	68
	Příloha A.....	70
	Příloha B - Příložené CD.....	77



Seznam symbolů a zkratek

°	Jednotka úhlu natočení
KM	Krokový motor
α	Velikost kroku [°]
β	Statický úhel zátěže [°]
M_s	Statický moment [Nm]
n	Otáčky rotoru [RPM]
RPM	ot/min (z anglického revolutions per minute)
m	Počet fází krokového motoru
N_r	Počet zubů rotoru
M_z	Zátěžný moment [Nm]
f	Kmitočet kroku [Hz] (počet kroků za sekundu)
M_0	Nejmenší zatěžovací moment [Nm]
M_{max}	Maximální provozní moment [Nm]
J_z	Zatěžovací moment setrvačnosti [$kg \times m^2$]
PLC	Programovatelný logický automat (z anglického Programmable Logic Controller)
VDC	Stejnoseměrné napětí
VGA	z anglického Video Graphics Array
PVI	z anglického Process Visualization Interface
VNC	z anglického Virtual Network Computing
DDE	z anglického Dynamic Data Exchange
Web	zkratka z WWW - světová rozsáhlá síť (z anglického World Wide Web)



Seznam obrázků

Obrázek 1: Řez KM s pasivním rotorem [3]	15
Obrázek 2: Magnetický obvod dvoufázového KM s radiálně polarizovaným magnetem [1].....	16
Obrázek 3: Konstrukční uspořádání KM s axiálně polarizovaným magnetem [3]	17
Obrázek 4: Buzená je fáze A [1]	18
Obrázek 5: Buzená je fáze B [1].....	18
Obrázek 6: Buzená je fáze C [1].....	18
Obrázek 7: Buzená je fáze D [1]	18
Obrázek 8: Časové spínání fází při řízení čtyřtakovního KM s magnetizací jedné fáze [3]	19
Obrázek 9: Poloha rotoru při dvoufázovém řízení [4].....	19
Obrázek 10: Dva kroky z čtyřtakovního řízení KM na dvou fázích [3].....	20
Obrázek 11: Časový průběh spínání fází při čtyřtakovním řízení na dvou fázích KM [3]	20
Obrázek 12: Časový průběh spínání fází při osmitakovním řízení KM [3]	21
Obrázek 13: Časový průběh proudu KM při mikrokrokování [3].....	21
Obrázek 14: Statická charakteristika KM [1].....	22
Obrázek 15: Momentová charakteristika KM [1].....	23
Obrázek 16: Momentová charakteristika v logaritmickém měřítku [5]	23
Obrázek 17: Momentová charakteristika v závislosti na typu buzení [1]	24
Obrázek 18: Typy buzení krokových motorů [1]	25
Obrázek 19: Pokles momentové charakteristiky způsobené rezonancí a nestabilitou [6].....	27
Obrázek 20: Krokový motor 80MPH1.300S014-01 [7].....	28
Obrázek 21: Momentová charakteristika udávaná výrobcem KM 80MPH1.300S014-01 [8]	29
Obrázek 22: Doga Do 16841113B04/3059 [9]	29
Obrázek 23: PLC B&R s moduly.....	30
Obrázek 24: PowerPanel	31
Obrázek 25: Celé zařízení	31
Obrázek 26: Popis zařízení.....	32
Obrázek 27: Vývojový diagram kostry programu	36
Obrázek 28: Vývojový diagram měření statické charakteristiky automaticky.....	38
Obrázek 29: Vývojový diagram měření statické charakteristiky manuálně.....	39
Obrázek 30: Vývojový diagram měření start/stop charakteristiky automaticky	41
Obrázek 31: Vývojový diagram měření start/stop charakteristiky manuálně	42
Obrázek 32: Vývojový diagram měření charakteristiky řízeného zrychlování automaticky	44
Obrázek 33: Vývojový diagram měření charakteristiky řízeného zrychlování manuálně	45



Obrázek 34: Úvodní obrazovka vizualizace.....	46
Obrázek 35: Vizualizace - výběr charakteristiky	47
Obrázek 36: Vizualizace - měření statické charakteristiky	47
Obrázek 37: Vizualizace - měření momentové charakteristiky.....	48
Obrázek 38: Souřadný systém v pixelech [15].....	50
Obrázek 39: Kartézský souřadný systém [15].....	50
Obrázek 40: Násobení matic 2×2 [14]	52
Obrázek 41: Vývojový diagram vykreslení grafu	53
Obrázek 42: Ukázka PVI DDE server [15]	54
Obrázek 43: Ukázka PVI WEB serveru [15]	55
Obrázek 44: Nastavení VNC serveru	56
Obrázek 45: VNC Viewer	56
Obrázek 46: Deset měření statické charakteristiky	58
Obrázek 47: Průměr deseti naměřených hodnot statické charakteristiky	58
Obrázek 48: Ukázka měření statické charakteristiky na PowerPanelu	59
Obrázek 49: Deset měření momentové charakteristiky Start/Stop.....	60
Obrázek 50: Průměr deseti naměřených hodnot momentové charakteristiky Start/Stop	60
Obrázek 51: Ukázka měření momentové charakteristiky Start/Stop na PowerPanelu.....	61
Obrázek 52: Deset měření momentové charakteristiky řízeného zrychlování	62
Obrázek 53: Průměr deseti naměřených hodnot momentové charakteristiky řízeného zrychlování.....	62
Obrázek 54: Ukázka měření momentové charakteristiky řízeného zrychlování na PowerPanelu	63



Úvod

Elektrické motory jsou v dnešní době nejvíce rozšířené pohony v průmyslu a to díky svému univerzálnímu využití. Mohou se použít od potravinářského až po chemický průmysl. Na elektrické pohony je vyvíjen velký tlak na co nejrychlejší nasazení do výrobního procesu. To má za následek, že odladění všech problémů se provádí na konečném zařízení za provozu. Proto je nutné, aby vývojoví programátoři těchto zařízení, byli již na školách seznámeni s vlastnostmi elektrických strojů. Za podpory evropských sociálních fondů z operačního programu na podporu vzdělání a konkurenceschopnosti byl na Technické univerzitě v Liberci odstartován projekt na měření fyzikálních úloh pomocí vzdáleného přístupu. Díky tomu mají studenti možnost seznámit se s problematikou laboratorních úloh propojením přes internet. Student tedy není vázán na rozvrh laboratoří a má tak možnost se důkladně seznámit s problematikou dané úlohy.

Diplomová práce se zabývá návrhem vzdálené úlohy pro měření charakteristik krokového motoru. Jedná se o první studii, kde její první návrh byl již vytvořen v rámci studentské práce a tato diplomová práce na ni navazuje. Hlavním cílem je vytvoření softwaru, který je vyvíjen v programu Automation studio od firmy B&R. Měření charakteristik probíhá na krokovém motoru 80MPH1.300S14-01. Celé měření je možné ovládat pomocí vizualizace přes PowerPanel od firmy B&R nebo přes internet. Uživatel si může zvolit, zda chce charakteristiky měřit manuálně nebo zda měření nechá na samotném zařízení. Celé měření je založeno na zvyšování zátěžného momentu pomocí stejnosměrného motoru Doga DO1684113B04/3059, až do varování o ztrátě kroku. Varování o ztrátě kroku umožňují moduly X20SM1436 a knihovna ACP10_MC. Chyba nastane pokud hodnoty proudu překročí mezní hodnoty. Při varování o ztrátě kroku na motoru nenastává chyba, ale pouze upozorňuje na mezní hodnoty. Po změření všech charakteristik je nutné zobrazit naměřená data. Z toho důvodu je vizualizace rozšířena o vykreslování grafu získaných hodnot.

Poslední část práce je věnována vyhodnocení celého měření zvoleného krokového motoru. Všechny charakteristiky jsou několikrát změřeny a následuje ověření správnosti výsledků pomocí průměru z naměřených hodnot. V závěru se práce zabývá rozvahou o funkčnosti celého měřicího programu a zařízení. Jeho případného rozšíření či vylepšení a následného využití v průmyslu.



1 Krokové motory

Krokové motory (KM) v oblasti elektrických motorů zauímají svoji vlastní třídu a to z toho důvodu, že se od ostatních motorů liší svojí specifickou konstrukcí a především jejím odlišným řízením. Tato diplomová práce se zabývá měřením charakteristik KM, které úzce souvisí s konstrukcí a způsobem řízení krokových motorů, proto jsou následující kapitoly (1.1, 1.2 a 1.3) věnované porozumění krokového motoru. Pro začátek je dobré říci jednu z mnoha definic krokového motoru, která zní: „Krokový motor je synchronní, impulzně buzený elektrický stroj, jehož pohyb není spojitý, nýbrž se děje po jednotlivých krocích.“ [1] Než bude možné začít podrobně rozebírat krokové motory, je důležité nadefinovat některé základní pojmy, které s tímto typem motoru úzce souvisí:

„**Krok** je mechanická odezva rotoru krokového motoru na jeden řídicí impuls, při němž rotor vykoná pohyb z výchozí magnetické klidové polohy do nejbližší magnetické klidové polohy.

Velikost kroku α je úhel, daný konstrukcí a způsobem ovládání motoru, který odpovídá změně polohy rotoru po zpracování jednoho řídicího impulsu. Rovnice 1 ukazuje možnost výpočtu velikosti kroku z konstrukčních parametrů, které se dají dohledat ve specifikacích od výrobce.

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_r} [^\circ] \quad (1)$$

m je počet fází krokového motoru

N_r je počet zubů rotoru

Statický úhel zátěže β je úhel, o který se vychýlí rotor nabuzeného krokového motoru z magnetické klidové polohy při dané zátěži na hřídeli krokového motoru.

Magnetické klidová poloha je poloha, kterou zaujme rotor nabuzeného krokového motoru, jestliže je statický úhel zátěže roven nule.

Statický moment M_s je moment, který je v rovnováze s kroutícím momentem působícím na hřídel stojícího nabuzeného krokového motoru a vychylujícím rotorem z magnetické klidové polohy o statický úhel zátěže. Maximální statický moment je při vychýlení rotoru právě roven velikosti kroku α .



Otáčky rotoru n jsou určeny kmitočtem kroků f tj. počtem kroků za sekundu, které vykoná rotor krokového motoru. Kmitočet kroků f je stejný jako řídicí kmitočet řídicího signálu f_s v případě, kdy se rotor otáčí bez ztráty kroku“ [1]. Otáčky určíme pomocí následujícího vztahu:

$$n = \frac{60 \cdot f \cdot \alpha}{360} \quad (2)$$

Po definici některých předchozích pojmů a před rozebráním konstrukce KM je ta pravá chvíle říci, jaké jsou výhody a nevýhody krokových motorů ve vztahu k ostatním elektrickým rotačním strojům.

Výhody krokového motoru

- Kompaktní „digitální“ motor bez zpětné vazby
- Velmi jednoduše říditelný
- Bezkartáčový
- Žádná údržba
- Poloha zůstává i při nulové rychlosti
- Žádná úhlová chyba
- Velmi vysoký točivý moment
- Moment i při nulových otáčkách
- Nelze ho mechanicky přetížit
- Otáčí se oběma směry
- Kompatibilní od různých výrobců [2]

Nevýhody krokových motorů

- Extrémně citlivý na přetížení
- Žádná zpětná informace o skutečné poloze (pokud není použit enkodér)
- Při přetížení ztratí pozici „bez opravení“
- Limitovaná dynamika
- Ztráta M_s při rostoucích otáčkách
- Vyšší hlučnost a vibrace [2]



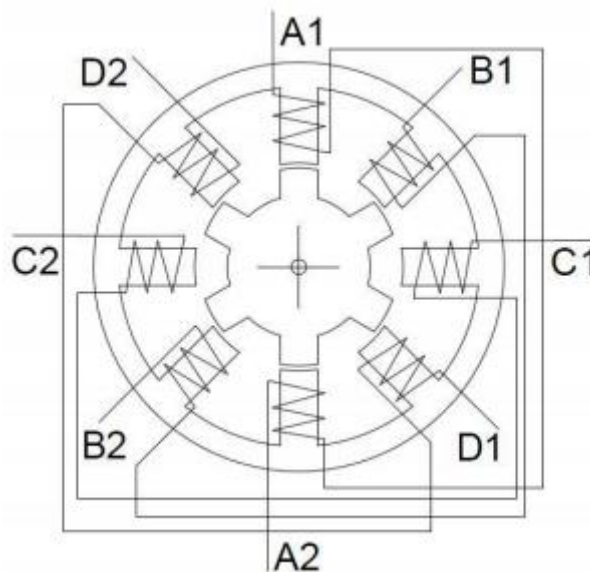
1.1 Princip krokového motoru

Následující podkapitoly (1.1.1 a 1.1.2) se zabývají konstrukčním uspořádáním KM, které můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- a) Krokový motor s pasivním rotorem
- b) Krokový motor s aktivním rotorem

1.1.1 Krokový motor s pasivním rotorem

Rotor tohoto typu motoru je tvořen feromagnetickými svazky plechu, které jsou nalisovány na hřídel tvořenou šesti nástavci. Naopak stator tvoří osm plechových nástavců, na kterých je navinutá ocelová fáze. „Vinutí jednoho nástavce je vždy spojeno do série s vinutím na protějším nástavci, při napájení tvoří severní a jižní pól. Motor má tedy 4 fáze A, B, C, D. Mezi statorovými a rotorovými nástavci je velice malá vzduchová mezera v rozmezí 0,02 až 0,2 mm.“ [3] Schéma krokového motoru s pasivním rotorem je znázorněno na Obrázku 1.



Obrázek 1: Řez KM s pasivním rotorem [3]

1.1.2 Krokový motor s aktivním rotorem

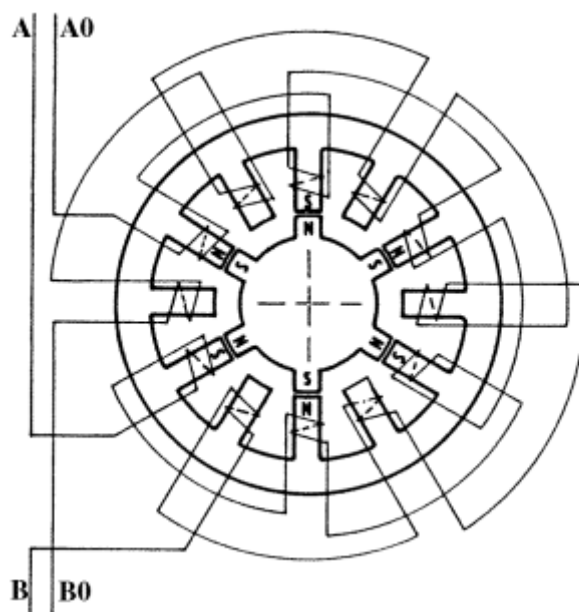
U tohoto typu KM je rotor tvořen permanentním magnetem. Podle uspořádání pólu v magnetu se dají KM s aktivním rotorem rozdělit do dvou skupin:

- a) Krokový motor s radiálně polarizovaným permanentním magnetem
- b) Krokový motor s axiálně polarizovaným permanentním magnetem



a) Krokový motor s radiálně polarizovaným permanentním magnetem

„U tohoto KM je rotorová část magnetického obvodu tvořena permanentním magnetem. Na obvodu rotoru se střídají severní a jižní póly a jejich počet je poloviční než počet pólů statoru. Statorové vinutí je navinuto dvoufázově a při spínání fází je nutno měnit směr proudu ve vinutích. Znárodnění magnetického obvodu je uvedeno na Obrázku 2. Tyto KM mají složitější magnetický obvod a jsou tudíž dražší a jejich provozní moment jsou pouze jednotky Nm. Časová konstanta vinutí je u těchto KM malá, protože v magnetickém obvodu je zařazen permanentní magnet. Z toho vyplývá, že je možno dosáhnout vyšších provozních kmitočtů než u motorů s pasivním rotorem (jednotky až desítky kHz).“ [1]



Obrázek 2: Magnetický obvod dvoufázového KM s radiálně polarizovaným magnetem [1]

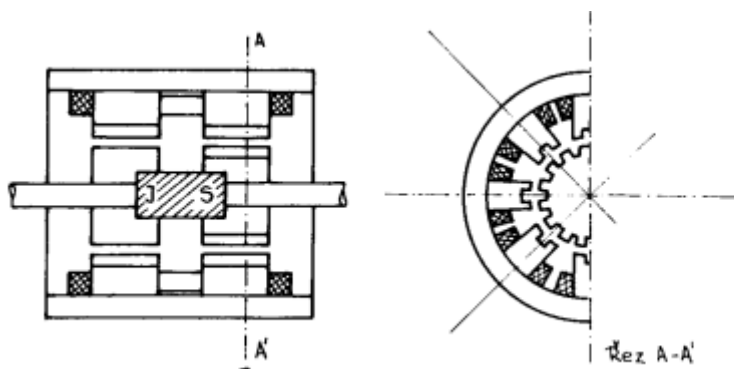
b) Krokový motor s axiálně polarizovaným permanentním magnetem

Rotor krokového motoru s axiálně polarizovaným permanentním magnetem, někdy také nazýván hybridní krokový motor. Tento KM je tvořen hřídelí z nemagnetického materiálu, na které jsou nalisovány dva plechové pólové nástavce. Mezi pólovými nástavci je vložen permanentní magnet, který je uložen tak, aby každý pólový nástavec měl jinou magnetickou polaritu. Rotorové pólové nástavce mají po obvodu zuby (viz Obrázek 3), jejichž počet určuje velikost kroku celého motoru. „Rotorové pólové nástavce jsou proti sobě natočeny o polovinu rotorové zubové rozteče. Na statoru je osm pólů, na kterých je navinuto dvoufázové čtyřpólové vinutí. Pro zmenšení kroku je počet zubů na rotoru větší nežli na statoru. Fáze vinutí jsou v rytmu s řídicím signálem, díky tomu vzniká točivé magnetické pole. Rotor toto pole sleduje, takže se vždy zuby rotoru nastaví do magnetické klidové polohy.“ [1]



Buzení KM s axiálním polarizovaným magnetem musí být dvoufázové a výkonové prvky musí umožnit, aby bylo možné měnit směr magnetického toku v jednotlivých pólech statoru a zároveň musí umět změnit směr budícího proudu. To lze zajistit dvěma způsoby:

- KM obsahuje bifilární vinutí, díky tomu je možno použít pro buzení klasické spínací prvky
- KM obsahuje pouze dvoufázové vinutí, tudíž je nutno použít složitější buzení například pomocí můstkového zapojení



Obrázek 3: Konstrukční uspořádání KM s axiálně polarizovaným magnetem [3]

1.2 Řízení krokového motoru

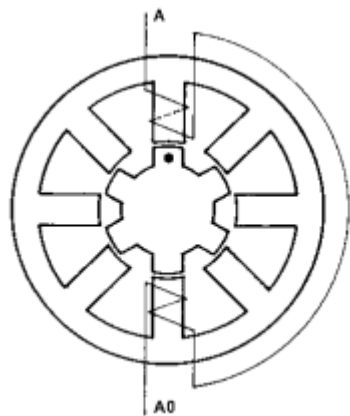
V následujících kapitolách (1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 a 1.2.4) jsou rozebrány principy řízení krokového motoru. Tyto typy řízení se dají rozdělit podle kombinací sepnutí fází tak, aby se rotor otočil o 360° a podle počtu fází, které v jednom taktu spínáme.

1.2.1 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

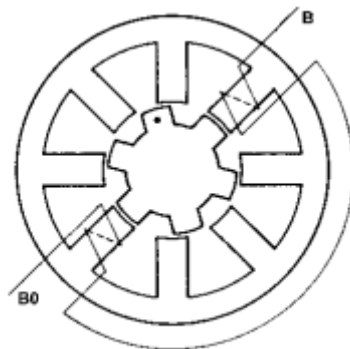
Na Obrázku 4 je znázorněna situace, která odpovídá první kombinaci, kde je sepnutí fází (1,0,0,0), což odpovídá stavu, kdy fází A teče proud a fázemi B, C, D proud neteče. Rotor se natočí tak, aby zaujal stav, kdy je minimální magnetický odpor. Říkáme, že rotor je v magnetické klidové poloze. V této poloze je moment působící na rotor nulový. „Jestliže na vstup komutátoru přivedeme řídicí impuls, dojde ke změně kombinace sepnutí fází (0,1,0,0) tzn., že je buzena pouze fáze B. Rotor se pootočí o $\frac{1}{4}$ zubové rozteče a zaujme novou magnetickou klidovou polohu, která opět odpovídá minimálnímu magnetickému odporu (viz Obrázek 5). Pro další kombinaci sepnutí fází (0,0,1,0) je buzena pouze fáze C a rotor se opět pootočí o $\frac{1}{4}$ zubové rozteče (tj. o jeden krok) do nové magnetické klidové polohy (viz Obrázek 6). Dalším řídicím impulsem dojde ke změně fází na (0,0,0,1) a pootočení



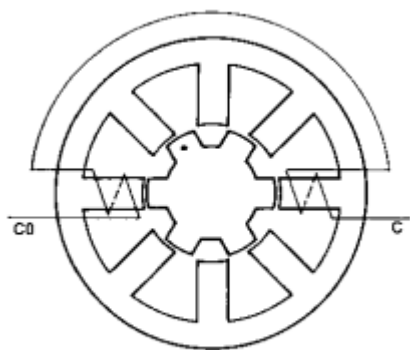
rotoru o jeden krok (viz Obrázek 7). Následujícím řídicím impulsem se nastaví kombinace buzení fází (1,0,0,0)“ [1], která odpovídá výchozí situaci (rotor se otočil o 360°) a celý děj se cyklicky opakuje.



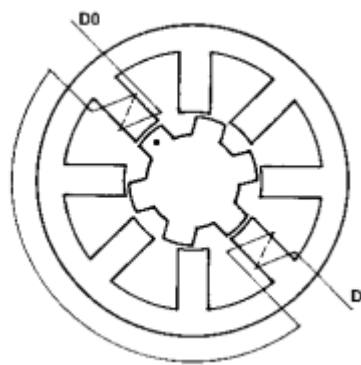
Obrázek 4: Buzená je fáze A [1]



Obrázek 5: Buzená je fáze B [1]



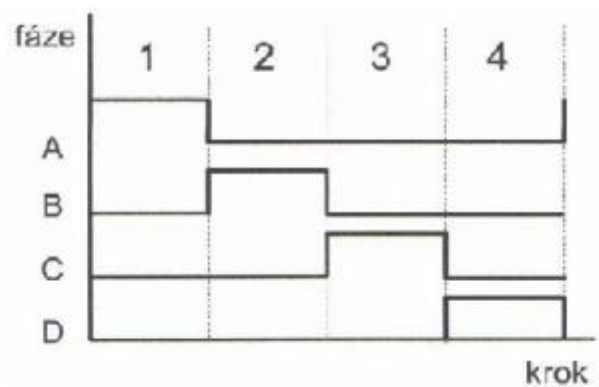
Obrázek 6: Buzená je fáze C [1]



Obrázek 7: Buzená je fáze D [1]

Celý cyklus otočení rotoru je ještě jednou graficky znázorněn na Obrázku 8. Na svislé straně jsou znázorněny fáze a jejich jednotlivé spínání. Vertikální strana označuje počty kroků.

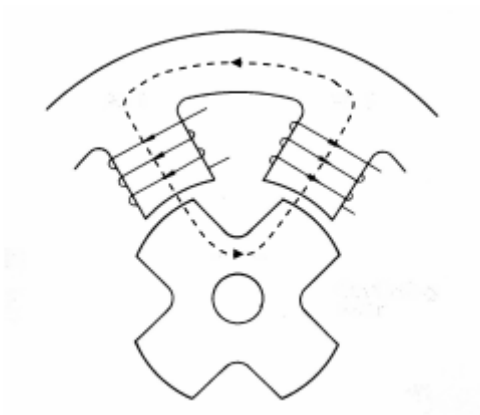




Obrázek 8: Časové spínání fází při řízení čtyřtaktního KM s magnetizací jedné fáze [3]

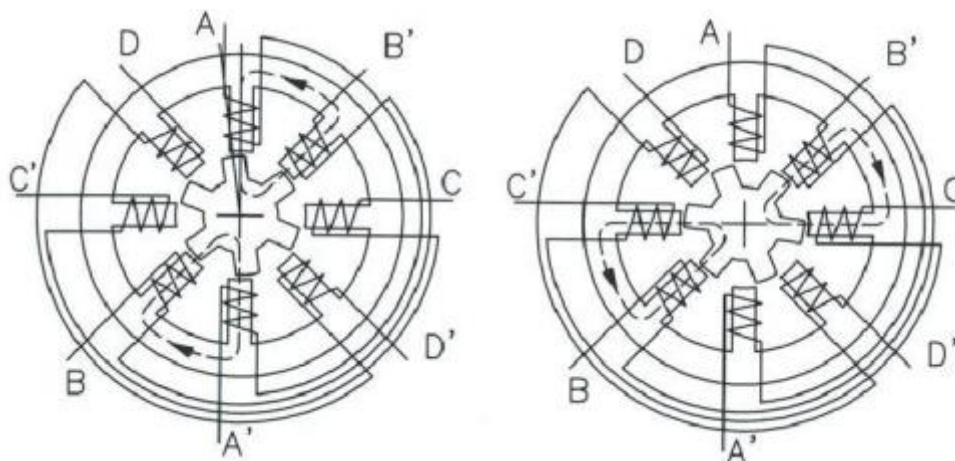
1.2.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

Tento typ řízení spíná dvě sousední fáze na statoru. Možné kombinace sepnutí fází jsou 4 a to: (1,1,0,0), (0,1,1,0), (0,0,1,1) a (1,0,0,1). Na Obrázku 9 je vidět, jak protéká proud přes rotor. Princip chodu motoru je stejný jako u řízení jedné fáze (viz Obrázek 10). Důvod, proč se tento typ řízení používá je ten, že statický moment M_s je $1,9\times$ větší než u řízení jedné fáze. Oběma způsobům se říká čtyřtaktní, protože se v nich cyklicky střídají 4 různé kombinace sepnutí fází.



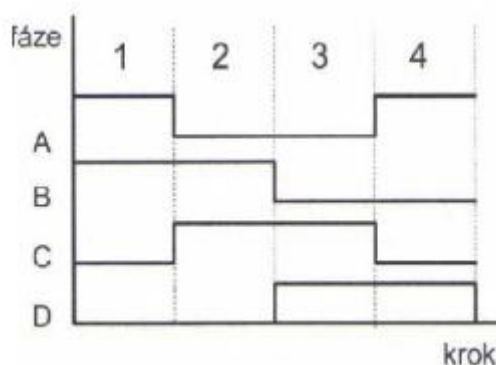
Obrázek 9: Poloha rotoru při dvoufázovém řízení [4]





Obrázek 10: Dva kroky z čtyřtaktního řízení KM na dvou fázích [3]

Obrázku 11 znázorňuje grafický průběh spínání proudů v jednotlivých fázích v závislosti na počtu kroků.

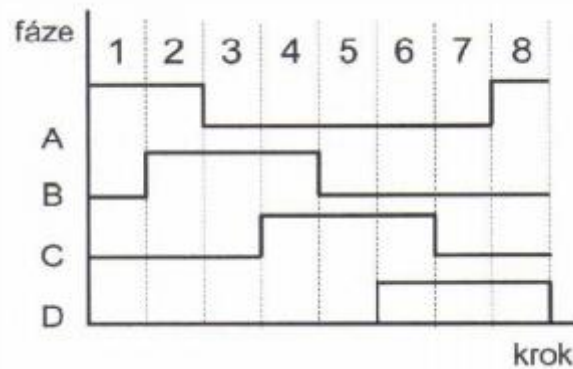


Obrázek 11: Časový průběh spínání fází při čtyřtaktním řízení na dvou fázích KM [3]

1.2.3 Osmitaktní řízení

„Osmitaktní řízení je v podstatě pouze sloučení dvou předchozích čtyřtaktních řízení. Sekvence buzení vypadá následovně A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A...Výhodou tohoto způsobu je, že získáme poloviční velikost jednoho kroku, aniž bychom museli měnit budicí obvody. Nevýhodou je různá velikost maximálního momentu při napájení jedné fáze a při napájení dvou fázemi. Tento jev lze odstranit tak, že bychom v případě buzení jedné fáze pouštěli do vinutí větší proud, než při buzení dvou fázemi. Tím ovšem vzroste složitost budicích obvodů“. [1] Časový průběh spínání jednotlivých fází na počtu kroků je znázorněn na Obrázku 12.

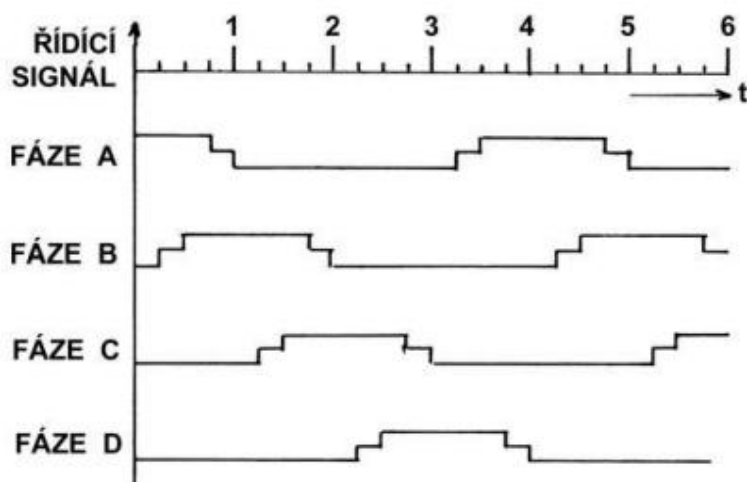




Obrázek 12: Časový průběh spínání fází při osmitaktním řízení KM [3]

1.2.4 Mikrokrokování

Speciálním typem řízení je tzv. mikrokrokování, neboť „velikost jednoho kroku u KM určuje počet zubů na rotoru a na statoru (viz Rovnice 1). Vyrobit motor s více než sto zuby je značně nákladné. Menšího kroku, než je dáno konstrukcí motoru, však lze docílit elektronicky a to právě mikrokrokováním. V praxi je možné krok rozdělit až na 128 mikrokroků.“ [3] Tato možnost regulovat krok se používá především tam, kde je nutné rozlišovat velmi přesné změny polohy a kde by překážely velké rázy při změně polohy rotoru. Mikrokrokování vychází z osmitaktního řízení, „ovšem proud jednotlivých vinutí není stejný, ale je rozdělen v určitém poměru a tento poměr se s každým mikrokrokem mění“ [3]. Obrázek 13 znázorňuje poměr spínání proudů v jednotlivých fázích v závislosti na velikosti kroku.



Obrázek 13: Časový průběh proudu KM při mikrokrokování [3]

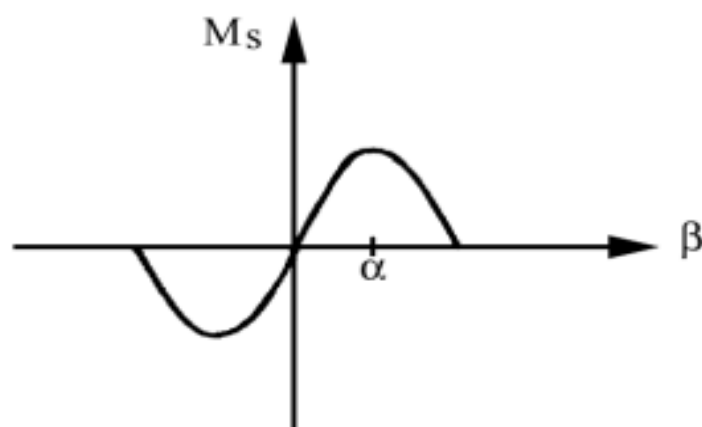


1.3 Charakteristiky krokového motoru

Jako každý elektrický pohon má své specifické charakteristiky, kterými se jednotlivé typy motoru vyznačují, tak i krokový motor není výjimkou. V této kapitole jsou popsány dvě charakteristiky krokového motoru a to statická a momentová charakteristika.

1.3.1 Statická charakteristika krokového motoru

První z charakteristik je statická. Je to závislost statického momentu (M_s) na statickém úhlu zátěže (β), „který je v rovnováze s kroutícím momentem působícím na hřídel stojícího nabuzeného krokového motoru a vychylujícím se rotorem z magnetické klidové polohy o statický úhel zátěže. Maximální statický moment je při vychýlení rotoru právě o velikost kroku α .“ [1] Na Obrázku 14 je znázorněn ideální průběh statické charakteristiky, který je sinusový.



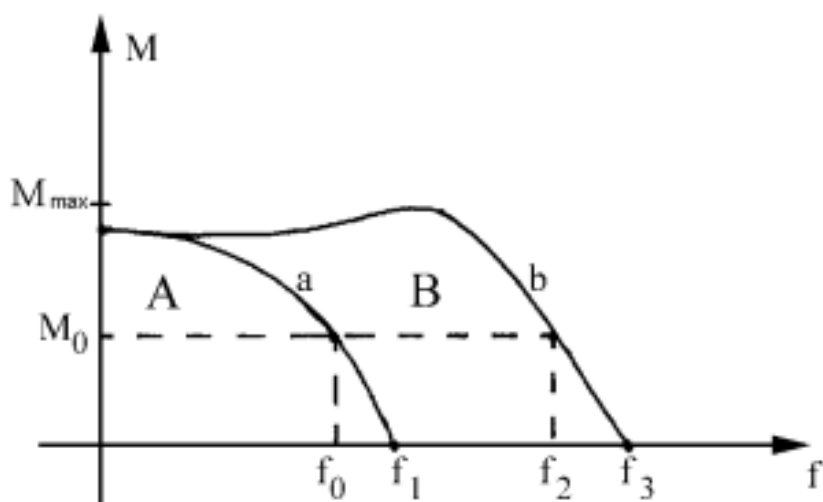
Obrázek 14: Statická charakteristika KM [1]

1.3.2 Momentová charakteristika krokového motoru

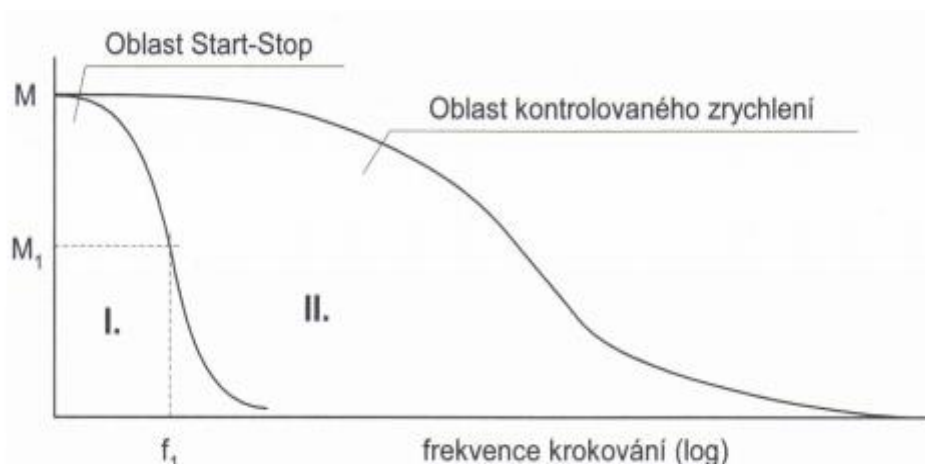
Další důležitou charakteristikou pro práci je momentová, která znázorňuje závislost zátěžného momentu M_z na kmitočtu kroku f nabuzeného krokového motoru, „který se otáčí a je zatěžován. Křivka b je tzv. **provozní charakteristika krokového motoru**. Křivka a je tzv. **rozběhová charakteristika motoru** pro moment setrvačnosti zátěže J_z . Pro momentové charakteristiky krokového motoru je typické rozdělení na dvě oblasti. Oblast A označovaná start/stop nebo rozběhová, zahrnuje stavy, do kterých se může krokový motor dostat z klidu bez ztráty jediného kroku. Například při zatěžovacím momentu M_0 můžeme skokem přivést řídicí kmitočet f_0 . Řídicí kmitočet f_1 můžeme přivést pouze tehdy,



jestliže krokový motor pracuje naprázdno. Oblast B je oblast řízeného zrychlování krokového motoru, někdy označovaná jako oblast omezené říditelnosti. V této oblasti je nutno plynule (nikoli skokově) zvyšovat řídicí kmitočet, aby nedocházelo ke ztrátě kroku. Pouze tímto složitějším způsobem řízení lze krokový motor optimálně využívat. Například při zatěžovacím momentu M_0 lze při plynulém zvyšování řídicího kmitočtu z hodnoty f_0 dosáhnout až hodnoty f_2 . Kmitočet f_3 je nejvyšší provozní řídicí kmitočet, při kterém je krokový motor schopen se otáčet v jednom směru bez zátěže. Motor se na tento kmitočet může rozběhnout nebo z něj zastavit bez ztráty kroku. Maximální zátěžný moment M_{max} je nejvyšší provozní moment, kterým může být krokový motor zatížen“. [1]



Obrázek 15: Momentová charakteristika KM [1]

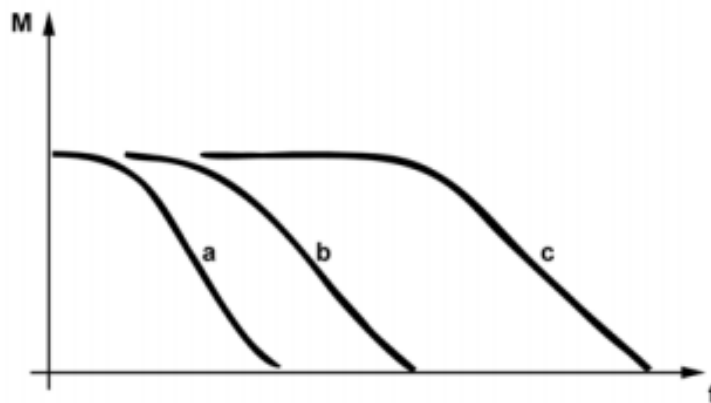


Obrázek 16: Momentová charakteristika v logaritmicke měřítku [5]



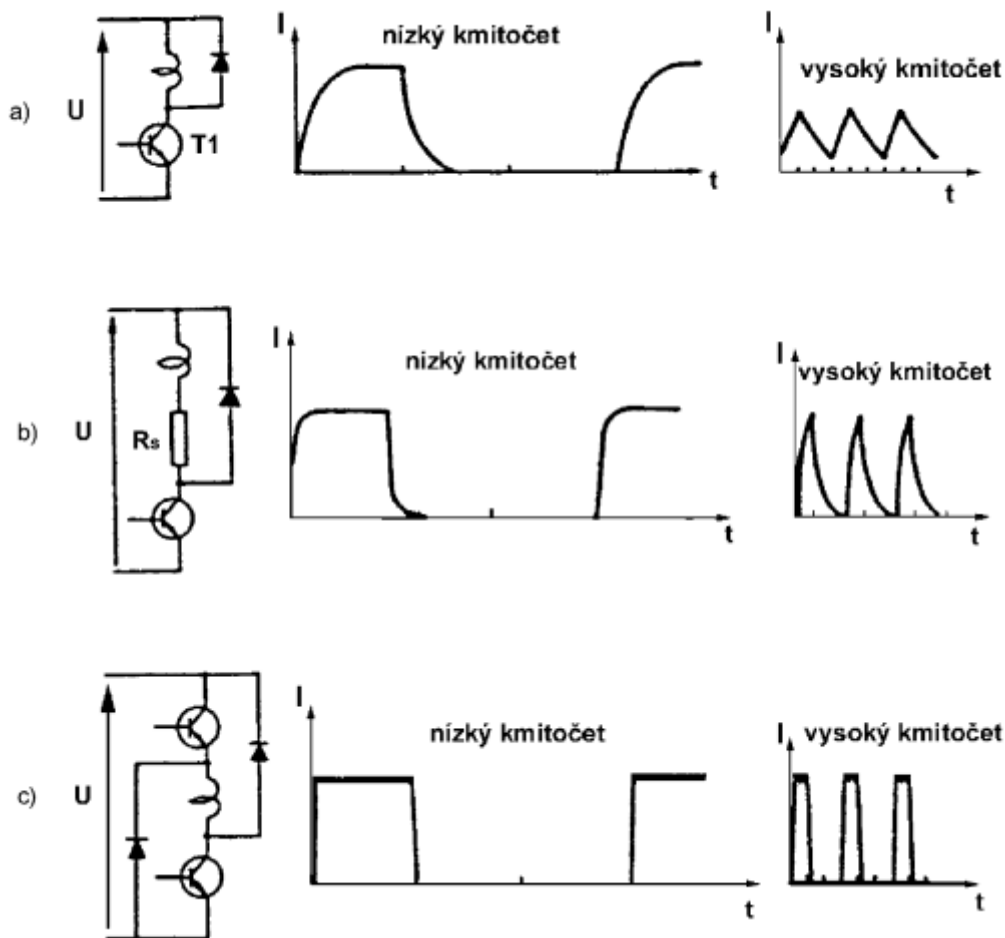
Vliv buzení krokového motoru

Na celkovou podobu momentové charakteristiky má velký vliv i buzení krokového motoru. „Základní funkcí budících obvodů je konverze vstupních napěťových impulsů odpovídajících jednotlivým krokům na vhodný průběh proudu v jednotlivých fázích vinutí KM. Vinutí KM představuje indukčnost L s činným odporem R zapojeným do série. Při zapnutí a vypnutí proudu do fáze KM proběhne přechodový děj, jehož doba je určena časovou konstantou $\tau = L/R$. Při nízkých kmitočtech krokování je doba přechodového děje zanedbatelná vzhledem k době ustáleného stavu ve vinutí, kdy vinutím teče jmenovitý (stejnoseměrný) proud. S rostoucím kmitočtem se doba přechodového děje stále více projevuje na výsledné momentové charakteristice. Od určitého kmitočtu je tvar proudového impulsu při sepnutí fáze určen pouze přechodovým dějem a střední hodnota proudu ve vinutí s kmitočtem klesá. Důsledkem je pokles momentu krokového motoru.“ [1]



Obrázek 17: Momentová charakteristika v závislosti na typu buzení [1]





Obrázek 18: Typy buzení krokových motorů [1]

Pokud chceme dosáhnout požadovaného momentu, je nutné správně použít budicí obvod. Základní funkcí budicího obvodu je změnit vstupní řídicí impulsy kroků do vhodného tvaru proudu v jednotlivých fázových vynutí. V praxi se nejčastěji používají tři základní typy:

a) Buzení z napěťového zdroje

Toto buzení je nejjednodušším způsobem (Obrázek 18a), ale naopak časová konstanta negativně ovlivňuje chování krokového motoru ve středních a vysokých krokovacích frekvencích. Velká časová konstanta je porovnatelná s periodou kroku. Tvar momentové charakteristiky při tomto buzení je zobrazen na Obrázku 17 křivka a.



b) Buzení z napětového zdroje s vyšším napětím

U tohoto typu buzení (Obrázek 18 b) je třeba přiřadit do série s indukčností jistý odpor R_s a to z toho důvodu, aby byl zajištěn jmenovitý proud fází. Díky tomu je zajištěno snížení časové konstanty přechodového děje, který se pak rovná Rovnici 3, což má za následek zvýšení pásma provozního kmitočtu. Toto buzení je však velmi energeticky náročné, což znamená, že krokový motor má malou účinnost. Momentová charakteristika při tomto typu měření je zobrazena na Obrázku 17 křivka b.

$$\tau = \frac{L}{R+R_s} \quad (3) [1]$$

c) Buzení z pulzního proudového zdroje

Poslední používaný typ buzení (Obrázek 18 c) předpokládá, že místo konstantního napětí je použit konstantní zdroj proudu. Nemusí se zde použít sériový odpor, čímž je zajištěno, že nedojde k poklesu účinnosti krokového motoru. Další velkou výhodou je výrazné snížení časové konstanty τ . Celý budicí prvek je realizován pomocí dvou hladinových spínacích prvků. Použití tohoto budicího prvku je požadováno při vysokém kmitočtu krokování. Průběh momentové charakteristiky je znázorněn na Obrázku 17 křivka c.

Vliv rezonance a nestability

Kromě buzení mají svůj velký vliv na výsledek tvaru momentové charakteristiky také dva základní nežádoucí vlivy. **Vlastní rezonance a nestabilita**, která je způsobena kladnou zpětnou vazbou mezi motorem a budičem. Velikost a polohy poklesu závisí na vlastnostech krokového motoru, budiče, pracovním módu a zátěži.

1) Vlastní rezonance

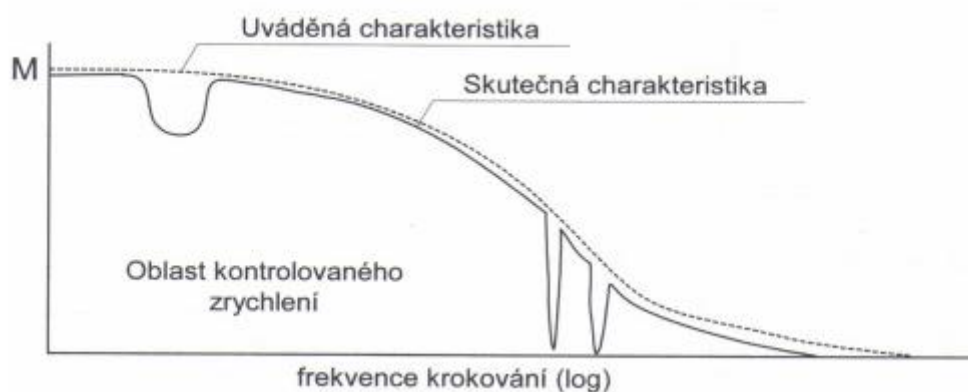
Jedná se o rezonanci, která se projevuje především v nízkých oblastech kmitočtu kroku. Pokud se krokovací kmitočet shoduje s vlastní frekvencí oscilace rotoru, tak oscilace mohou narůst do takové míry, že krokový motor může vypadnout ze synchronismu (ztratí krok). Pokud se vyskytuje rezonance u krokového motoru bez polohové zpětné vazby, pak ztráta synchronismu vede k závažným a někdy i neodstranitelným chybám.



2) Nestabilita

V základním principu nestability se jedná o to, že v určitých oblastech kmitočtu kroku se může dostat do nestability celý systém. Celkovou základní příčinou je kladná zpětná vazba mezi motorem a budičem. Tento neblahý jev nastává především při vyšších kmitočtech momentové charakteristiky. Pokud však není motor provozován v oblastech poklesu, lze motor provozovat v normálním režimu, aniž by nestabilita měla negativní účinky na chod celého zařízení.

Celkový pokles vlivem nestability a vlastní rezonance je možné vidět na Obrázku 19.



Obrázek 19: Pokles momentové charakteristiky způsobené rezonancí a nestabilitou [6]



2 Měření charakteristik krokového motoru

V předešlých kapitolách je popsána teorie krokových motorů, která jsou nepostradatelná pro pochopení následujících kapitol (2.1 a 2.2), ty jsou již přímo věnovány měření charakteristik krokových motorů. K tomuto účelu jsou z předešlých projektů školy použity následující motory. Krokový motor 80MPH1.3005014-01, který je konstruován jako hybridní se sériovým elektrickým vedením. Tento model KM má v sobě zabudován inkrementální snímač. Jako protimoment krokovému motoru je použit stejnosměrný motor Doga DO 16841113B04/3059. Měření probíhalo dle zvolené charakteristiky. Hlavním principem je zvyšování proudu do stejnosměrného motoru, ten zvyšuje zátěžný moment na krokovém motoru, dokud krokový motor neoznámí varování o ztrátě kroku. Tabulka 1 znázorňuje specifikace zvoleného krokového motoru a na Obrázku 20 je možné vidět momentovou charakteristiku. Diplomové práci náleží žlutě zbarvená charakteristika, protože KM je napájen 24 VDC (viz Obrázek 21).

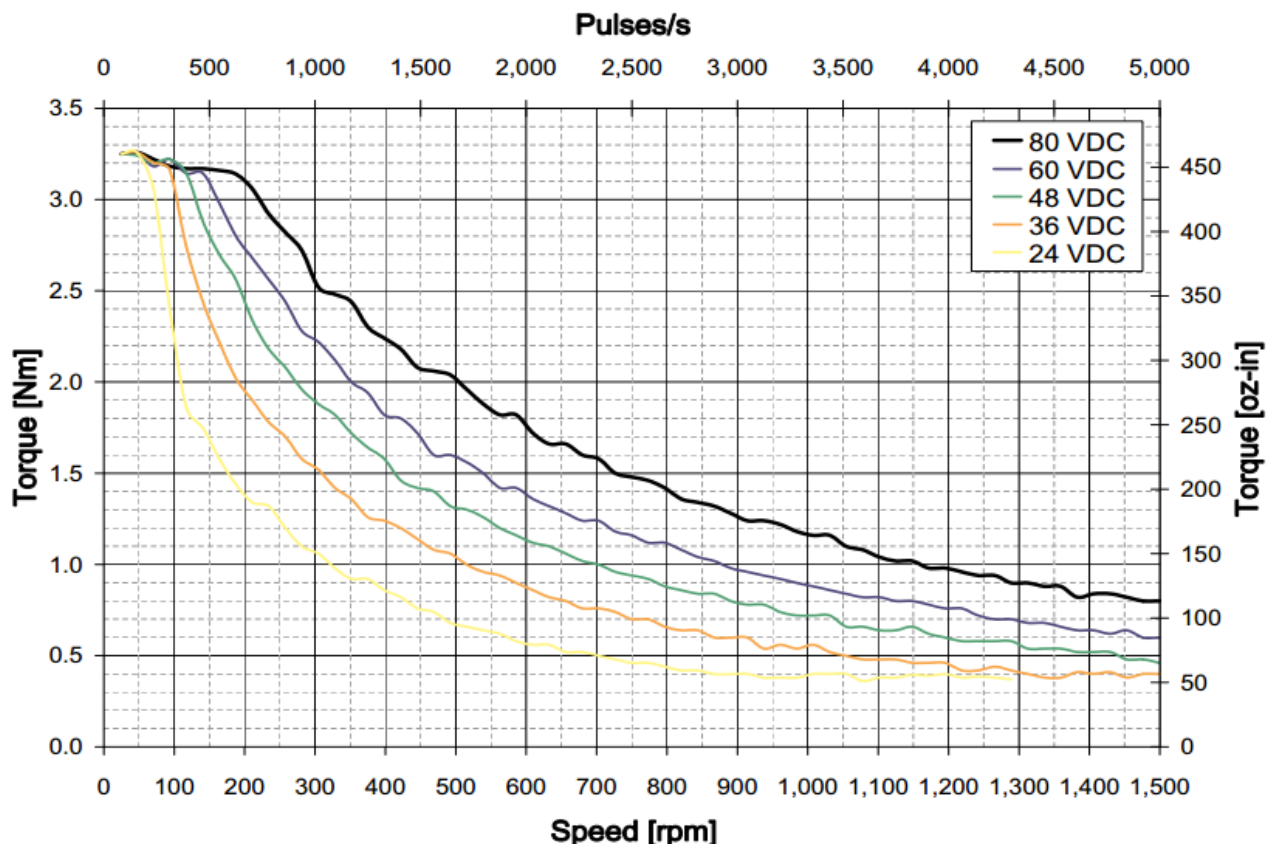
Tabulka 1: Specifikace KM 80MPH1.300S014-01 [7]

Jmenovitý proud	3 A
Zadržovací moment	2,9 Nm
Velikost kroku	1,8 °
Rozlišení IRC	1024 pulsů/otáčku
Napájení napětí	18 ÷ 24 VDC
Max. radiální zatížení	290 N
Max. axiální zatížení	225 N
Odpor	1,7 Ω
Indukčnost	12,9 mH



Obrázek 20: Krokový motor 80MPH1.300S014-01 [7]





Obrázek 21: Momentová charakteristika udávaná výrobcem KM 80MPH1.300S014-01 [8]

Tabulka 2: Specifikace stejnosměrného motoru Doga DO 16841113B04/3059 [9]

Nominální napětí	24 VDC
Nominální proud	5,5 A
Nominální moment	0,75 Nm
Nominální otáčky	1000 rpm

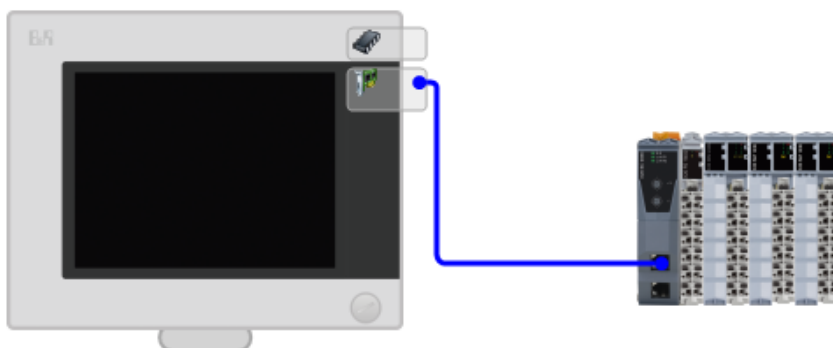


Obrázek 22: Doga Do 16841113B04/3059 [9]



Již v této chvíli lze zjistit, že stejnoměrný motor Doga je pro tuto úlohu poddimenzován a to z toho důvodu, neboť jmenovitý moment stejnosměrného motoru (Tabulka 2) je násobně mnohem menší než jmenovitý moment KM (Tabulka 1). Pokud jsou oba motory provozovány při jmenovitých hodnotách, tak by stejnosměrný motor nikdy krokový motor nepřetlačil a ten by neztrácel krok při zvyšujícím se zatěžování, což je základní předpoklad pro měření v této práci. Aby bylo možné provádět měření alespoň v omezené míře, byl KM proudově omezen. Jmenovitý proud je omezen na 18 % a přídržný proud na 5 % jmenovitých hodnot. Z toho vyplývá, že celkové měření je omezeno.

Pro celkové měření a řízení motorů je zvolena PLC sestava od firmy B&R (Obrázek 23). Sestava se skládá z PowerPanelu 5PP520.1043 – 00 (Obrázek 24), který slouží jako uživatelské rozhraní, dále pomocí Ethernet Powerlinku je s PowerPanelem připojen modul regulátoru sběrnice X20BC0083. Pro napájení je k celé sestavě PLC zařazen modul X20PX9400. V neposlední řadě jsou připojeny moduly pro řízení motoru. Modul X20MM2436 pro ovládání stejnosměrného motoru a dva moduly X20SM1436, které mají za úkol řídit dva krokové motory. Do celého zařízení je zakomponován usměrňovač (AC/DC měnič) B&R PS1100, který ze síťového napětí vytvoří 24 V stejnosměrné napětí pro napájení PLC a motorů. Obrázek 26 znázorňuje zapojení celého zařízení i s popisy jednotlivých částí.



Obrázek 23: PLC B&R s moduly



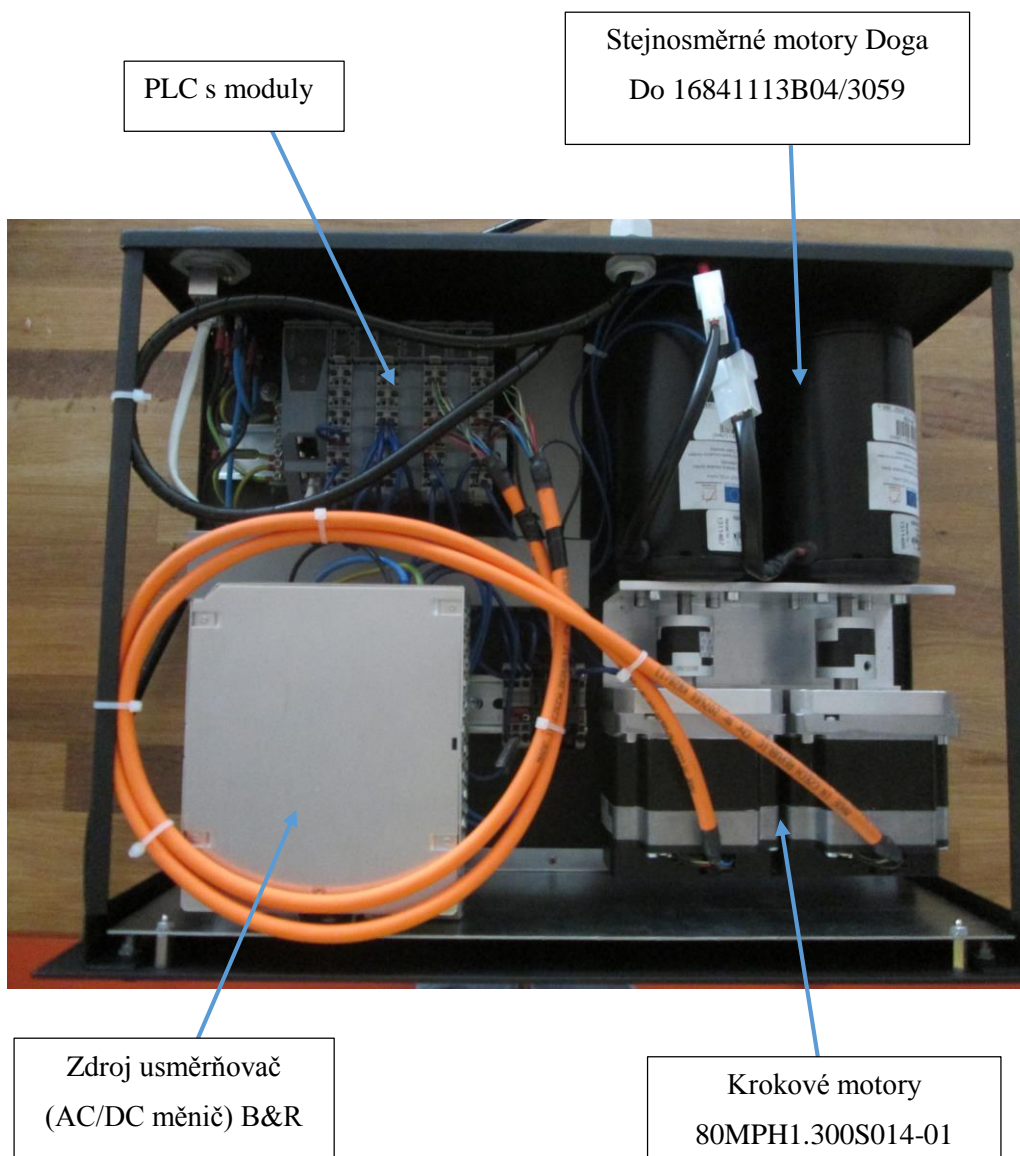


Obrázek 24: PowerPanel



Obrázek 25: Celé zařízení





Obrázek 26: Popis zařízení

Celý program pro měření je psán v programu od firmy B&R v Automation studio ve strukturovaném textu. Automation studio se vyznačuje příjemným uživatelským rozhraním a velkou databází knihoven, které mohou programátorovi ulehčit práci při vývoji softwaru. Přidáním jakékoli knihovny je možné rozšířit využití Automation studia. Pro řízení krokového motoru je použita knihovna ACP10_MC, která v sobě obsahuje funkční bloky z Motion componetns basic. Díky nim je velice snadné nastavovat jednotlivé parametry krokového motoru. Protože se v celé práci většinou využívá rychlostního řízení KM, je nejčastěji využíván příkaz MoveVelocity, právě již zmíněné knihovny. Dalším ze specifik programování v Automation studiu je, že využívá své vlastní vnitřní proměnné tzv.



unity. Nastavení rychlostního snímání je zvoleno 1024 unitu¹/otáčku. Tato hodnota je nastavena s ohledem na implementovaný inkrementální čítač v krokovém motoru, který má rozlišení 1024 pulsů/otáčku. Lze zjistit, že hodnota 1024 odpovídá 1 Hz. Pomocí přímé úměry lze vypočítat vztah pro přepočítání mezi frekvencí kroku a unity (Rovnice 4).

$$\begin{array}{l} 1[\text{Hz}] \dots\dots\dots 1024[\text{unit}] \\ X[\text{Hz}] \dots\dots\dots X_{\text{unit}} \end{array}$$

$$\frac{X}{1} = \frac{X_{\text{unit}}}{1024} \tag{4}$$

$$x = \frac{X_{\text{unit}}}{1024} \tag{5}$$

Rovnice 5 převádí aktuální hodnotu v unitech (X_{unit}) na aktuální frekvenci [Hz].

Naopak pro ovládání stejnosměrného motoru je zapotřebí si vybrat mezi proudovým a napěťovým řízením. Protože při měření charakteristik KM je nutné znát zatěžovací moment, který působí na krokový motor, bylo zvoleno proudové řízení stejnosměrného motoru. A to z toho důvodu, že pokud je znám proud, kterým je buzen stejnosměrný motor, je možné využít Rovnice 6, která převádí proud do motoru na výstupní moment.

$$M = K \cdot I \tag{6}$$

M – Moment na hřídeli [Nm]

K – Transformační koeficient [NmA⁻¹]

I – Budicí proud [A]

Díky rozměrové analýze můžeme určit transformační koeficient, který je možné vyčíst z Tabulky 2. Zde jsou vidět hodnoty nominálního momentu a nominálního proudu. Pokud tyto dvě čísla podělíme, vyjde koeficient K (Rovnice 7).

$$K = \frac{M_{\text{nominální}}}{I_{\text{nominální}}} = \frac{0,75}{5,5} \approx 0,136363 \text{ NmA}^{-1} \approx 136,36 \text{ mNmA}^{-1} \tag{7}$$

¹ Virtuální proměnné v programu Automation studio



Pokud dosadíme výsledek Rovnice 7 do Rovnice 6, vyjde výsledek (Rovnice 8).

$$M[mNm] = 136,36 \cdot I \quad (8)$$

Pokud by bylo nutné vědět pouze aktuální hodnotu momentu z proudu, je přepočít v tomto místě hotov. Bohužel však Automation studio má hodnotu aktuální budicího proudu zakódovanou v datové proměnné „integer“. V manuálu od firmy B&R je možné vyčíst, že zakódovaná hodnota 19660 odpovídá 3 A. Díky tomu je možné pomocí přímé úměry vypočítat aktuální hodnotu proudu označenou jako I_x .

$$\begin{array}{l} 3 \text{ A} \dots\dots\dots 19660 \\ I_x \dots\dots\dots \text{Aktuální hodnota proměnné} \end{array}$$

$$\frac{I_x}{3} = \frac{\text{Aktuální hodnota proměnné}}{19660} \quad (9)$$

$$I_x = \frac{3 \cdot \text{Aktuální hodnota proměnné}}{19660} \quad (10)$$

Rovnice 10 se dosadí do Rovnice 8 a po úpravě dostáváme Rovnici 11, která nám určí, jaký moment je na hřídeli, pokud je k dispozici aktuální hodnota proudu zakódovaná v datové proměnné „integer“.

$$M[mNm] = 0,0208 \cdot \text{Aktuální hodnota proměnné} \quad (11)$$

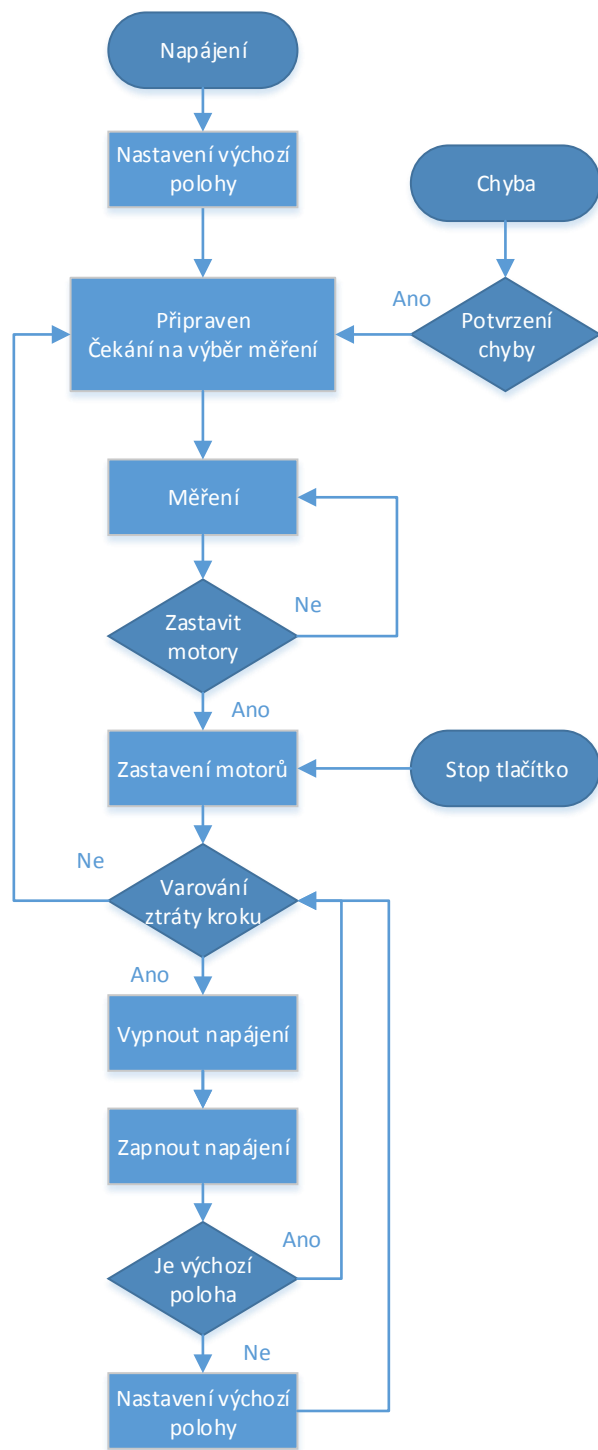
V předešlých výpočtech je určen převod z virtuálních do reálných proměnných. Proto je již možné přistoupit k samotnému popisu programu měření, který je rozdělen na kostru a měření jednotlivých charakteristik. Ty jsou popsány v jednotlivých kapitolách. (2.1 a 2.2).

Kostru programu je psána jako stavový automat (Obrázek 27). Tato část programu slouží k informaci o aktuálním stavu zařízení (např.: je zapnuté napájení, čeká na volbu měření, běží atd.). Celá kostra programu nejprve čeká na zapnutí napájení. Dále je nutné určit počáteční polohu motoru, od které se bude měřit. Pokud předešlé dva kroky byly úspěšně splněny, zařízení se dostane do stavu, kdy čeká na volbu měření, které přichází od uživatele z PowerPanelu nebo přes vzdálený přístup. V tuto chvíli je možné přejít do stavu, kdy je zařízení v chodu, což znamená, že se motory roztočily a probíhá vybrané



měření. Jednotlivým principům měření charakteristik KM se práce zabývá podrobněji v následujících kapitolách (2.1 a 2.2). Pokud program přijme varování o tom, že by krokový motor mohl ztratit krok, jsou motory zastaveny v několika následujících krocích. V první části je důležité především vypnout zátěž, tedy stejnosměrný motor. V druhé části se zastavuje krokový motor. V tomto bodě programu nastával problém. Pokud byl požadavek na to, aby se motory znovu rozeběhly s novými počátečními podmínkami, tak v programu zůstávalo neustálé varování o ztrátě kroku. Ani po znovu zvolení nulové polohy se varování nevymazalo a motory neběžely. Z toho důvodu je zařazen podprogram, který zajišťuje vypnutí napájení do krokových motorů a znovu zapnutí krokových motorů. Následně je důležité zjistit, zda si program pamatuje výchozí polohu KM, pokud tomu tak není, zvolí se aktuální poloha za nulovou. V případě, že program zná svou výchozí polohu, pak přechází do podprogramu, kde probíhá měření. Zde se zvolí nové hodnoty motorů a pokračuje se ve zvoleném měření. Pokud během měření nastane chyba, motory se automaticky zastaví. Chyba se dá zrušit jejím potvrzením ve vizualizaci tlačítkem ErrorAcknow. Pomocí tlačítka Stop ve vizualizaci je možné kdykoli měření zastavit nebo vyvolat výchozí nastavení. Bohužel se tím ztratí veškeré doposud naměřené hodnoty.





Obrázek 27: Vývojový diagram kostry programu



2.1 Statická charakteristika

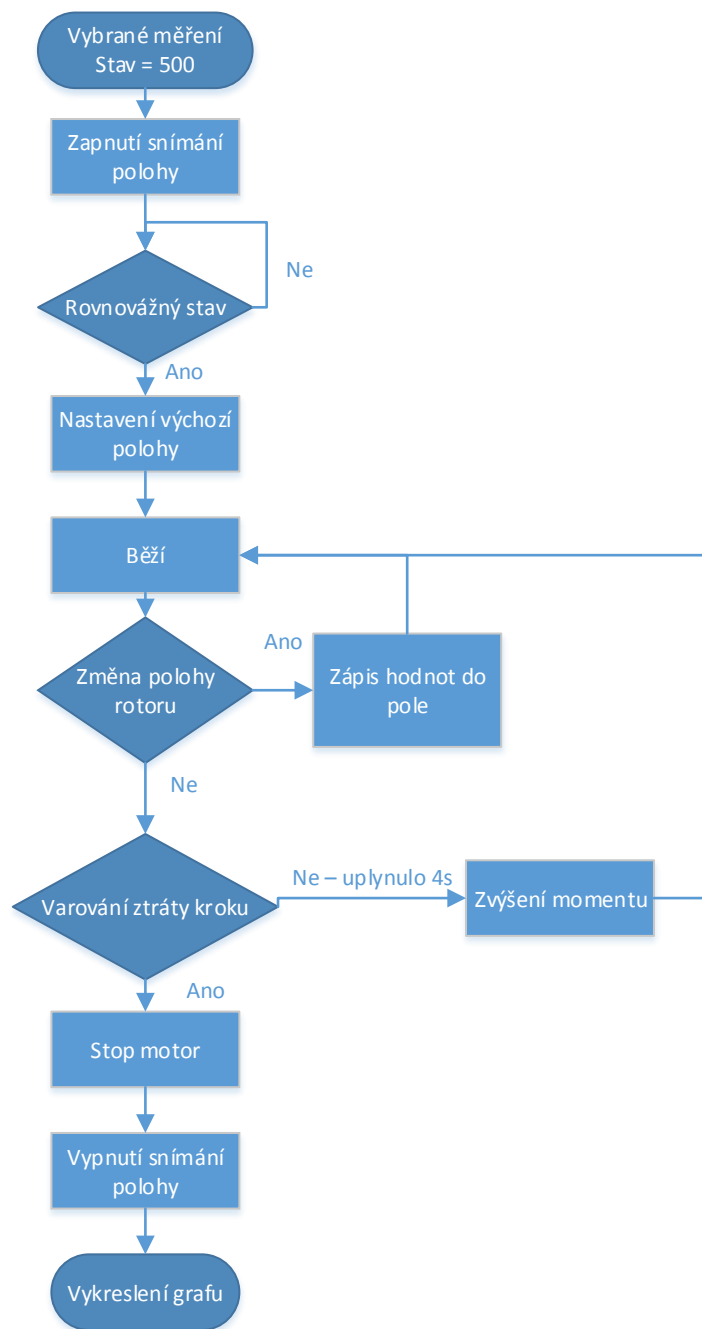
Statická charakteristika určuje, jak velký moment je nabuzený KM schopen přenést do ztráty kroku (viz Kapitola 1.3.1). Nabuzení krokového motoru dosáhneme pouhým zapnutím jeho napájení. Uživatel si bude moci vybrat, zda chce tuto charakteristiku měřit sám nebo zda to nechá na PLC. Naměřená data bude možné zobrazit pomocí vizualizace na PowerPanelu. Jako počáteční zátěžný moment je zvoleno 145 mNm. Bylo nutné vytvořit novou proměnou Act_position_Cyclic z funkce MC_BR_CYC, která umožňuje snímat natočení rotoru i při zapnutém napájení. Knihovna ACP10_MC to nedovolí. Použití funkce MC_BR_CYC přináší svoje úskalí. Je nutné před započítáním měření zapnout zmiňovanou funkci. Kdyby funkce byla stále zapnutá, tak po přetečení proměnné by nastala chyba. Přetečení datového typu nastává při překročení rozsahu dané proměnné. Funkce pro čtení pozice je možné zapsat takto:

```
MC_BR_Cyc_0.Axis := Axis1Obj;  
MC_BR_Cyc_0(ParID := 111);  
MC_BR_Cyc_0.Enable := pomocna.enable;  
BasicControl.Status.ActPositionCyclic := MC_BR_Cyc_0.CyclicPosition;  
BasicControl.Status.ActPositionCyclic.Integer;  
BasicControl.Status.ActPositionCyclic.Real;  
  
IF (MC_BR_Cyc_0.Valid = TRUE) THEN  
    BasicControl.Status.ActPositionCyclic := MC_BR_Cyc_0.CyclicPosition;  
ELSIF MC_BR_Cyc_0.Error THEN  
    MC_BR_Cyc_0.Enable := FALSE;  
END_IF
```

Automatické měření

Při požadavku na měření statické charakteristiky se po kontrole zda oba motory jsou v rovnovážné poloze nastaví počáteční nulová poloha a počáteční hodnota zátěžného momentu. Pokud po dobu čtyř sekund nenastane varování o ztrátě kroku, tak automat zvýší moment. Je nutné vyčkat čtyři sekundy jestli nenastalo varování o ztrátě kroku. Celý cyklus je opakován až do varování o ztrátě kroku. Následně jsou uloženy aktuální hodnoty natočení statoru a zátěžného momentu. Pro zastavení motorů je použit algoritmus z kostry programu (viz Obrázek 27). Dále je nutné vypnout snímání polohy.





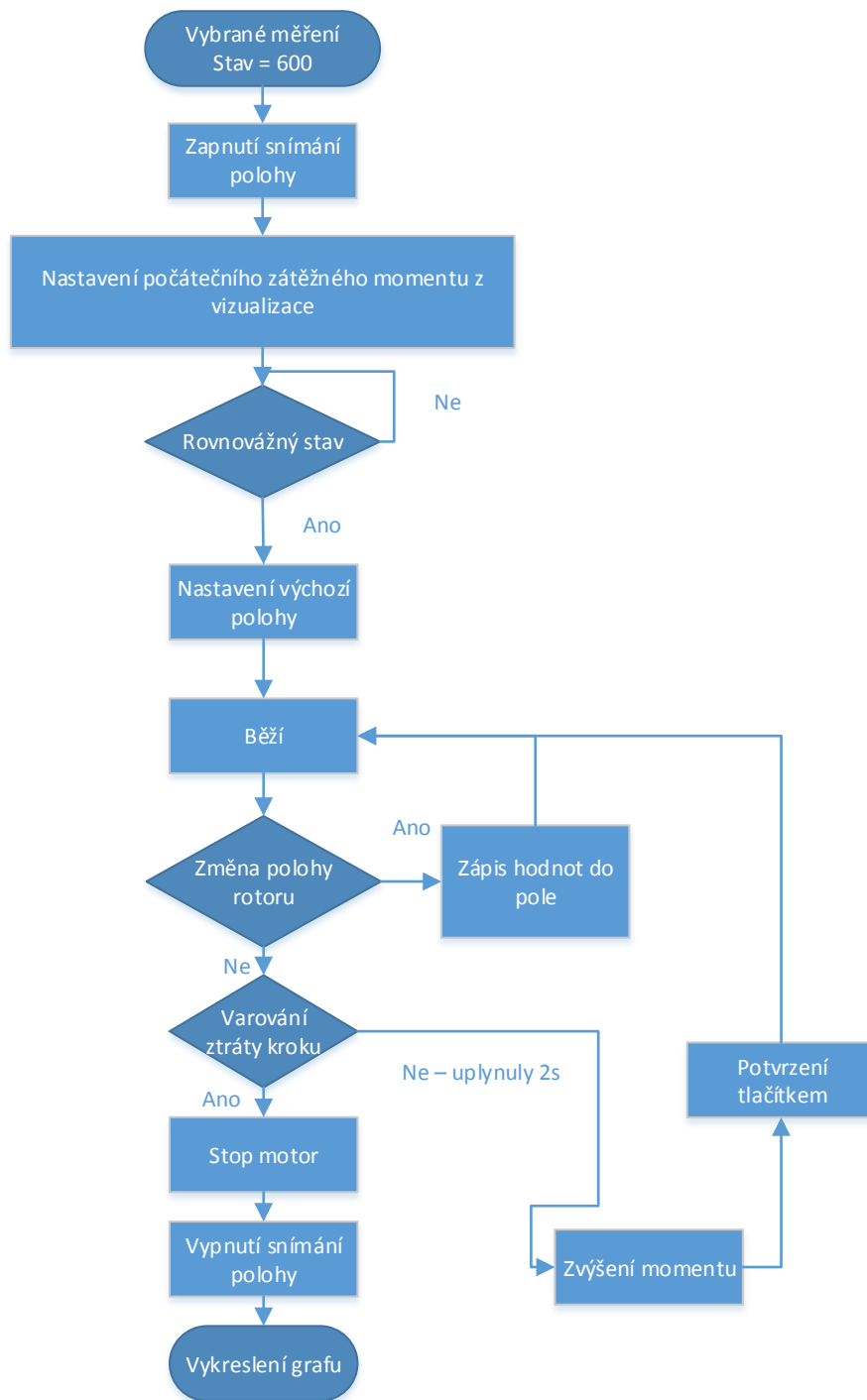
Obrázek 28: Vývojový diagram měření statické charakteristiky automaticky

Manuální měření

Manuální měření statické charakteristiky krokového motoru se od automatické liší tím, že po uživateli je žádána volba počátečního zátěžného momentu. Pokud automat do čtyř sekund neobdrží varování o ztrátě kroku, tak je na uživateli, aby zadal novou hodnotu zátěžného momentu a potvrdil tlačítkem Next. Měřením je možné zjistit čtyřicet hodnot. Je to způsobené alokací pole, které je



nadeřinováno na velikost čtyřicet. Při obdržení varování o ztrátě kroku jsou uloženy poslední hodnoty úhlu natočení rotoru a zátěžného momentu. Je nutné vypnout krokový a také stejnosměrný motor a snímání polohy rotoru. Důvod vypnutí je již uveden na začátku této kapitoly (2.1). Po dokončení všech těchto procesů se vykreslí graf z naměřených hodnot.



Obrázek 29: Vývojový diagram měření statické charakteristiky manuálně



2.2 Momentová charakteristika

Tato kapitola je věnována měření momentové charakteristiky krokového motoru. Jak již je uvedeno v kapitole 1.3.2, momentová charakteristika je rozdělena na dvě části a to charakteristiku start/stop a řízeného zrychlování. Jednotlivé charakteristiky se od sebe liší, a proto je nutné měřit rozdílným postupem. Jednotlivé postupy jsou vysvětleny v samostatných podkapitolách (2.2.1 a 2.2.2). V Tabulce 3 je zaznamenáno, jaké počáteční hodnoty se nastavují při automatickém řízení u obou typů momentové charakteristiky.

Tabulka 3: Počáteční hodnoty při automatickém řízení

Frekvence kroku [Hz]	0,04
Zátěžný moment [mNm]	145

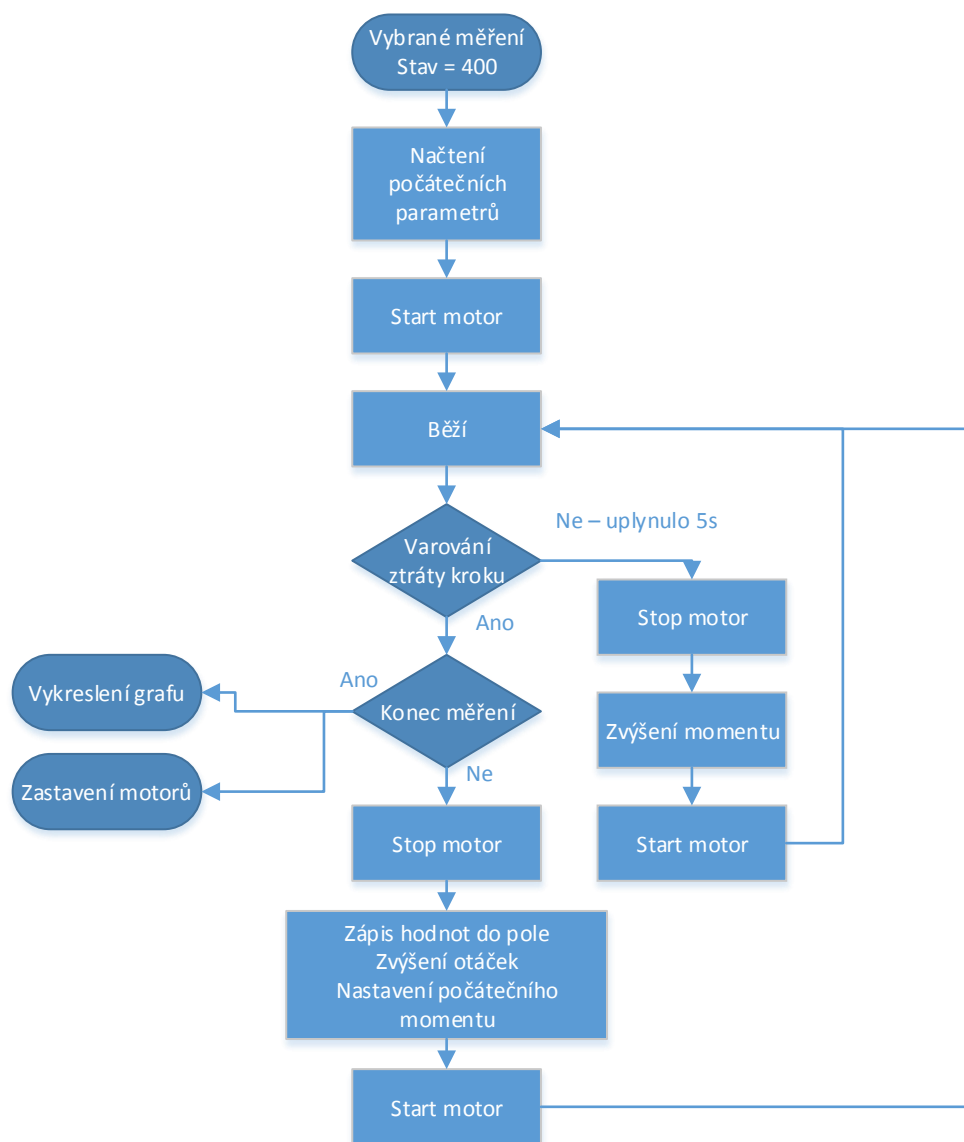
2.2.1 Charakteristika start/stop

U této charakteristiky, dle teorie (Kapitola 1.3.2), má moment klesat se zvyšující se frekvencí kroku krokového motoru. Princip tohoto měření je založen na skokové změně frekvence kroku z nulové hodnoty na požadovanou s určitým zátěžným momentem.

Automatické měření

Pokud uživatel zvolí automatické měření charakteristiky start/stop, lze pracovat dle postupu uvedený na Obrázku 30. Začátek celého měření začíná zadáním počátečních hodnot zátěžného momentu a frekvenci kroku (Tabulka 3). Zároveň se spuštěním motorů se zapne časovač, který je nastaven na pět sekund. Pokud během této vymezené doby přijde varování o ztrátě kroku, motory se zastaví. Jestliže měření skončilo, což znamená, že program naměřil čtyřicet hodnot v různém rozsahu frekvencí kroku, zastaví motory a vykreslí se graf s naměřenou charakteristikou. Pokud celé měření ještě není provedeno, zastaví se motory a nastaví se nová hodnota frekvence otáček KM a počáteční moment. Při dokončení časového intervalu bez varování ztráty kroku, se motory zastaví, zvýší se moment a znovu se spustí. Celý cyklus zvyšování momentu probíhá až do varování o ztrátě kroku.



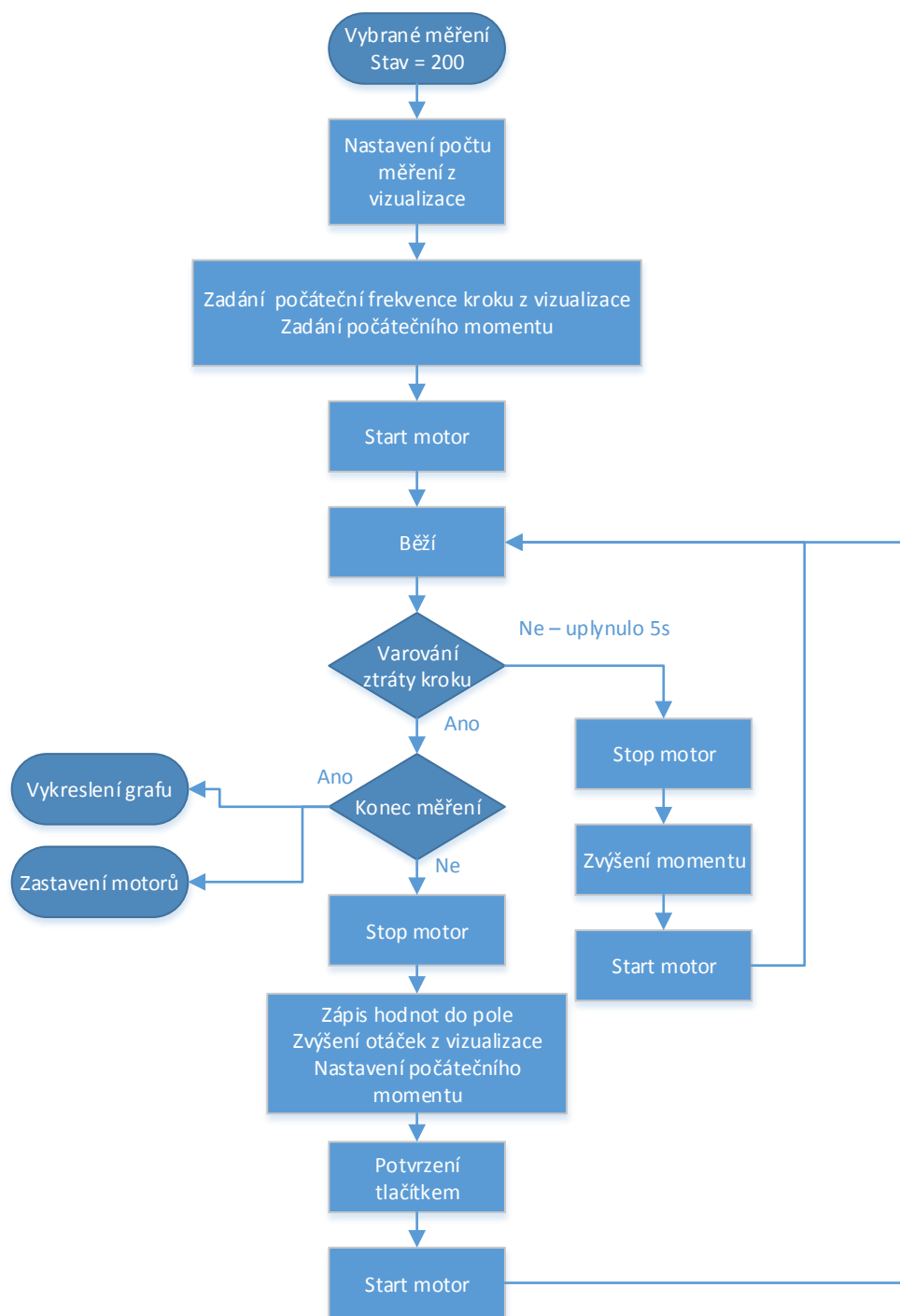


Obrázek 30: Vývojový diagram měření start/stop charakteristiky automaticky

Manuální měření

Manuální měření start/stop charakteristiky je obdobné jako u automatického měření. Uživatel si zvolí počet měření a počáteční otáčky a vše potvrdí tlačítkem Next. Motory se roztočí a program hlídá varování ztráty kroku. Pokud se objeví, motory se zastaví a zapíše se aktuální hodnoty frekvence kroku KM a zátěžný moment. Uživatel je znovu tážán na novou hodnotu frekvence kroku. Svoje nastavení potvrdí tlačítkem Next. Stejně jako u automatického měření je dán časový horizont pěti sekund, po který je hlídáno varování. Po vypršení časového úseku se motory zastaví a zvýší se zátěžný moment. Následně se motory znovu rozeběhnou a opět se hlídá ztráta kroku. Po dosažení počtu měření se automaticky vykreslí graf.





Obrázek 31: Vývojový diagram měření start/stop charakteristiky manuálně



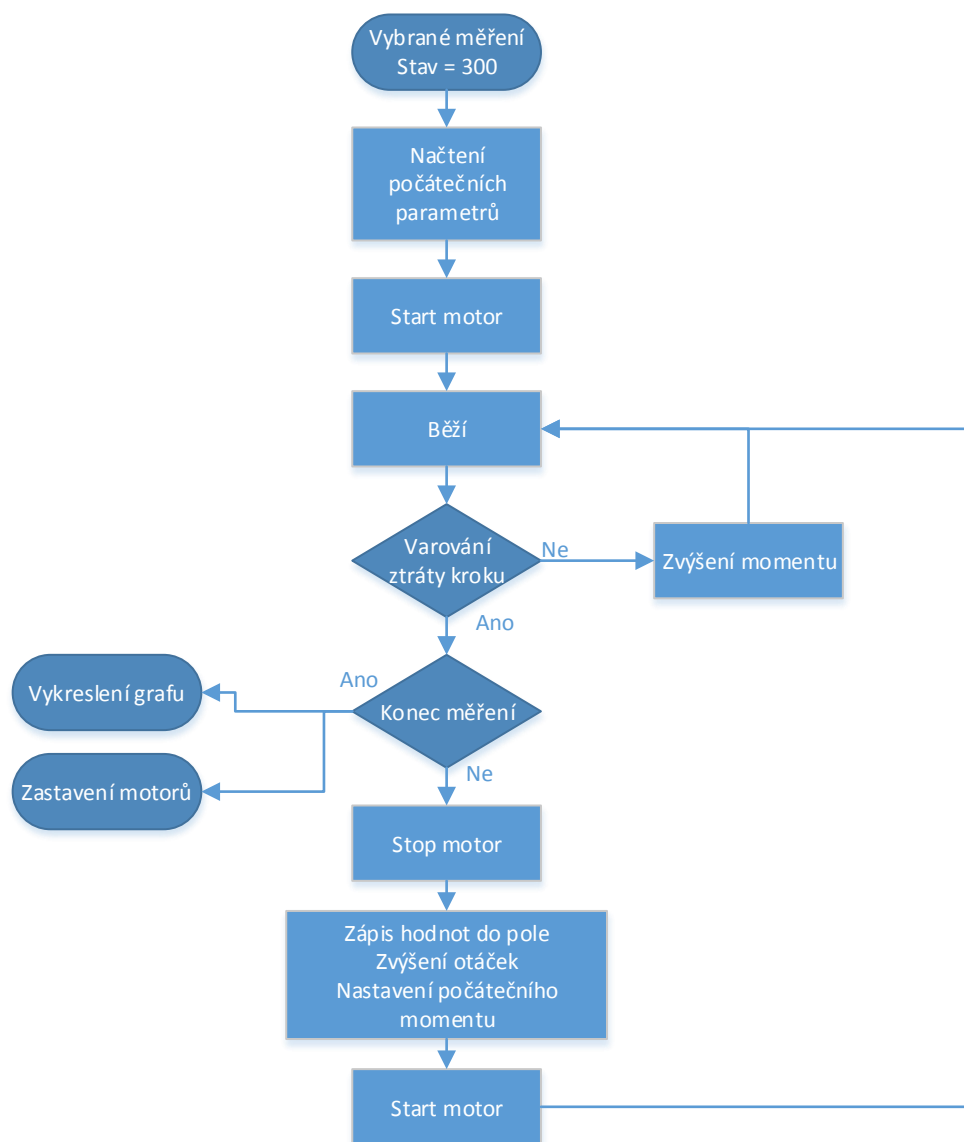
2.2.2 Charakteristika řízeného zrychlování

Charakteristika řízeného zrychlování je známá pod názvem provozní charakteristika (viz kapitola 1.3.2). Toto měření je založeno na zvyšování zátěžného momentu až do varování ztráty kroku. Od předešlého měření se toto liší tím, že při zvýšení momentu se motory nezastavují. Opět je možné měřit automaticky a manuálně. Jednotlivé principy tohoto měření jsou popsány níže.

Automatické měření

Princip automatického řízení momentové charakteristiky omezené řiditelností je založeno na zvyšování zátěžného momentu až do varování ztráty kroku. Při volbě uživatele na automatické měření této charakteristiky jsou načteny počáteční parametry (Tabulka 3). Kontinuálně se přičítá zátěžný moment až do varování na ztrátu kroku. Následně se uloží aktuální hodnota frekvence kroku a zátěžný moment. Zjistí se, zda nastavený počet měření (40 měření) nepřesáhl aktuální hodnotu počtu měření. Při splnění této podmínky se vykreslí graf a zastaví se motory. Při nesplnění se pokračuje v měření a to tím způsobem, že se zvýší hodnota frekvence kroku a nastaví se znovu počáteční hodnota zátěžného momentu.



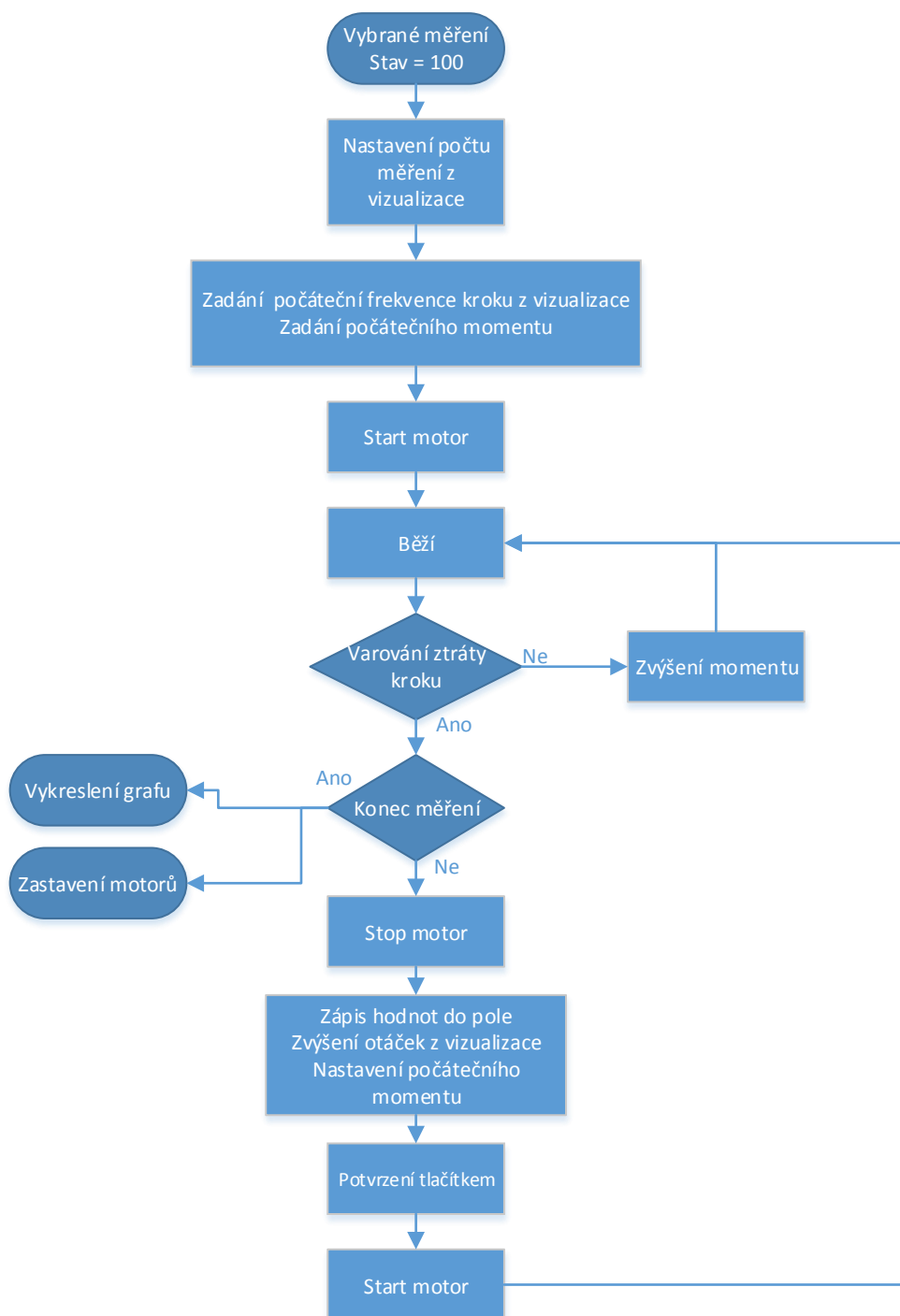


Obrázek 32: Vývojový diagram měření charakteristiky řízeného zrychlování automaticky

Manuální měření

Při volbě manuálního měření je po uživateli vyžadováno nastavení počtu měření a počáteční frekvence kroku pro první měření. Zařízení samo zvyšuje zátěžný moment až do varování ztráty kroku. Jsou zapsány aktuální hodnoty zátěžného momentu a frekvence kroku. Je důležité v tomto okamžiku zjistit, zda aktuální počet měření souhlasí s požadovaným počtem měření nastaveným uživatelem. Pokud je tato podmínka splněna, vykreslí se graf a motory se zastaví, jestliže ne, pak je uživatel tázán na novou hodnotu frekvence kroku, kterou potvrdí tlačítkem. Nastaví se počáteční zátěžný moment a měření pokračuje.





Obrázek 33: Vývojový diagram měření charakteristiky řízeného zrychlování manuálně



3 Vizualizace

Ovládání celého měření a zobrazování výsledků je možné přímo u motorů pomocí dotykového displeje pojmenovaném u firmy B&R PowerPanel, nebo pomocí vzdáleného přístupu.

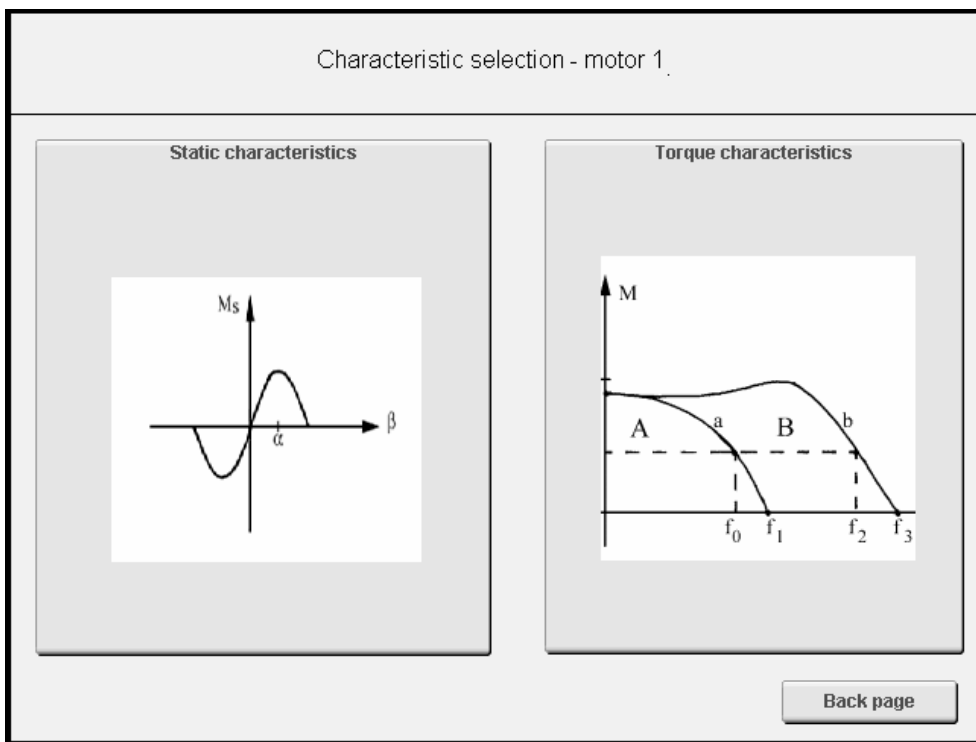
3.1 Ovládání měření přes Powerpanel

Jedná se o 10.4" VGA barevný dotykový displej s Intel Atom technologií. Všechny komponenty (tlačítka, numerica, text atd.) pro vizualizaci jsou vytvořeny pomocí Visual Components v Automation studiu. Ke všem komponentům jsou přiřazeny jednotlivé proměnné. Na tyto proměnné se pak odkazuje v programu VisuProgram, ten je úplně oddělen od programu, který řídí motory. VisuProgram běží v 50ms cyklu. Celá vizualizace začíná úvodní obrazovkou (Obrázek 34), zde si uživatel zvolí, na jakém krokovém motoru bude probíhat měření. Po volbě KM je na řadě výběr měřené charakteristiky (Obrázek 35). Při volbě statické charakteristiky se přepne na obrazovku uvedenou na Obrázku 36 a měření momentové charakteristiky je znázorněno na Obrázku 37. Ovládání měření přes PowerPanel je popsáno v příloze A.



Obrázek 34: Úvodní obrazovka vizualizace





Obrázek 35: Vizualizace - výběr charakteristiky

12:25:25
Static characteristic - motor 1
error ID:

ON/OFF
Home
Stop/Reset
ErrorAcknow.

Angle [°]

UP
DOWN

Load torque[mNm]

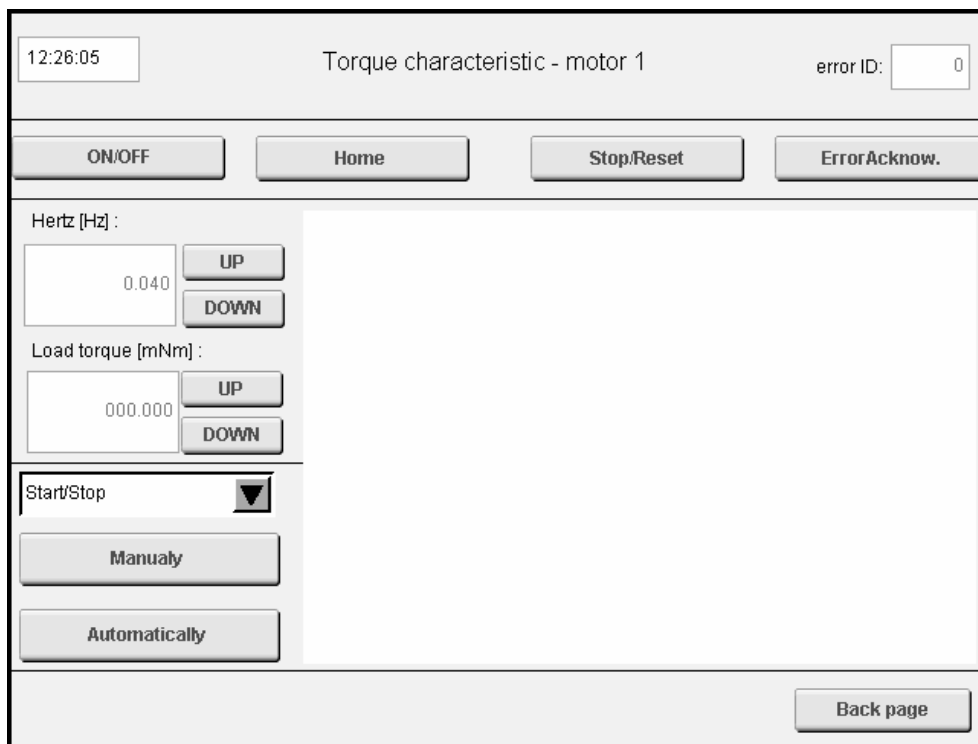
UP
DOWN

Manualy
Automatically

[Back page](#)

Obrázek 36: Vizualizace - měření statické charakteristiky





Obrázek 37: Vizualizace - měření momentové charakteristiky

Samotnou kapitolou je vykreslování XY grafu. Původní myšlenkou bylo využít komponenty Trend z nabídky Visual Components. Bohužel po velkém počtu pokusů bylo zjištěno, že tato komponenta nelze pro toto měření využít, a to z důvodu, že na ose x je možné zobrazovat pouze čas. V měření, kterým se zabývá diplomová práce, je nutné zobrazovat na ose x otáčky nebo úhel natočení. Je tedy třeba využít knihovny Visapi, která umožňuje v reálném čase pracovat s grafikou ve vizualizaci.

3.1.1 Knihovna Visapi

Tato knihovna z nabídky Automation Studia obsahuje pouze prostředky pro vytvoření statických komponentů ve vizualizaci (texty, čtverec, čáry atd.). U uvedených statických prvků je za běhu programu možno měnit barvu, skrývat je, zamknout atd. Nevýhodou je, že v knihovně není možnost měnit polohu komponentu, lze pouze skrývat, zamykat nebo znovu vykreslovat.

Pro tvorbu XY grafů v našem programu byly použity předdefinované funkce z knihovny Visapi:

- VA_Line – vytvoří čáru o libovolné délce a barvě
- VA_Rect – vytvoří čtverec na určitých souřadnicích o libovolných rozměrech a barvě
- VA_TextOut – zobrazí daný text na zvolených souřadnicích



Tyto tři funkce postačí pro vytvoření XY grafu ve vizualizaci. Využití těchto funkcí je možné jen za určitých podmínek. Základní podmínkou je, že všechny funkce musí být uvedeny mezi Va_Success(), ta musí vrátit 0 a funkcí Va_Srelease() na konci vykreslování. Další podmínkou je vytvoření VC_HANDLE z funkce VA_Setup(). Po splnění všech výše uvedených podmínek se zobrazí daný geometrický tvar anebo text. Záhy by se však dalo zjistit, že zvolený geometrický tvar překreslil komponenty ve vizualizaci jako např. tlačítka, texty a další statické prvky. Z toho důvodu je nutné využít další dvě funkce VA_Attach() a VA_Detach(), které umožní všechny vykreslované prvky z knihovny umístit do plochy DrawBoxu, k tomu určenému. Všechny funkce uvedené výše jsou součástí knihovny Visapi. Část programu, ve kterém se pracuje s uvedenými funkcemi, pak například vypadá takto:

```
(*spuštění Visapi-získání potřebného VA_HANDLE*)
IF( ready <>1) THEN
    VC_HANDLE := VA_Setup(1, 'Visu');
    IF(VC_HANDLE <> 0) THEN
        ready :=1;
    END_IF
END_IF

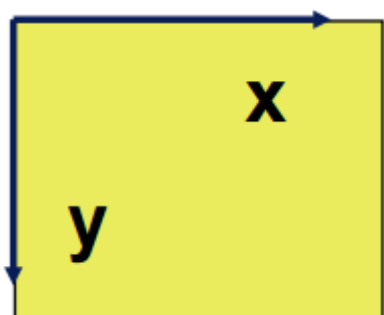
(*pokud je VA_HANDLE k dispozici *)
IF(ready = 1) THEN
    IF( VA_Success(1, VC_HANDLE) = 0) THEN
        (*umístění Visapi na DrawBox1 na straně 2 ve vizualizaci*)
        Status_Attache:=VA_Attach(1,VC_HANDLE,0,ADR('Page_2/Default/DrawBox_1'));
        IF(Status_Attach = 0) THEN
            :
            (*příkazy pro vykreslování komponent z Visapi *)
            :
            VA_Detach(1,VC_HANDLE);
        END_IF
        VA_Srelease(1,VC_HANDLE);
    END_IF
END_IF
```

Tento příklad zdrojového kódu, který je psán ve strukturovaném textu, je převzat z literatury [10].

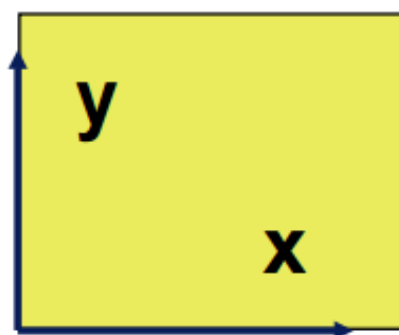


3.1.2 Změna souřadného systému

Veškerá počítačová grafika má souřadný systém v pixelech (Obrázek 38). Vizualizace v Automation Studio není výjimkou. Veškerá data naměřená v reálném čase jsou naopak v homogenním souřadném systému (Obrázek 39). Před vykreslováním naměřených hodnot pomocí knihovny Visapi, je nutné veškeré naměřené hodnoty transformovat z reálného souřadného systému do systému v pixelech. K transformaci je využita teorie lineární grafické transformace, která je pomocí transformační matice schopna transformovat jakýkoliv bod v počítačové grafice. Například jsou možné body: posunout, otočit, zvětšit/zmenšit, zkosit a jiné. Tento postup je zvolen díky své jednoduchosti a snadné implementaci. „Je možné provádět až 10^8 transformací najednou. Záleží však na výkonosti výpočetního zařízení.“ [11]



Obrázek 38: Souřadný systém v pixelech [15]



Obrázek 39: Kartézský souřadný systém [15]

Jak již je výše řečeno, pro lineární transformaci se využívá transformace souřadnic pomocí transformačních matic. V obecném případě se do řádkového vektoru vloží hodnoty souřadnic x a y doplněné jedničkou. Tento vektor se následně násobí transformační maticí (Rovnice 12), která v obecném případě může mít jakoukoli podobu. Záleží na typu transformace (rotace, posuv ...).

$$(X' \ Y' \ 1) = (X \ Y \ 1) \cdot A \quad (12) [12]$$

X' - transformované x souřadnice

Y' - transformované y souřadnice

X - transformační souřadnice x

Y - transformační souřadnice y

A - transformační matice



Ke změně souřadného systému postačí pouze lehce upravené transformační matice posuvu. Základní matice posuvu je označena písmenem A (Rovnice 13). Pro transformaci souřadného systému je třeba změnit hodnotu prvku matice A na souřadnicích (2,2). Transformační matice, která přepočítává reálné naměřené hodnoty do souřadnic pro vykreslování v grafice je označena jako A' (Rovnice 14). Rovnice 15 pak ukazuje celkový přepočítání z reálných souřadnic do pixelů.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ ux & uy & 1 \end{pmatrix} \quad (13) [12]$$

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ ux & uy & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$(X_{pix} \ Y_{pix} \ 1) = (X_{real} \ Y_{real} \ 1) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ ux & uy & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ux - posunutí v x

uy - posunutí v y

X_{pix} - hodnota x souřadnice v souřadném systému v pixelech

Y_{pix} - hodnota y souřadnice v souřadném systému v pixelech

X_{real} - hodnota x souřadnice v Kartézském souřadném systému

Y_{real} - hodnota y souřadnice v Kartézském souřadném systému

Pro násobení matic v Automation Studiu je využívána knihovna MTLinAlg, která má veškeré funkce pro operace s maticemi (násobení, inverzní matice, výpočet determinantu ...). Pro násobení je z uvedené knihovny využita funkce MTLinAlgMatrixSubtraction, díky níž je možné provádět násobení dvou matic. Před využitím funkce pro násobení postačí předdefinovat matice a pak je ve správném pořadí vložit do funkce. Výsledek násobení je uložen do matice zvolené uživatelem. Bohužel z nevysvětlitelného důvodu celá knihovna MTLinAlg v tomto projektu nefungovala správně. Při zadání funkce pro násobení matic byla přepsána transformační matice.

Po konzultaci s podporou firmy B&R bylo přikročeno k náhradě funkce z knihovny vlastnoručně naprogramovaným algoritmem pro násobení matic. Před násobením je důležité nejprve si ověřit, že levá matice má tolik sloupců jako pravá řádků. Násobení matic lze pochopit z Rovnice 16, její slovní význam zní takto: načte se první řádek první matice s prvním sloupcem druhé matice. Základní princip násobení matic je takový, že vynásobíme řádek první matice se sloupcem druhé matice. Na



Obrázku 40 je znázorněno násobení matice A s maticí B. Z toho je patrné, jaké prvky se s kterými sčítají a násobí.

$$(A \cdot B)_{ij} = \sum_{p=1}^n a_{ip} \cdot b_{pj} \quad (16) [13]$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}$$

$$AB = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}$$

Obrázek 40: Násobení matic 2×2 [14]

Vlastní návrh programu pro násobení matic, pak může vypadat takto:

```
(*Násobení matic*)
FOR i :=1 TO 1 BY 1 DO
  FOR j:=1 TO 3 BY 1 DO
    Sum[i,j] := 0;
    FOR ii:= 1 TO 3 BY 1 DO
      Sum [i,j] := Sum[i,j] + Matrix.Matrix_Real[i,ii]*Matrix.Matrix_Trans[ii,j];
    END_FOR
  END_FOR
END_FOR
PixVysledek[k,1] := Sum[1,1];
PixVysledek[k,2] := Sum [1,2];
```

Výše uvedený program je psaný ve strukturovaném textu pouze pro potřeby diplomové práce. Tudiž jen pro násobení řádkového vektoru o velikosti (1×3) s maticí (3×3).

3.1.3 XY graf

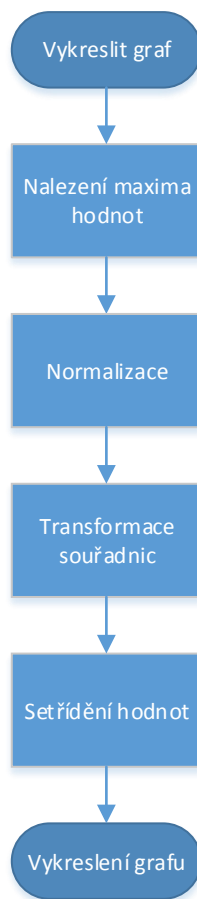
V předešlých kapitolách jsou popsány potřebné části ke složení algoritmu pro vykreslování XY grafu. Celý postup vykreslování je zobrazen na Obrázku 41. Pokud podprogram přijme informace o vykreslení grafu, tak se v polích naleznou nejvyšší hodnoty. Následně probíhá takzvaná normalizace. Vydělí se všechny hodnoty pole jeho maximem a vynásobí se velikostí jednotlivých os souřadného systému. Normalizace je do programu zařazena z toho důvodu, aby se vykreslený graf vešel do vykreslované oblasti (DrawBox). Po normalizaci může program přejít na transformaci všech hodnot do



pixelů (Kapitola 3.1.2). Dalším krokem je seřídění. Zde je použit algoritmus pro seřídění pole zvaný Bublínkové třídění (BubbleSort). Část kódu seřídění pole je především využívána při ručním měření charakteristik krokových motorů. Uživatel nemusí frekvenci kroku zvyšovat postupně a po vykreslení může být graf zdeformovaný. Zároveň s vykreslením seříděných naměřených hodnot je vykreslen náležitý souřadný systém s popisem os. Program pro vykreslení grafu pak může vypadat takto:

```
FOR g :=1 TO Graph.index-2 BY 1 DO  
VA_Line(1,VC_HANDLE,(PixVysledek[g,1])PixVysledek[g,2]),(PixVysledek[g+1,1]),...  
...(PixVysledek[g+1,2]),1);  
END_FOR
```

Algoritmus, který je uvedený výše za pomoci funkce VA_Line vykreslí jednotlivé čáry grafu.



Obrázek 41: Vývojový diagram vykreslení grafu



3.2 Ovládání měření přes vzdálený přístup

Automation studio umožňuje ovládání PLC přes vzdálený přístup, které firma B&R označuje zkratkou Net PVI. Tato úprava programu umožní rozšíření ovládání PLC od pouhé výměny dat mezi PC připojené přes vzdálený přístup a PLC až po kompletní ovládání PLC přes internet. Automation studio nabízí možnost výběru několika typů vzdáleného přístupu dle požadavků na danou aplikaci. Jednotlivé metody jsou popsány níže.

PVI DDE server

Tento typ serveru umožní ostatním klientů na síti přistupovat k vybraným proměnným z Automation studia pomocí Wordu nebo Excelu. Komunikace mezi DDE je zprovozněna pomocí knihovny DDEML (Dynamic Data Exchange Manager), která je vytvořená speciálně pro Windows. Ukázka vizualizace přes PVI DDE server je znázorněna na Obrázku 42. Tento typ serveru je pro diplomovou práci nepoužitelný vzhledem ke své zbytečně složité implementaci a nutnosti každého uživatele na síti mít k dispozici Microsoft Office.



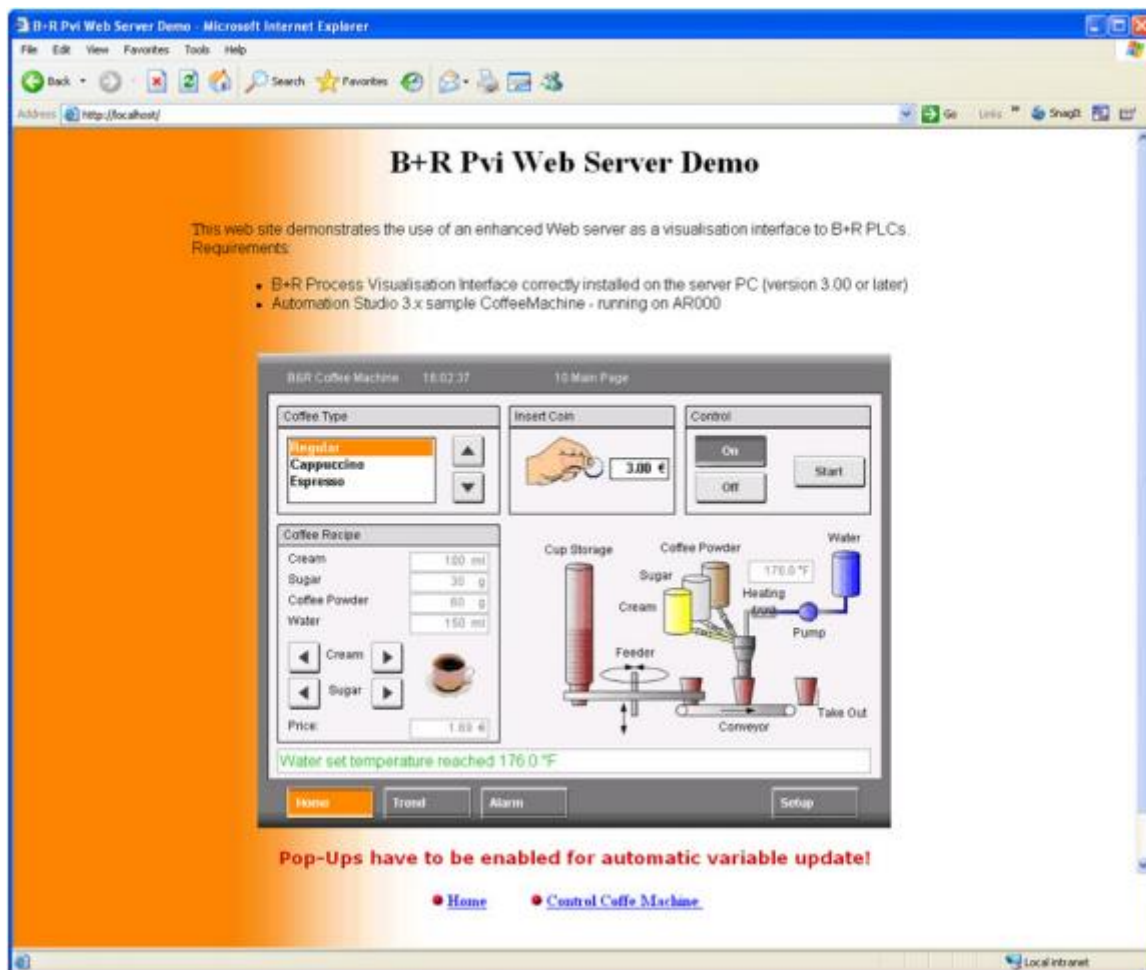
Obrázek 42: Ukázka PVI DDE server [15]

PVI WEB server

PVI WEB server umožňuje přístup k vizualizaci kdekoli ze světa pomocí HTML stránky. Rozhraní HTML stránky je vytvořeno firmou B&R a postačuje nahrát pouze vytvořenou vizualizaci z Automation studia. K ovládání měření postačuje pouze úspěšné přihlášení k serveru. Server je tedy chráněn před nežádoucím zneužitím. PVI WEB server se jeví pro potřeby práce ideální, bohužel firma



B&R přestala tento server podporovat od verze PVI 3.0.2. Vizualizace v diplomové práci je vytvořena ve verzi PVI 4.0.1.



Obrázek 43: Ukázka PVI WEB serveru [15]

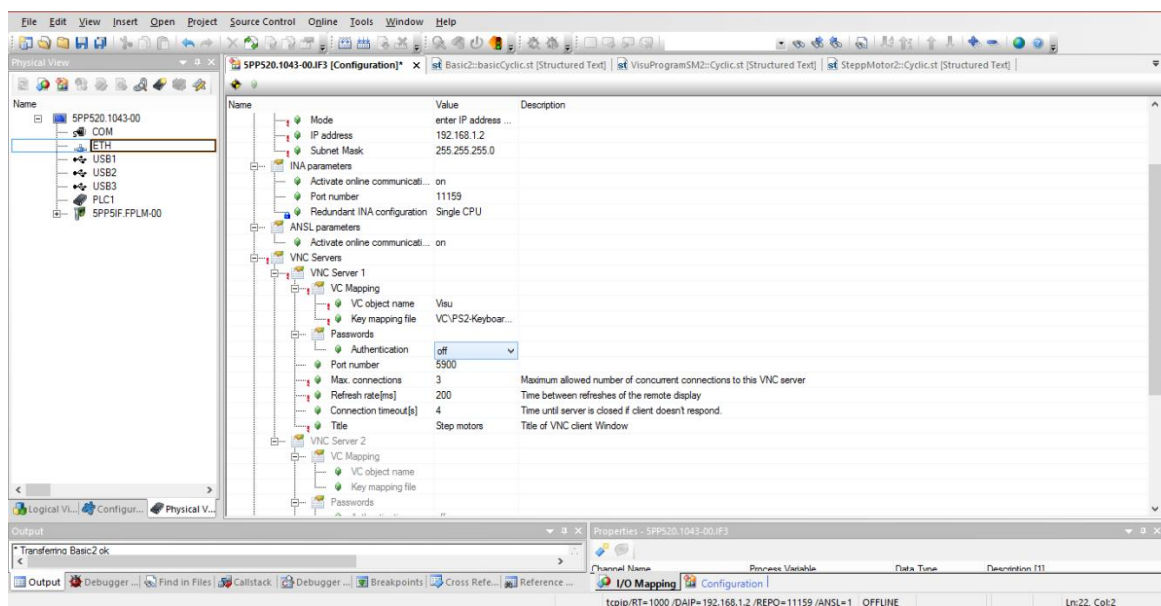
Knihovna Web server

Cílem této knihovny je poskytnout klientům ovládat PLC přes webové rozhraní. Po přidání knihovny Web server do Automation studia program vygeneruje na paměťové kartě složku Web. V této složce je nahráno webové rozhraní pomocí FTP (File Transfer Protocol) serveru. Dále je nutné vytvořit dva konfigurační soubory. První soubor obsahuje informaci o tom, kde se na síti nachází PLC a druhý soubor obsahuje informace potřebné pro chod webového serveru. Před využitím této knihovny je nutné vytvořit celé webové rozhraní s vizualizací. Není tedy možné použít vizualizaci vytvořenou v Automation studiu. Dále je třeba vytvořit soubor, který propojí proměnné z webového rozhraní s proměnnými v Automation studiu.

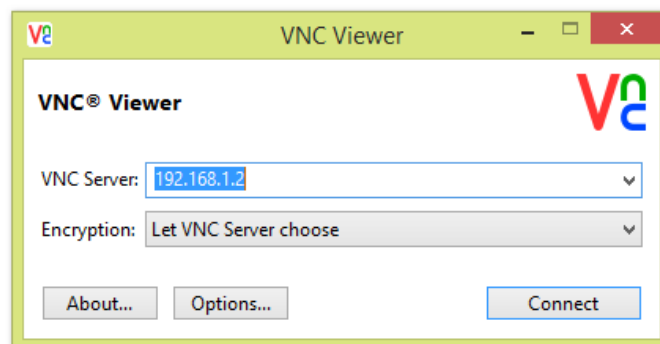


VNC server

Pro potřeby vzdáleného přístupu k měření charakteristik krokových motorů je využita funkce VNC server. Tato funkce je součástí Automation studia. V záložce nastavení ethernetového připojení je třeba povolit využití VNC serveru (Obrázek 44). Výhoda této funkce spočívá ve využití již vytvořené vizualizace pro PowerPanel jménem Visu. Vzdálený přístup používá již vytvořené funkce, které jsou popsány výše. Pro připojení k vizualizaci přes PC je třeba mít k dispozici program VNC vieweru (Obrázek 45) do kterého postačí zadat pouze IP adresu, na které se nachází PLC. Po připojení k PLC je možné ovládat měření přes vzdálený přístup na PC.



Obrázek 44: Nastavení VNC serveru



Obrázek 45: VNC Viewer



4 Naměřené charakteristiky

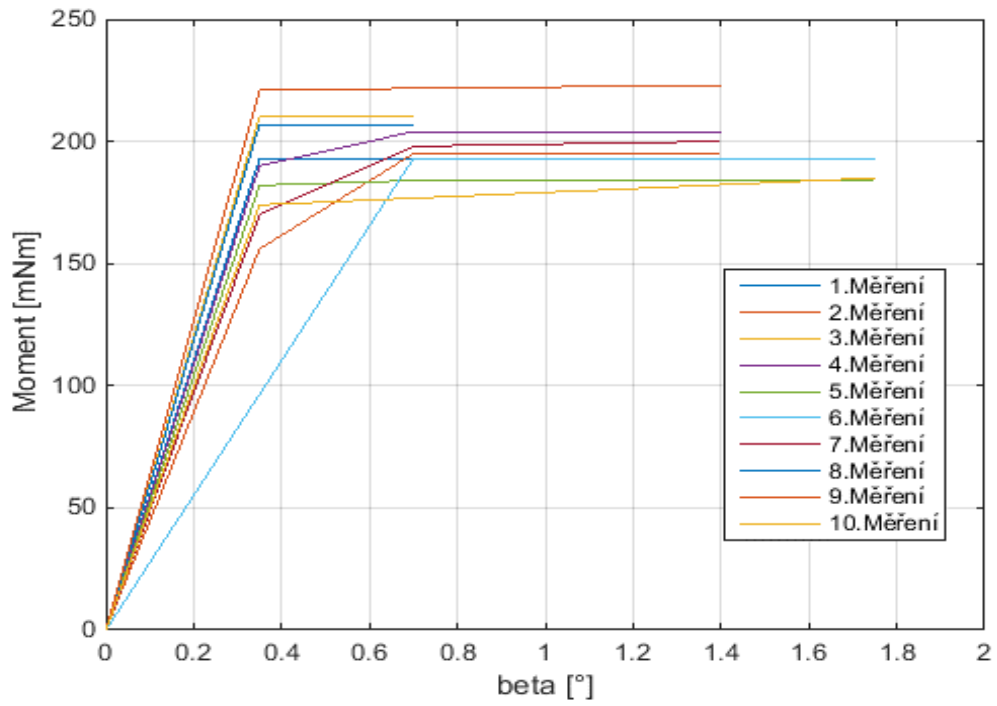
Pro ověření funkčnosti měření je každá charakteristika desetkrát změřena. Naměřené hodnoty jsou získány z Automation studia z programu na sledování vnitřních proměnných („Watch“) a ručním zápisem. Takto získané hodnoty jsou převedeny do Matlabu, kde jsou dále statisticky zpracovány průměrem deseti měření (Rovnice 17). Je důležité připomenout, že krokový motor je proudově velmi omezen, aby bylo možné měření vůbec provádět. V jednotlivých kapitolách (4.1 a 4.2) jsou vidět ukázky obrázků naměřených charakteristik na PowerPanelu.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (17)$$

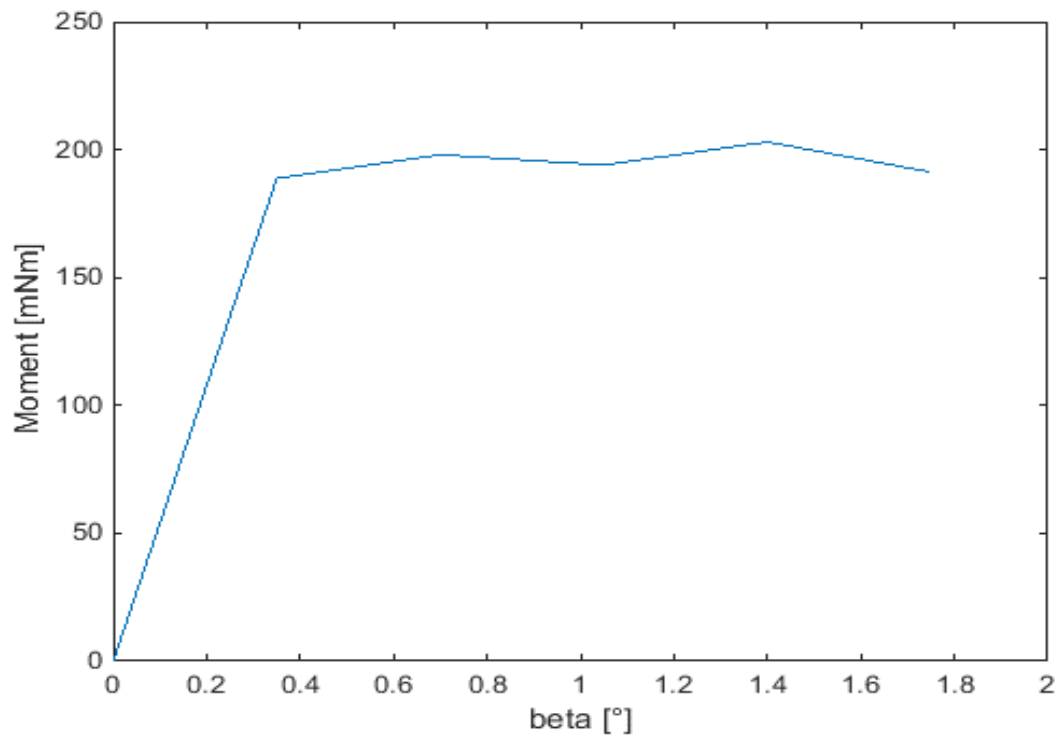
4.1 Statická charakteristika

Statická charakteristika byla měřena jen v prvním kvadrantu (kladný směr otáčení). V ostatních kvadrantech bylo měření provedeno neúspěšně, protože do proměnné určené na uložení hodnoty natočení rotoru se zapisovaly nesmyslné hodnoty, které nebylo možné dále zpracovat. Z Obrázku 46 je zřejmé, že u některých hodnot natočení rotoru není zaznamenána hodnota momentu. To je způsobeno malým rozlišením inkrementálního snímače úhlu natočení. Pro potřeby výpočtu průměru byly nezaznamenané hodnoty nahrazeny nulou. Výsledek je vidět na Obrázku 47. Dle tohoto výsledku je hodnota statického momentu 203 mNm na hodnotě natočení rotoru 1,4 °. Na Obrázku 48 je znázorněna ukázka výsledku statické charakteristiky na PowerPanelu.



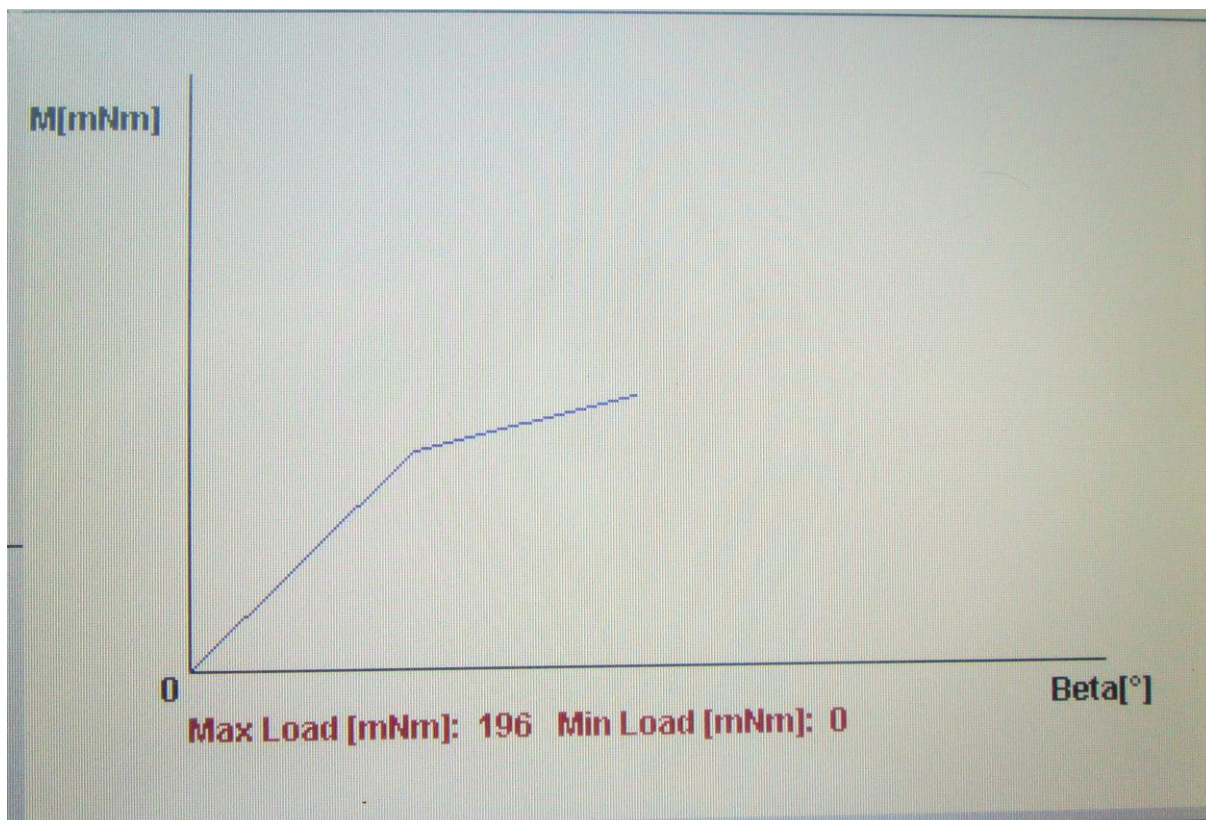


Obrázek 46: Deset měření statické charakteristiky



Obrázek 47: Průměr deseti naměřených hodnot statické charakteristiky





Obrázek 48: Ukázka měření statické charakteristiky na PowerPanelu

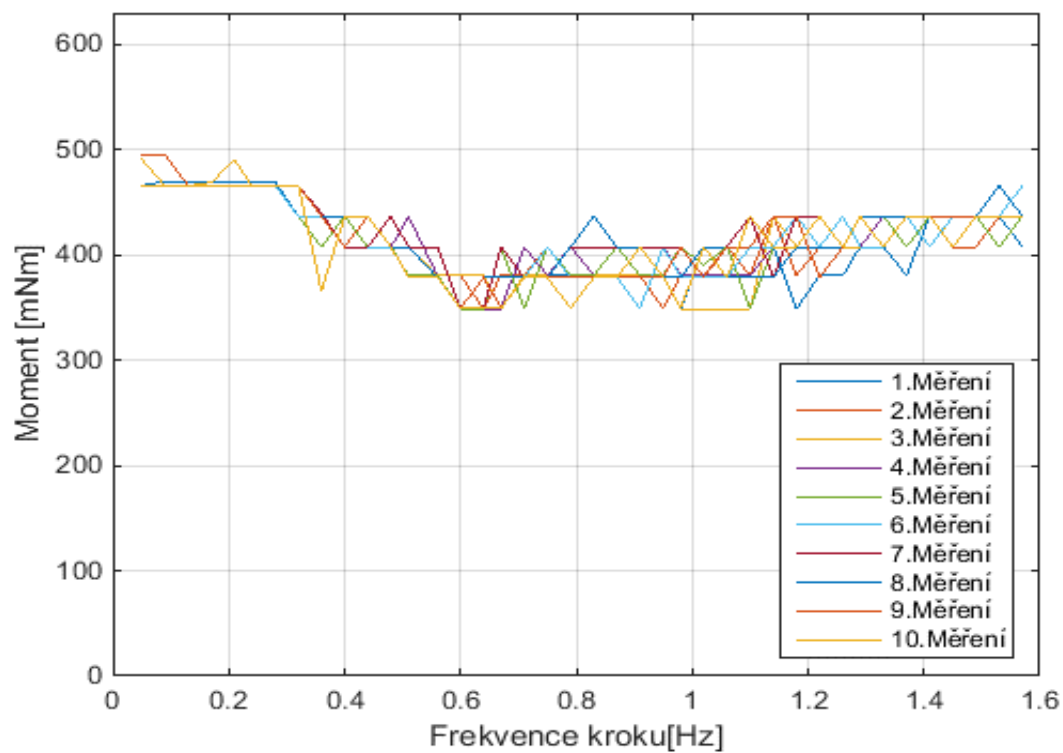
4.2 Momentová charakteristika

Rozbor momentové charakteristiky je rozdělen na část start/stop a řízeného zrychlování. Měření probíhalo od frekvence kroku 0,05 Hz do 1,57 Hz. V tomto rozsahu je naměřeno čtyřicet hodnot.

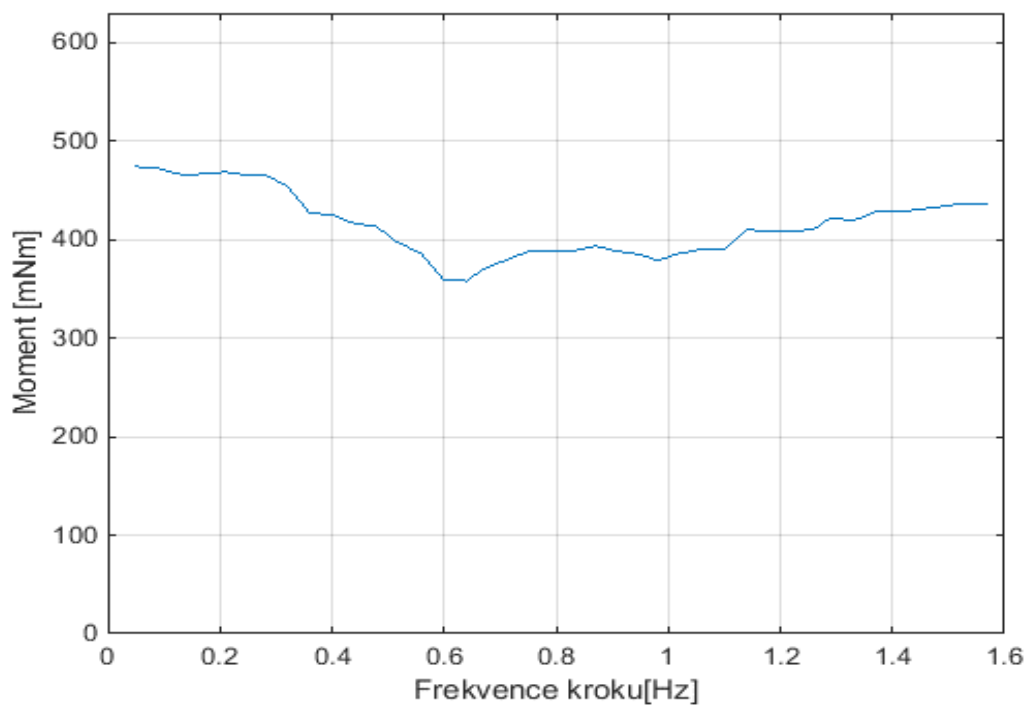
4.2.1 Start/ stop charakteristika

Charakteristika start/stop ukazuje, s jak velkým zátěžným momentem je schopný se krokový motor skokově rozeběhnout z nulových otáček na požadovanou rychlost bez ztráty kroku. Obrázek 49 znázorňuje deset naměřených hodnot, ze kterých je vypočten průměr (Obrázek 50). Z průměru je vidět, že do frekvence kroku 0,64 Hz je charakteristika podobná teorii. Od frekvence kroku 0,64 Hz se charakteristika chovala nahodile. Nejvyšší moment v průměru má hodnotu 474,2 mNm na frekvenci kroku 0,05 Hz. Ukázka změřené start/stop charakteristiky zobrazená na PowerPanelu je zobrazena na Obrázku 51.



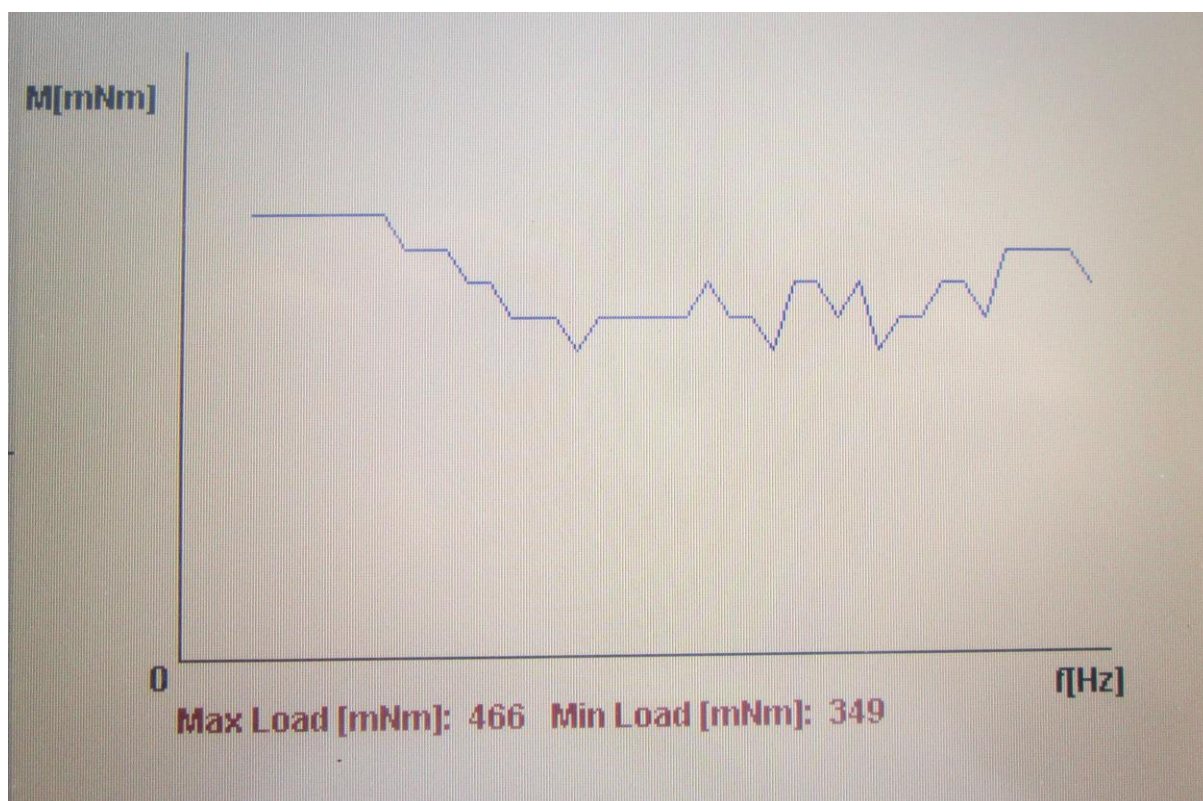


Obrázek 49: Deset měření momentové charakteristiky Start/Stop



Obrázek 50: Průměr deseti naměřených hodnot momentové charakteristiky Start/Stop



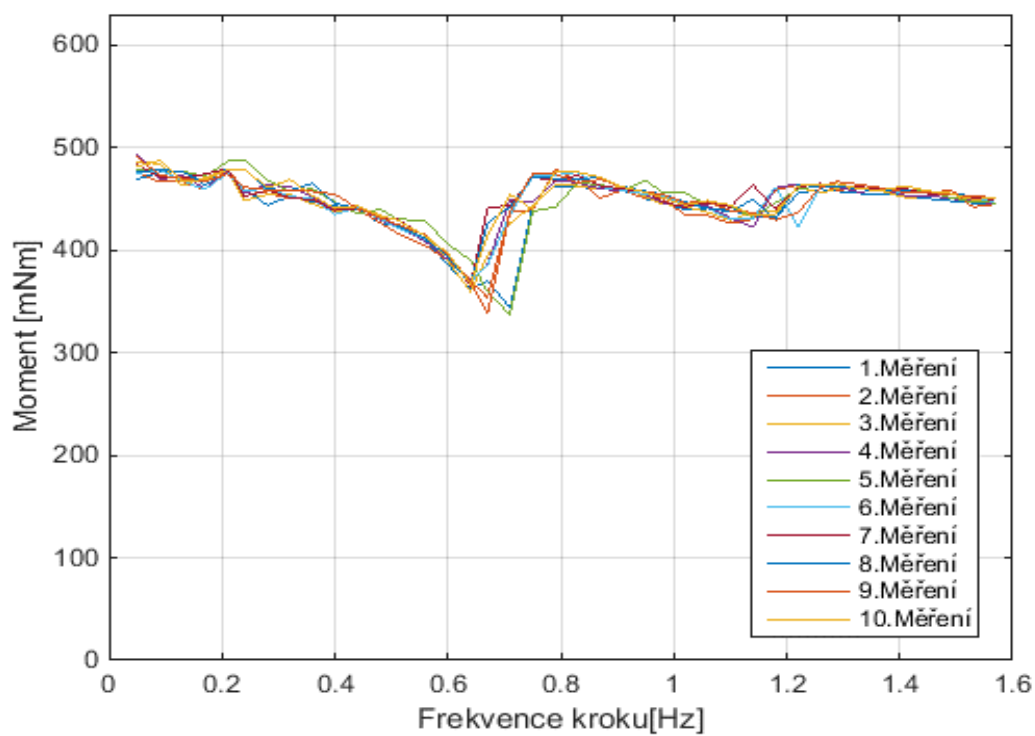


Obrázek 51: Ukázka měření momentové charakteristiky Start/Stop na PowerPanelu

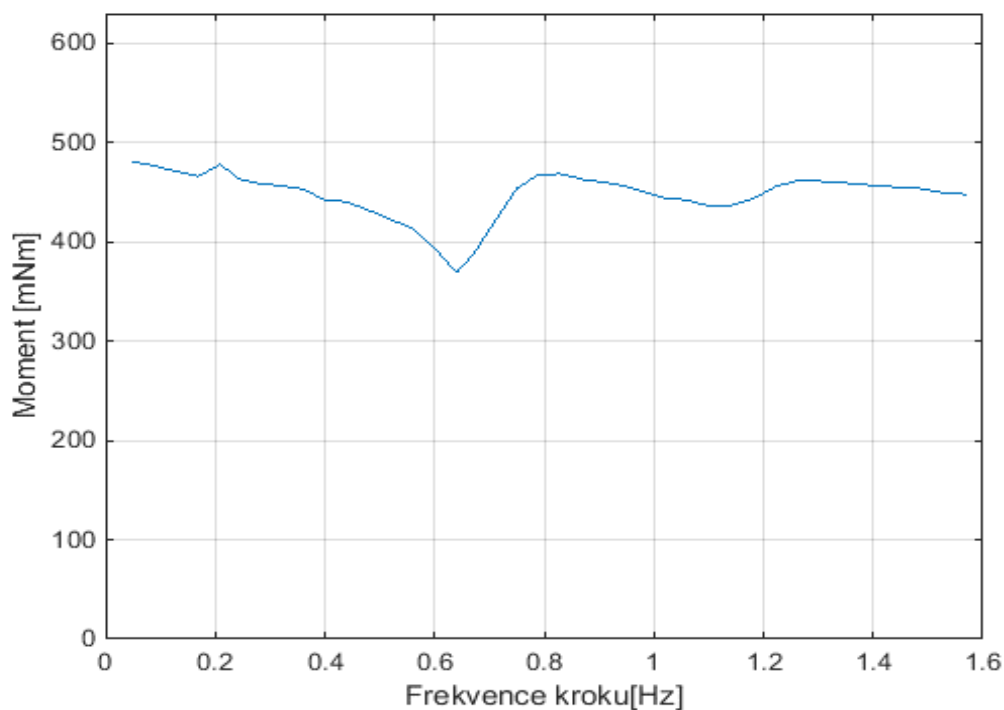
4.2.2 Charakteristika řízeného zrychlování

Na Obrázku 53 je vidět průměr deseti naměřených hodnot momentové charakteristiky řízeného zrychlování. Měření probíhalo od 0,05 Hz do 1,6 Hz. Při vyšších frekvencích krokový motor ztrácel krok. To je způsobené snížením proudů KM. Nejvyšší naměřený moment byl 480,79 mNm při frekvenci kroku 0,05 Hz. Naopak nejnižší moment byl 369,52 mNm na frekvenci 0,64 Hz. Naměřená hodnota se zdá konstantní, proto je možné spočítat jeho průměrnou hodnotu 402,65 mNm. Výchylka mezi průměrem a minimální hodnotou je 70,13 mNm. Moment 70 mNm je tak malá hodnota, že ji ve výsledném měření můžeme akceptovat a nepovažovat za vážnou chybu. Zobrazení momentové charakteristiky na PowerPanelu je demonstrováno na Obrázku 54.



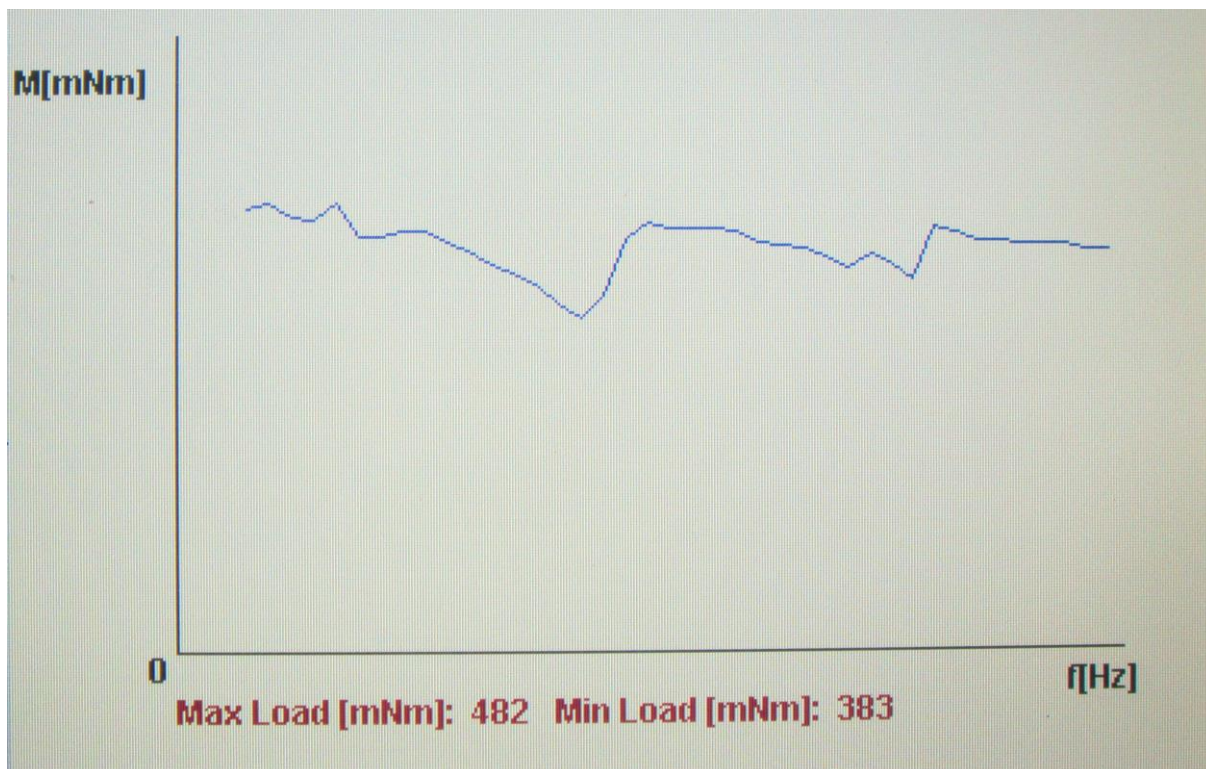


Obrázek 52: Deset měření momentové charakteristiky řízeného zrychlování



Obrázek 53: Průměr deseti naměřených hodnot momentové charakteristiky řízeného zrychlování





Obrázek 54: Ukázka měření momentové charakteristiky řízeného zrychlování na PowerPanelu



Závěr

Výsledkem této diplomové práce je software pro měření charakteristik krokového motoru pomocí vizualizace z PowerPanelu nebo internetu. Dva krokové motory jsou zatěžovány dvěma stejnosměrnými motory a to vše je řízené přes PLC automat od firmy B&R. Program je koncipován tak, že je možné měřit manuálně nebo automaticky. Měření se provádělo na krokovém motoru 80MPH1.3005014-0, na který působí jako zátěž stejnosměrný motor Doga DO 16841113B04/3059. Během vývoje se zjistilo, že celé zařízení je špatně dimenzováno. Stejnosměrný motor Doga DO 16841113B04/3059 má několikanásobně menší jmenovitý moment, než přídržný moment krokového motoru. Tento fakt je zásadní pro celé měření, jelikož měření je založeno na zvyšování zátěžného momentu až do varování o ztrátě kroku. Aby vývoj programu mohl pokračovat, bylo nutné krokovému motoru omezit výkon. To bylo provedeno proudovým omezením. Jmenovitý proud je omezen na 18% a přídržný proud na 5% jmenovitých hodnot. Po této úpravě je možné měřit charakteristiky krokového motoru. Nese to sebou však velké omezení v rozsahu, ve kterém je možné charakteristiky měřit.

Pro měření statické charakteristiky je zvolen následující postup. Na nabuzený krokový motor začne působit zátěžný moment, který je vytvořen stejnosměrným motorem. Postupným zvyšováním momentu se mění poloha rotoru až do varování o ztrátě kroku. Statická charakteristika je změřena jen v prvním kvadrantu (kladný směr otáčení). V ostatních kvadrantech se virtuální proměnná typu LREAL chovala nahodile a zapisovala nevysvětlitelné hodnoty. Pro měření bylo nutné využít funkční blok MC_BR_CYC, který umožňoval měření polohy rotoru i v klidové poloze motoru. Při změření několika statických charakteristik se zjistilo, že statický moment odpovídá hodnotě 203 mNm na hodnotě natočení rotoru 1,4°. Tento výsledek je však ve sporu s teorií, která říká, že největší statický moment je při natočení rotoru o velikosti kroku. Charakteristika naměřená v diplomové práci je změřena na krokovém motoru, který má velikost kroku 1,8°. Tato chyba byla s největší pravděpodobností způsobena malým rozlišením inkrementálního snímače, který v tomto případě má maximální rozlišení 1024 pulsů/otáčku. Při tomto rozlišení je možné zachytit pootočení rotoru o 0,35°. Je tedy možné změřit pouze pět hodnot, než motor nahlásí varování o ztrátě kroku. Během měření se stávalo, že některé hodnoty natočení nebyly zaznamenány v programu, což znamená, že přivedený zátěžný moment byl tak velký, že program nestihl indikovat změnu polohy rotoru. Pokud by se zvolilo jemnější přičítání zátěžného momentu, tak by měření probíhalo dlouho.

Naopak momentová charakteristika je rozdělena na měření charakteristik start/stop a řízené akcelerace. Při měření charakteristiky start/stop se dá zjistit, s jakým zátěžným momentem je schopen se krokový motor skokově rozeběhnout bez ztráty kroku. Postup tohoto měření je založen na opětovném rozbíhání krokového motoru. Motor se rozeběhne s určitou zátěží a pokud se do 5 vteřin neobjeví varování o ztrátě kroku, tak se motory zastaví a zvýší se zátěž. Tento postup se provádí až do varování



o ztrátě kroku a následně se zapíší hodnoty zátěže a otáček krokového motoru. Změřenou start/stop charakteristiku je možné rozdělit na dvě oblasti. První oblast od 0,05 Hz do 0,64 Hz, kde se charakteristika chová podobně, jak uvádí teorie. Se zvyšující se frekvencí kroku zátěžný moment klesá. Od frekvence kroku 0,64 Hz se charakteristika chovala nahodile. Charakteristika řízení akcelerace je rozdílná v tom, že během měření se motor nezastavuje a zátěž na krokovém motoru se zvyšuje až do varování o ztrátě kroku. Kvůli špatnému dimenzování motoru je charakteristika řízení zrychlování téměř konstantní až na výchylku na frekvenci kroku 0,64 Hz. Tento pokles je k celkovému průměru poměrně zanedbatelný. Jeho hodnota je v rámci desítek mNm. Oba principy měření charakteristik se měří v rozsahu od 0,05 Hz do 1,57 Hz. Na této oblasti frekvencí kroku je změřeno čtyřicet hodnot.

Další částí bylo zobrazovat naměřené výsledky. První myšlenkou byla možnost využití komponenty Trend z nabídky Visual Components z programu Automation studio od firmy B&R. Bohužel při bližším prozkoumání bylo zjištěno, že výše uvedená komponenta není vhodná pro tento projekt a to z důvodu, že je koncipována na hlídání určitého parametru v čase, proto na ose x je vždy hodnota času. Pro zobrazení naměřených výsledků je nutné, aby na ose x byly hodnoty otáček, popřípadě úhlu natočení. Problém byl vyřešen pomocí knihovny Visapi, která umožňuje vykreslování jednoduché grafiky ve vizualizaci v reálném čase. Z uvedené knihovny jsou především využity funkce na vykreslování čar a textů. Tento přístup však obsahoval technický problém v podobě změny souřadného systému, poněvadž komponenty se ve vizualizaci vykreslují v pixelovém souřadném systému, ale naměřené hodnoty jsou reálné. Proto bylo nutné transformovat naměřené hodnoty do souřadného systému v pixelech. K tomu byla využita transformační matice, kde každý bod v homogenním souřadném systému se souřadnicemi x a y byl zapsán do vektorového tvaru a následně vynásoben transformační maticí. Výsledkem násobení je vektor transformovaného bodu v pixelových souřadnicích. Pro ulehčení práce s maticemi slouží v Automatin studiu knihovna MTLinAlg. Knihovna však nefungovala dle představ. Funkce při násobení matic náhodně přepisovala transformační maticí. Po konzultaci s podporou firmy B&R byla zvolena cesta vývoje vlastního algoritmu pro násobení matic, který funguje spolehlivěji než funkce z knihovny MTLinAlg. Pro ovládání přes vzdálený přístup je využita funkce v Automation studia VNC server. Tato funkce umožňuje využít vytvořenou vizualizaci pro PowerPanel. Pro připojení k měření je využít program VNC wiever, který po zadání IP adresy umožňuje ovládat měření přes vzdálený přístup stejně jako na PowerPanelu. Bohužel na této úrovni nelze zajistit ošetření kolizních situací. Automation studio nenabízí informaci o tom, jestli je měření ovládáno přes PowerPanel nebo vzdálený přístup. Tento problém by se musel řešit na úrovni vlastního webového rozhraní s využitím knihovny Web server. Použitím všech těchto částí programu by se mohly vyřešit i kolizní situace a nedocházelo by k nežádoucímu ovládání někoho jiného během měření.



Během měření se zjistilo, že celá úloha je špatně dimenzovaná. Stejnoseměrný motor, který se využívá, jako zátěž krokovému motoru nepostačuje této úloze. Jeho jmenovitý moment je několikanásobně menší než jmenovitý moment vybraného krokového motoru. Náprava by se dala provést dvěma způsoby. První je nákup nového stejnosměrného motoru. Bohužel by bylo nutné nakoupit i nový modul, který by tyto motory řídil. Stávající modul má proudové omezení na 3 A, a s tímto proudovým omezením je v nabídce jen již zakoupený stejnosměrný motor Doga DO 16841113B04/3059. Další možností je zakoupení nových krokových motorů, které mají podobné vlastnosti jako stejnosměrný motor Doga DO 16841113B04/3059. Při výběru krokového motoru by se muselo brát v úvahu několik věcí. Je důležité vzít ohled na výstupní napěťové omezení modulů X20SM1436, které jsou od 24 do 39 VDC. Současné zařízení je celé napájeno 24 VDC, proto by bylo nejlepší najít krokový motor, který je možné napájet 24 VDC. Stejnoseměrný motor Doga DO 16841113B04/3059 má svůj nominální moment 0,75 Nm, je podstatné, aby případný nový krokový motor měl svůj přídržný moment menší než 0,75 Nm. Při výběru by se měla také zohlednit možnost pro to, aby krokový motor měl zabudovaný inkrementální snímač. V současné době krokový motor 80MPH1.3005014-0 má inkrementální snímač s rozlišením 1024 pulsu/otáčku. Pro měření statické charakteristiky by bylo vhodné minimální rozlišení 2048 pulsu/otáčku.

Celé zařízení bylo vyvíjeno jako vzdálená laboratorní úloha v rámci projektu Evropské unie na podporu vzdělání a konkurenceschopnosti. Studentovi je umožněno seznámit se s problematikou a vlastnostmi krokových motorů jak ve škole měřením přes PowerPanel, tak následně přes vzdálený přístup, kde je možné úlohu ovládat přes internet. Všechny charakteristiky je možné změřit automaticky nebo manuálně. Student tedy není omezen rozvrhem učebny, kde měření standardně probíhá. Jelikož měření charakteristik probíhá vždy od počátečních hodnot, jedná se tak o časově náročné měření. Z tohoto důvodu by bylo vhodné celý program optimalizovat pomocí postupného nastavování počátečních hodnot podle zvolených počátečních otáček při měření a tím se zkrátí i časová náročnost měření. Měření probíhá na dvou stejných krokových motorech. Pro laboratorní úlohu by bylo zajímavé, kdyby bylo možné změřit charakteristiky na dvou rozdílných krokových motorech a jejich naměřené charakteristiky porovnat.

I když tato práce je tvořena jako laboratorní úloha pro předměty zabývající se elektrickými pohony, je možné výsledky této diplomové práce implementovat i v průmyslu. Díky vyvinutému algoritmu pro měření charakteristik krokových motorů je možné ověřit vlastnosti a charakteristiky vybraných krokových motorů mimo cílový průmyslový stroj. Není tak omezena celá výroba. V současné době je možné na zařízení provádět měření krokových motorů s přídržným momentem do 0,75 Nm. Software je vyvinut univerzálně. Při změně krokového motoru by bylo zapotřebí pouze nastavit v Automation studiu limitní hodnoty daného krokového motoru, aby při měření nedošlo k jeho



poškození. Při použití jiného rozlišení inkrementálního snímače by se musely změnit hodnoty transformačních konstant, které převádí virtuální proměnná v Automation studiu na reálné hodnoty. Tento zásah se provede přepsáním jedné z proměnných v záložce „transfer“.



Bibliografie

- [1] P. . Rydlo, „KROKOVÉ MOTORY A JEJICH ŘÍZENÍ: Studijní texty,“ *KROKOVÉ MOTORY A JEJICH ŘÍZENÍ*, č. 1, 2000.
- [2] J. . Formánek, „Tvorba grafické vizualizace principu krokového motoru a jeho řízení“.
- [3] M. . Semrád, „Řízení krokového motoru,“ Brno, 2012.
- [4] „Krokové motory,“ [Online]. Available: <http://www.kves.utc.sk/kvesnew/dokumenty/ŠES/Krokové%20motory/Krokove%20motory.pdf>. [Přístup získán 2015-10-18].
- [5] F. Friedl, „Bakalářská práce,“ 2008. [Online]. Available: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6878/friedl_2008_bp.pdf?sequence=1. [Přístup získán 13 2016].
- [6] P. Novák, *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení.*, Praha: Ben -technické literatury, 2005.
- [7] „br-automation,“ [Online]. Available: <http://www.br-automation.com/cs/produkty/motion-control/stepper-motors-80mp/stepper-motors-with-incremental-encoder-ip20/80mph1300s014-01/#techdata>. [Přístup získán 23 únor 2016].
- [8] U. M. Stepper Motors, „br-automation,“ 7 2011. [Online]. Available: http://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP4440000000000000156378/MASMOT-ENG.pdf. [Přístup získán 13 2016].
- [9] „Conrad,“ [Online]. Available: <http://www.conrad.com/ce/en/product/198539/DOGA-DO16841113B043059-24V-DC-Motor-1000RPM-075NM>. [Přístup získán 23 únor 2016].
- [10] B&R, [Online]. Available: <http://kyb.fei.tuke.sk/laben/prezentacie/br%20automation%20studio%20target%20for%20simulink.pdf>. [Přístup získán 6 3 2016].
- [11] J. Pelikán, „CGG MFF UK Praha,“ [Online]. Available: <http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/lectures/pdf/pg1-21-transformation.pdf>. [Přístup získán 6 3 2016].



- [12] P. Surynková, „Přednáška - Počítačová geometrie,“ [Online]. Available: http://surynkova.info/dokumenty/mff/PG/Prednasky/prednaska_4.pdf. [Přístup získán 11 3 2016].
- [13] Nová media, „Matematika,“ 2006-2016. [Online]. Available: <http://www.matematika.cz/matice>. [Přístup získán 7 3 2016].
- [14] I. R. Hestic, „Příklady.eu,“ [Online]. Available: <http://www.priklady.eu/cs/Matematika/Matice.alej>. [Přístup získán 7 3 2016].
- [15] „Automation Net PVI,“ B&R, [Online]. Available: <file:///C:/Users/Michal%20Filip/Downloads/TM700TRE.00-ENG.pdf>. [Přístup získán 23 4 2016].
- [16] Z. Pliva, J. Drábková, J. Koprnický a L. Petržilka, Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací, Liberec: TUL, 2014.
- [17] „Jacob computer,“ [Online]. Available: <https://www.jacob-computer.de/Bauelemente/DOGA-DC-Motor-DO16841113B04-3059-DO-168.4111.3B.04-3059-artnr-2627410.html>. [Přístup získán 1 3 2016].
- [18] Sugawara a Akira, Stepping motors and their microprocessor control, Oxford, 1994.
- [19] M. Krechler, „<https://www.vutbr.cz>,“ Bakalářská práce, [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18426. [Přístup získán 6 3 2013].
- [20] I. R. Hestic, „Příklady.eu,“ [Online]. Available: <http://www.priklady.eu/cs/Matematika/Matice.alej>. [Přístup získán 7 3 2016].
- [21] „Matematika.cz,“ [Online]. Available: <http://www.matematika.cz/prumer>. [Přístup získán 29 29 2016].
- [22] V. Ř. S. PRO, „BAKALÁŘSKÁ PRÁCE,“ [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30010. [Přístup získán 4 23 2016].



Příloha A

Návod na měření charakteristik krokového motoru pomocí PowerPanelu a vzdáleného přístupu



Postup měření je možné využít jak při ovládní měření na PowerPanelu tak i přes PC pomocí vzdáleného přístupu. Postup připojení pomocí vzdáleného přístupu je popsán níže v návodu.

Poznámka: Tlačítka s fotkou nereagují na přímý stisk na fotku, je nutné tlačítka stisknout mimo fotku.

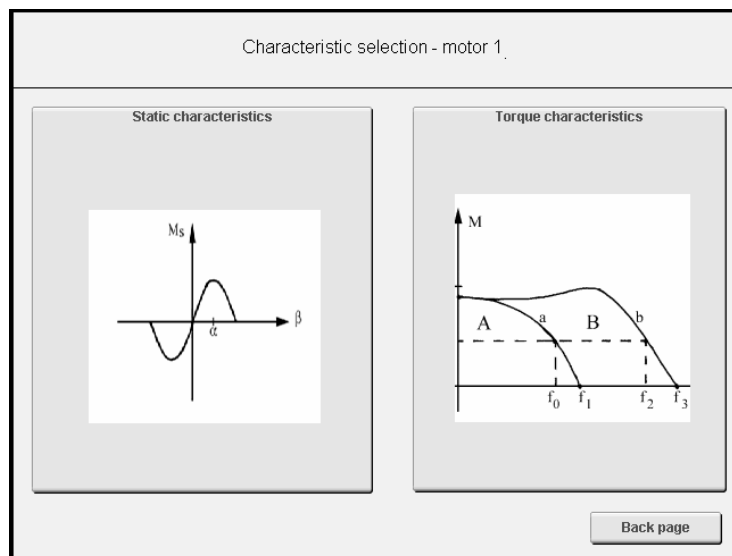
1) Výběr motoru

Program začíná úvodní obrazovkou, kde je třeba vybrat na jakém motoru se budou měřit charakteristiky



2) Výběr charakteristiky

Po výběru motoru je třeba vybrat jaká charakteristika se bude měřit. (statická nebo momentová)

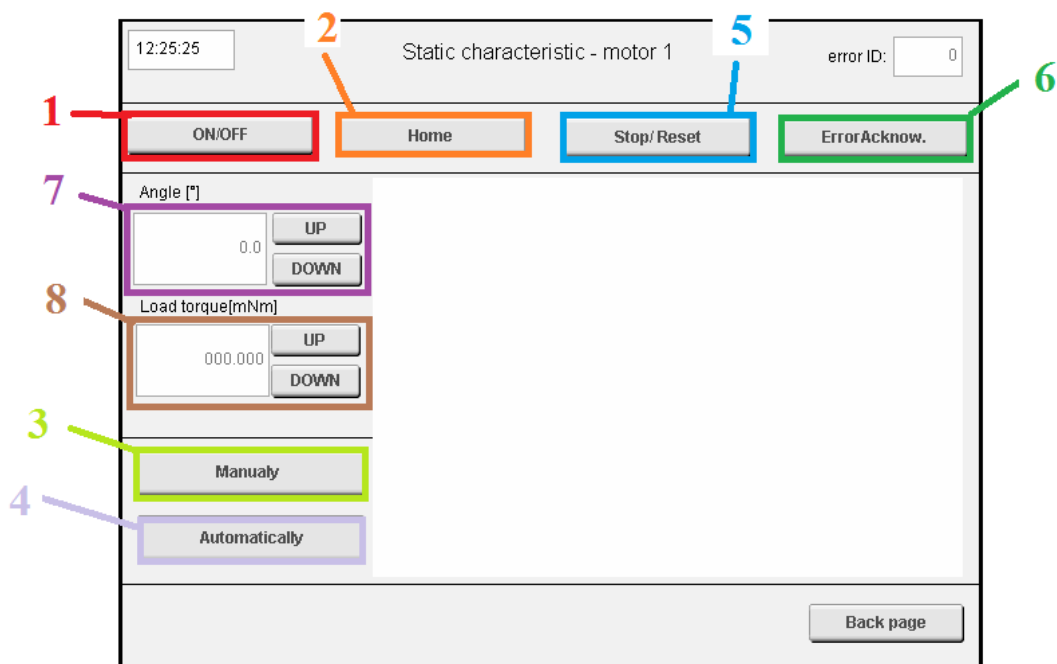


Statická charakteristika

Pokud je vybráno měření statické charakteristiky je postup měření následující:

- 1) Zapnout napájení
- 2) Nastavení výchozí polohy
- 3) Volba měření (manuálně (3), automaticky (4))

Při volbě automatického měření se celá operace provede sama a vykreslí se graf.

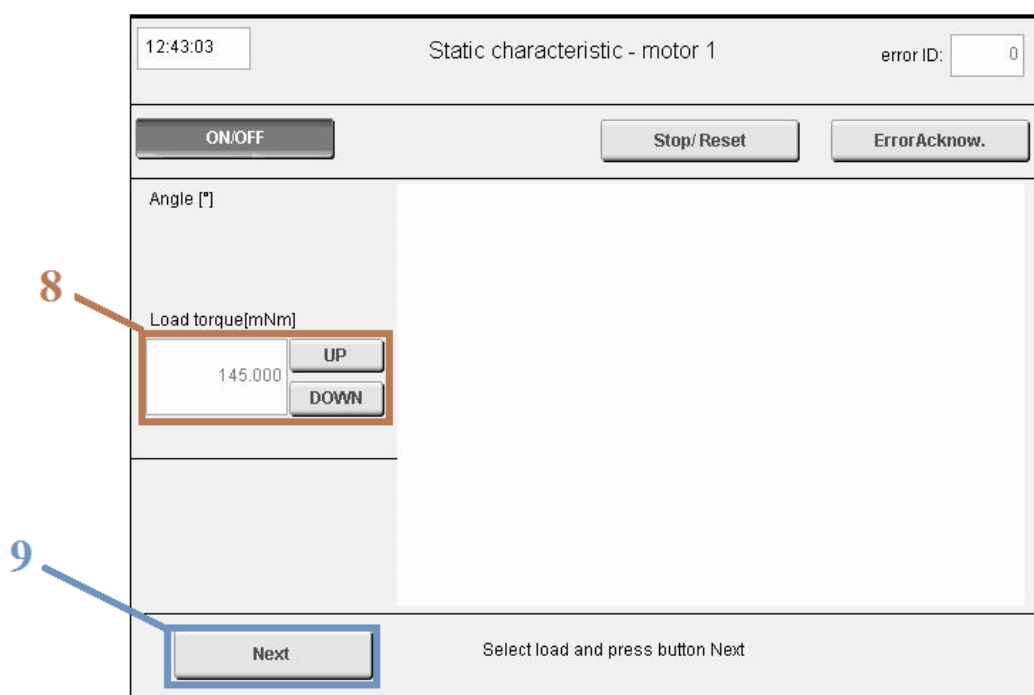


Manuální měření

Při volbě manuálního řízení je postup měření následující:

- 1) Výběr zátěžného momentu (8), buď pomocí tlačítek, nebo přímým zadáním momentu
- 2) Potvrzení tlačítkem „Next“ výběru zátěžného momentu (9)

Celý cyklus zadávání zátěžného momentu se opakuje až do varování o ztrátě kroku, kdy měření končí a vykreslí se graf s naměřenými hodnotami.



Poznámka:

Zastavení motoru během měření je možné pomocí tlačítka „Stop/Reset“(5). Pokud jakékoli tlačítko nereaguje na stisknutí, stačí stisknout tlačítko „Stop/Reset“(5). Potvrzení chyby je možné potvrdit tlačítkem „ErrorAcknow“(6).

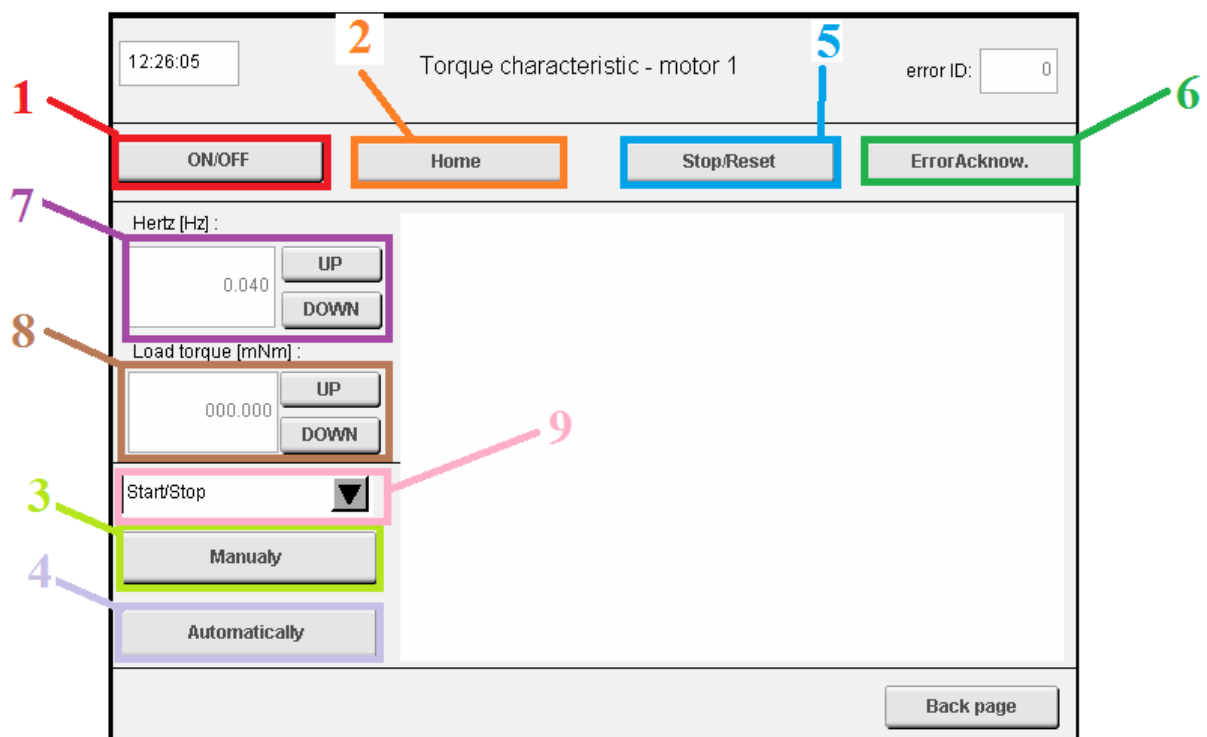


Momentová charakteristika

Pokud je vybráno měření momentové charakteristiky postup měření je následující:

- 1) Zapnout napájení
- 2) Nastavení výchozí polohy
- 3) Výběr momentové charakteristiky (start/stop, řízeného zrychlování) (9)
- 4) Volba měření (manuálně (3), automaticky (4))

Při volbě automatického měření se celá operace provede sama a vykreslí se graf.

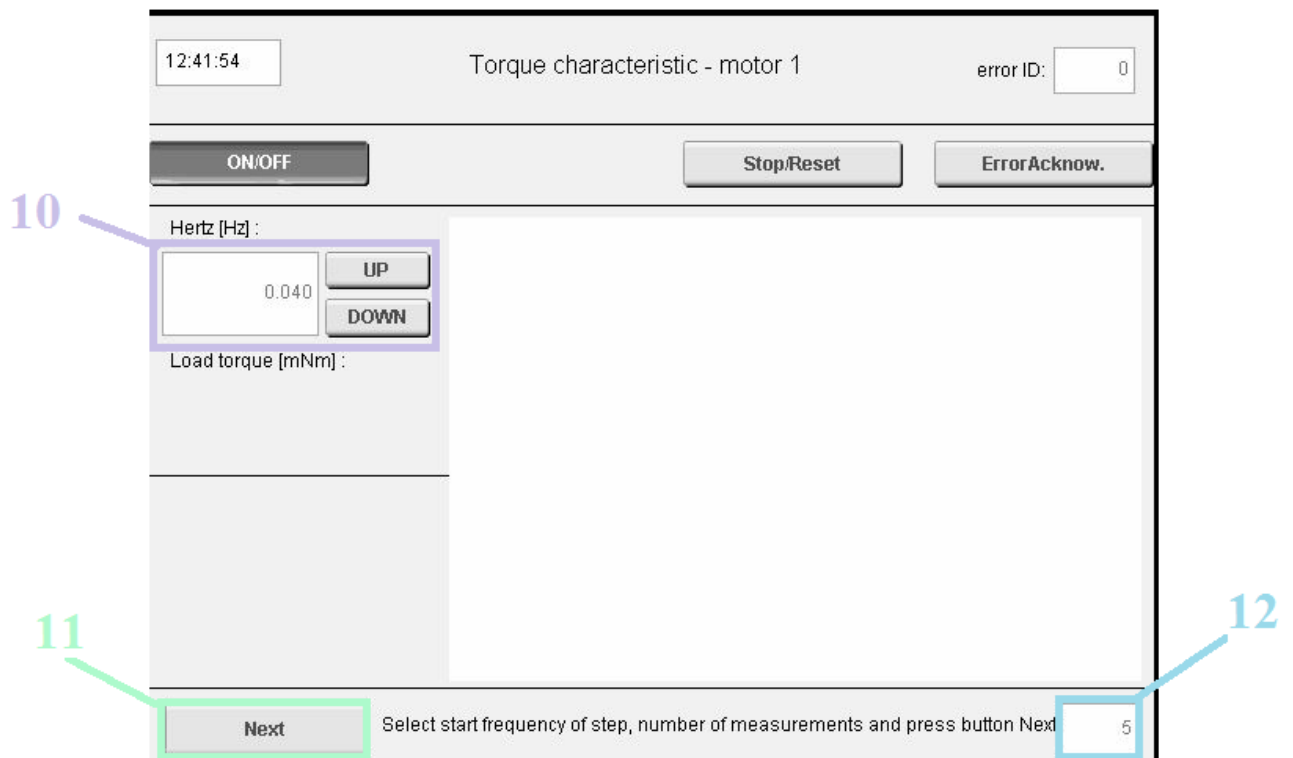


Manuální měření

Po volbě manuálního řízení je postup měření následující:

- 1) Nastavení počtu měření (12)
- 2) Nastavení výchozí frekvence kroku (10)
- 3) Potvrzení tlačítkem „Next“ výběru zátěžného momentu (11)

Celý cyklus zadávání zátěžného momentu se opakuje při každé ztrátě kroku až do nastaveného počtu měření. Následně se vykreslí graf s naměřenými hodnotami.



Poznámka:

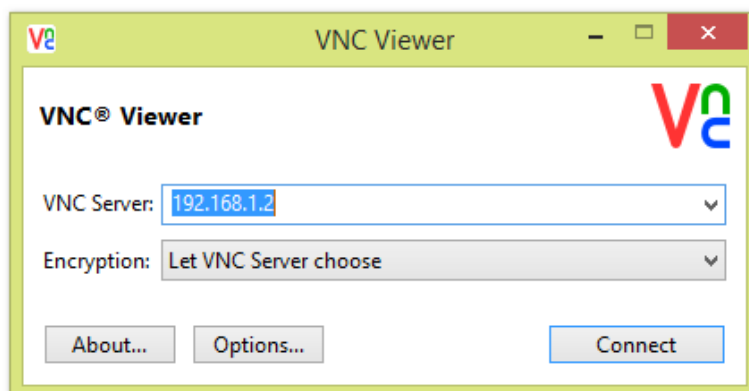
Zastavení motoru během měření je možné pomocí tlačítka „Stop/Reset“(5). Pokud jakékoli tlačítko nereaguje na stisknutí, stačí stisknout tlačítko „Stop/Reset“(5). Potvrzení chyby je možné potvrdit tlačítkem „ErrorAcknow“(6).



Postup při nastavení vzdáleného přístupu

Pro připojení přes vzdálený přístup je využit program VNC-viewer. Je nutné mít připojení mezi PC a PLC pomocí ethernetového kabelu.

- 1) Kontrola propojení mezi PLC a PC
- 2) Spustit program VNC-viewer
- 3) Do řádku s názvem VNC Server zadat IP adresu **192.168.1.2**
- 4) Stisknout tlačítko „Connect“
- 5) Potvrzení připojení v dalším okně



Příloha B - Přiložené CD

Obsah přiloženého CD:

- Text diplomové práce
 - Diplomova_prace_2016_Michal_Filip.pdf
 - Diplomova_prace_2016_Michal_Filip.docx

- Naměřené hodnoty charakteristik krokového motorů 80MPH1.3005014-01
 - Naměřená_data.xlsx

- Řídící a vizualizační program pro měření charakteristik krokových motorů
 - Stepper_motors.zip
(*Program je psán v Automation studiu 4.2.3.159 ve strukturovaném textu*)
 - VNC-Viewer-5.3.1-Windows-64bit.exe

