VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Radim Běloušek
AUTHOR

BRNO 2009

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

PARAMETERS IDENTIFICATION OF THE ASYNCHRONOUS MACHINE SUBSTITUTING CIRCUIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Radim Běloušek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka
SUPERVISOR

BRNO, 2009

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Běloušek Radim ***ID:*** 98235
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prověřte možnosti identifikace náhradního zapojení asynchronního motoru ve tvaru gama-článku měřením naprázdno/nakrátko a měřením ve dvou bodech blízkých jmenovitému pracovnímu bodu.
2. Pokuste se určit parametry náhradního zapojení asynchronního motoru výpočtem, pouze z konstrukčních a geometrických údajů stroje.
3. Analyzujte možnosti měření momentové charakteristiky asynchronního motoru dynamickou metodou, tj. při rozběhu s přídavným setrvačníkem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 01.10.2008 ***Termín odevzdání:*** 29.05.2009

Vedoucí projektu: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Radim Běloušek

Bytem: Moutnice 217, 664 55 Moutnice

Narozen/a (datum a místo): 24.9.1986 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - ☐ disertační práce
   - ☐ diplomová práce
   - ☒ bakalářská práce
   - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako ....

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: ....

Vedoucí/ školitel VŠKP: ....

Ústav: ....

Datum obhajoby VŠKP: ....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

---

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu se zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - □ ihned po uzavření této smlouvy
   - □ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - □ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - □ 5 let po uzavření této smlouvy
   - □ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …………………………………….

……………………………………….. ……………………………………………

Nabyvatel Autor

Abstrakt

Matematický model i náhradní zapojení asynchronního motoru obsahují několik parametrů, které je nutno, z hlediska řízení pro daný stroj, určit s maximální přesností. Práce je zaměřena na identifikaci parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku. Práce je rozdělena do několika hlavních celků. V prvním z nich jsou popsány a ukázány metody identifikace asynchronního motoru na konkrétním stroji. V další části práce je provedeno měření momentových charakteristik dvojím způsobem, a to klasicky pomocí dynamometru a dynamicky pomocí setrvačníků. V závěru práce je provedeno porovnání a vyhodnocení naměřené a vypočtené momentové charakteristiky asynchronního motoru.

Abstract

Mathematical model and substituting circuit both include several parameters, which is important to determine for a control. This work is target on identification of parameters of substitute circuit of the asynchronous machine in Γ-network form. The work is divided into several main units. In the first of them are shown the methods of identification of asynchronous machine on the selected machine. The measuring of torque characteristic by classical way with dynamometer and by dynamically with fly-wheels is shown in the next part of this work. The final part of this work is devoted to interpretation and comparison of achieved results.

Klíčová slova

Identifikace; parametr; náhradní zapojení; asynchronní motor; Γ-článek; měření naprázdno; měření nakrátko; moment; momentová charakteristika; skinefekt; oteplení; dynamické měření; setrvačník.

Keywords

Identification; parameter; substitute circuit; asynchronous machine; Γ-network; no-load test; short-circuit test; torque; torque characteristic; skin effect; temperature rise; dynamical measuring; fly-wheel.

Bibliografická citace

Bibliografická citace – příklad: Nováček, P. Počítačová grafika v silnoproudé elektrotechnice, Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 58 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .... Podpis autora ....

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .... Podpis autora ....

OBSAH

1 ÚVOD **15**

2 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU VE TVARU Γ-ČLÁNKU **16**

2.1 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU **17**

2.1.1 IDENTIFIKACE Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO 18

2.1.2 PŘESNÁ IDENTIFIKACE NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ 21

2.1.3 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MOTORU AOM090L02-016 22

3 VÝPOČET MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO MOTORU **26**

3.1 VLIV ZMĚNY ODPORU VINUTÍ STATORU NA MOMENT MOTORU **30**

3.2 VLIV SKINEFEKTU V TYČÍCH ROTORU NA MOMENT MOTORU **33**

4 MĚŘENÍ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY POMOCÍ SETRVAČNÍKU **38**

5 POROVNÁNÍ VYPOČÍTANÉ A NAMĚŘENÉ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY MOTORU **42**

6 ZÁVĚR **44**

LITERATURA **45**

PŘÍLOHA 1 .... **46**

PŘÍLOHA 2 .... **47**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.2.1. Přechod od náhradního zapojení v podobě T-článku k Γ-článku, převzato z [1]. 16

Obr.2.2. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku. a) Pro ideální bezeztrátový stroj. b) Včetně ztrát v mědi a železe. 17

Obr.2.3. Měření asynchronního motoru ve dvou pracovních bodech **A**, **B**. a) stav naprázdno, nakrátko. b) v blízkosti jmenovitého bodu N. 18

Obr.2.4. Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu naprázdno. 18

Obr.2.5. Rozdělení mechanických ztrát a v železe asynchronního motoru ve stavu naprázdno. 19

Obr.2.6. Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu nakrátko. 20

Obr.2.7. Vstupní impedance náhradního zapojení a) musí být stejná jako změřená b), převzato z [3] 21

Obr.2.8. Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718 23

Obr.2.9. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku. 24

Obr.3.1. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku pro výpočet momentové charakteristiky 26

Obr.3.2. Momentová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016 29

Obr.3.3. Závislost oteplení na čase 31

Obr.3.4. Závislost odporu vinutí statoru na čase 32

Obr.3.5. Závislost momentové charakteristiky na odporu vinutí statoru asynchronního motoru AOM090L02-016 32

Obr.3.6. Znázornění rozptylového toku rotorové tyče uložené v drážce obdélníkového typu 33

Obr.3.7. a) Rozměry a tvar drážky asynchronního motoru AOM090L02-016. b) Rozměry a tvar drážky pro výpočet skinefektu v tyčích rotoru motoru AOM090L02-016. 34

Obr.3.8. Závislost momentové charakteristiky na odporu vinutí rotoru asynchronního motoru AOM090L02-016 s uvažování skinefektu 37

Obr.4.1. Zapojení měřicího pracoviště pro měření momentových charakteristik pomocí setrvačníků, převzato z [4]. 38

Obr.4.2. Výstupní signál *y* z čidla otáček a upravený signál z, převzato z [4]. 39

Obr.4.3. Signál z(k). Zobrazení signálu u(k) dle rovnice (4.2), převzato z [4]. 40

Obr.4.4. Graf závislosti momentu asynchronního motoru AOM090L02-016 na skluzu. ... 41

Obr.5.1. Momentové charakteristiky asynchronního motoru AOM090L02-016 42

Obr.P2-1.1. Graf závislosti proudu na napětí při měření naprázdno. 48

Obr.P2-1.2. Graf závislosti příkonu na napětí při měření naprázdno. 48

Obr.P2-2.1. Graf závislosti proudu na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.). 50

Obr.P2-2.2. Graf příkonu na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.). 50

Obr.P2-2.3. Graf závislosti účinnosti na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.). 51

Obr.P2-3.1. Graf závislosti proudu na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.). 53

Obr.P2-3.2. Graf závislosti výkonu na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.). 53

Obr.P2-3.3. Graf závislosti účinnosti na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.). 54

Obr.P2-4.1. Graf závislosti proudu na napětí při zkoušce nakrátko. 55

Obr.P2-4.2. Graf závislosti příkonu na napětí při měření nakrátko. 56

Obr.P2-4.3. Graf závislosti momentu na napětí při měření nakrátko. 56

Obr.P2-5.1. Momentová charakteristika. 57

Obr.P2-6.1. Graf závislosti odporu na čase 59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1. Parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle kombinace měření A, B v lineární části momentové charakteristiky 25

Tabulka 2.2. Přehled výsledků identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718 ve tvaru Γ-článku dle obr. 2.7. 25

Tabulka 3.1 Hodnoty oteplení a odporu vinutí statoru 31

Tabulka 3.2 Rozměry drážky dle obr.3.7.b) 35

Tabulka 3.3 Hodnoty získané výpočtem dle rovnic (3.25) až (3.28) 36

Tabulka P2.-1. Hodnoty z měření naprázdno 47

Tabulka P2.-2. Hodnoty z měření při zatížení (U_1 = konst.) 49

Tabulka P2.-3. Hodnoty z měření při zatížení (M = konst.) 52

Tabulka P2.-4. Hodnoty z měření při zkoušce nakrátko 55

Tabulka P2.-5. Hodnoty z měření při měření momentové charakteristiky 57

Tabulka P2.-6. Hodnoty z měření při zkoušce oteplení (M = 7,4Nm, U = 400V) 58

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I_0	proud naprázdno	A
I_K	proud nakrátko	A
I_{Fe}	činná složka proudu naprázdno	A
I_μ, $I_{ný}$	magnetizační proud	A
I_2	rotorový proud	A
$I_2^{/}$	proud rotoru přepočtený na stator	A
J	moment setrvačnosti	kgm^2
L_1	hlavní (magnetizační indukčnost)	H
L_2	indukčnost rotoru	H
L_A, L_B	indukčnosti vstupní impedance změřené, vypočtené	H
M	moment motoru	Nm
M_n	jmenovitý moment motoru	Nm
M_m	moment zvratu	Nm
M_k	moment nakrátko	Nm
M_z	záběrový moment	Nm
$P_č$	činný příkon motoru	W
P_{p0}, P_{p1}, P_{pk}	příkon motoru ve stavu naprázdno, při zatížení, nakrátko	W
P_{Fe}	ztráty v železe	W
P_{mech}	mechanické ztráty	W
P_δ	výkon motoru ve vzduchové mezeře	W
R	odpor rotoru	Ω
$R^{/}$, $R_2^{/}$	odpor rotoru přepočtený na stator	Ω
R_1	odpor vinutí statoru	Ω
R_A, R_B	odpory vstupní impedance změřené, vypočtené	Ω
R_{Fe}	odpor respektující ztráty v železe	Ω
$R_{1,\upsilon}$	odpor vinutí statoru po oteplení	Ω
R_{skin}	odpor rotoru s uvažováním skinefektu	Ω
U	napájecí napětí	V
U_1, U_{L1}	napětí na příčné větvi	V

U_0	napětí ve stavu naprázdno	V
U_K	napětí ve stavu nakrátko	V
X_{1L}	rozptylová reaktance statoru	Ω
X_{2L}	rozptylová reaktance rotoru	Ω
$X_{2L}^{/}$	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator	Ω
X_y	magnetizační reaktance	Ω
Z_{vst}	vstupní impedance	Ω
$Z_{vst,A}$, $Z_{vst,B}$	vstupní impedance změřená, vypočtená	Ω
a	hloubka vniku	mm
b	šířka drážky rotoru	mm
b_v	rozměr vodiče rotoru	mm
f_1	frekvence statoru	Hz
f_2	frekvence rotoru	Hz
h	výška vodiče	mm
n	otáčky rotoru	min^{-1}
n_s	synchronní otáčky	min^{-1}
p, p_p	počet pólpárů	-
s	skluz	-
s_m	skluz zvratu	-
ΔP_{j1}	ztráty ve vinutí statoru	W
$\Delta\upsilon$	oteplení	K
$\cos\varphi$	účiník	-
γ	měrná vodivost materiálu	S/m
η	účinnost	%
μ_0	permeabilita vakua	H/m
ξ	redukovaná výška vodiče	mm
$\varphi(\xi)$	poměr odporů	-
ω	úhlový kmitočet statorového napětí a proudu	Hz
υ_1	počáteční teplota	°C
υ_2	konečná teplota	°C

1 ÚVOD

Asynchronní motory jsou ze všech elektromotorů nejpoužívanější. Je to dáno jejich jednoduchou konstrukcí, hlavně absencí sběracího ústrojí, s výjimkou kroužkových asynchronních motorů, nízkými náklady na výrobu, spolehlivostí provozu a minimálními nároky na údržbu.

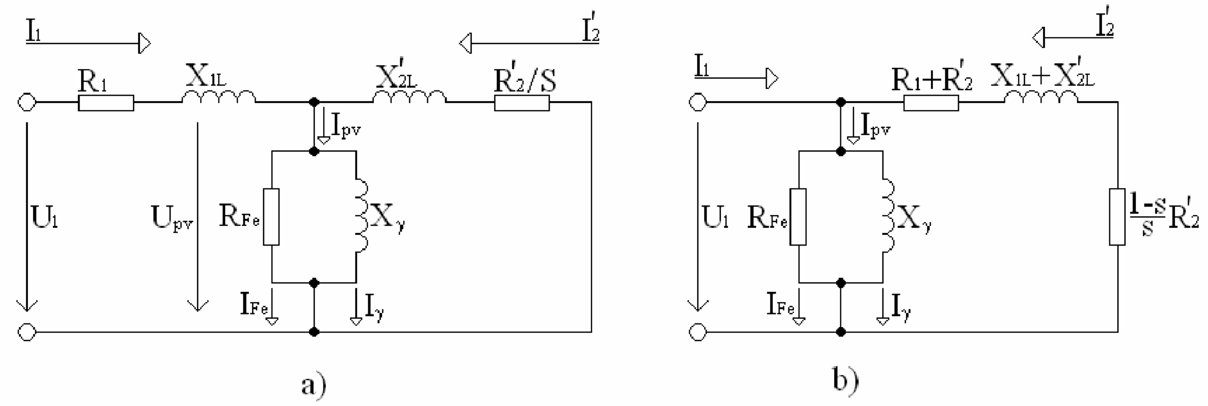
Z hlediska regulace jsou asynchronní motory nejrozšířenějším typem neregulovaných pohonů. Připojují se k síti běžnými spínacími a jistícími přístroji. V případě potřeby řízení je nutno využít pro danou aplikaci výkonové elektroniky.

Matematický model i náhradní zapojení asynchronního motoru obsahují několik parametrů, které je nutno, z hlediska řízení pro daný stroj, určit s maximální přesností. Práce je zaměřena na identifikaci parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku.

2 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU VE TVARU Γ-ČLÁNKU

Náhradní zapojení asynchronního motoru je analogické s náhradním zapojením transformátoru. V klasické literatuře, např. viz [1], je náhradní zapojení znázorňováno v podobě T-článku.

Odvození momentové charakteristiky pomocí náhradního zapojení v podobě T-článku, který se používá v elektrotechnice více než sto let, je příliš složité. Ve výpočtu momentové charakteristiky se vyskytují složité algebraické výrazy. Běžně se tedy postupuje tak, že T-článek bývá nahrazen na Γ-článkem. Toto nahrazení je ovšem nepřesné, jedná se neekvivalentní obvodovou úpravu, viz např. [1], odkud je úmyslně převzat obr.2.1.



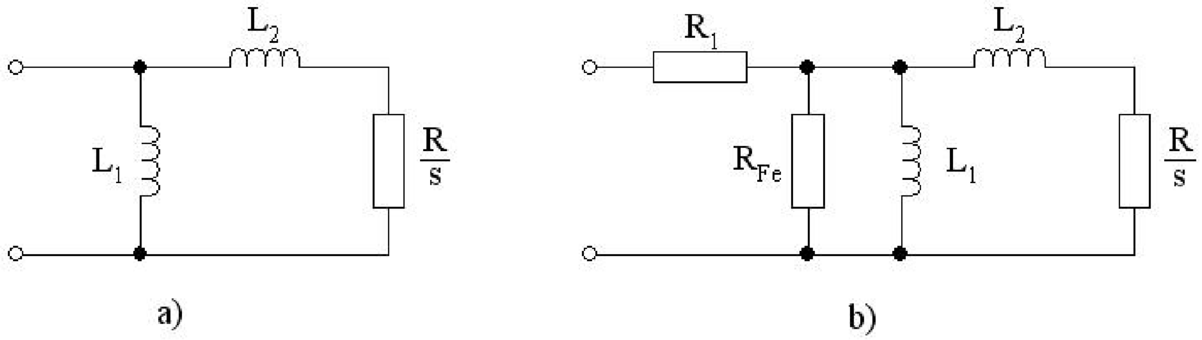
Obr.2.1. Přechod od náhradního zapojení v podobě T-článku k Γ-článku, převzato z [1].

Abychom mohli přepočítat sekundární impedance na primární stranu, viz obr.2.1. musí být znám převod separovaného transformátoru (transformátor, ze kterého jsou myšlenkovitě separovány rozptylové indukčnosti mimo transformátor). Tento se ovšem liší od převodu původního transformátoru Postup v literatuře je ovšem takový, že tento neznámý převod je nahrazen převodem původního transformátoru, viz [1].

Ve [2] je dokázáno, že každý pasivní přenosový dvojbran, tedy i původní transformátor, musí mít tři stupně volnosti. Nově vzniklý separovaný transformátor musí mít také tři stupně volnosti. Obsahuje však čtyři neznámé veličiny, což je v přímém rozporu s počtem stupňů volnosti. Je tedy nutné jednu z veličin zvolit a zbylé dopočítat. Existence dvou rozptylových indukčnosti je tedy chybná, náhradní zapojení vystačí s jedinou rozptylovou indukčností, viz lit. [2].

Matematický postup přesného přepočtu T-článku na Γ-článek je ukázán v literatuře [2]. Je zde také doložena a vysvětlena nevýhodnost náhradního zapojení asynchronního motoru v podobě T-článku.

Náhradní zapojení ve tvaru Γ-článku je plnohodnotné a přesné zatímco náhradní zapojení ve tvaru T-článku je zbytečně složité, viz lit. [2].



Obr.2.2. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku. a) Pro ideální bezeztrátový stroj. b) Včetně ztrát v mědi a železe.

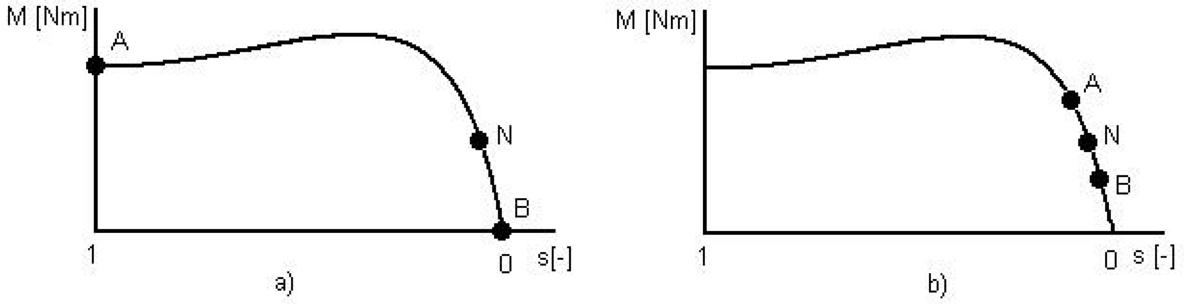
Výhodou náhradního zapojení ve tvaru Γ-článku oproti klasickému T-článku je snížení počtu hledaných neznámých parametrů o jedničku, chybí statorová rozptylová indukčnost. Obecnost tohoto náhradního zapojení tím ovšem nijak netrpí, jak je ukázáno v lit. [2].

2.1 Identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru

Jak již bylo zmíněno, identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru není jednoduchá, vzhledem ke konstrukci strojů. Na rozdíl od transformátoru má asynchronní motor na rotoru klecové vinutí, které nelze rozpojit a změřit. Absence měření ze strany rotoru musí být nahrazena měřením ve dvou různých pracovních bodech A, B dle obr.2.3. Pro identifikaci parametrů náhradního zapojení se využívá dvou následujících postupů:

- Přibližná identifikace, měření ve dvou pracovních bodech A (stav naprázdno), B (stav nakrátko) vzdálených od jmenovitého bodu N, viz obr.2.3.a). Jedná se identifikaci matematicky jednoduchou.
- Přesná identifikace, měření ve dvou pracovních bodech A, B z blízkého okolí jmenovitého bodu N, viz obr.2.3.b). Jedná se o identifikaci matematicky velmi obtížnou.

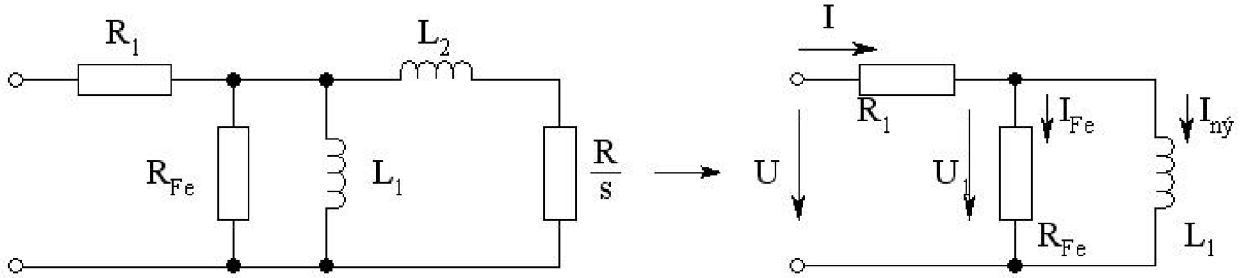
Identifikace parametrů náhradního zapojení je tedy složitý proces. Cílem identifikace je určení všech parametrů popisujících náhradní zapojení asynchronního motoru, tj. určení R_1 (odpor vinutí statoru), L_1 (hlavní indukčnost), R_{Fe} (odpor respektující ztráty v železe), L_2 (rozptylová indukčnost), R (odpor rotoru). K identifikaci je nutné využít jak znalostí teorie, konstrukce asynchronních motorů tak i experimentálních měření.



Obr.2.3. Měření asynchronního motoru ve dvou pracovních bodech **A**, **B**. a) stav naprázdno, nakrátko. b) v blízkosti jmenovitého bodu N.

2.1.1 Identifikace z měření naprázdno a nakrátko

Jak již bylo zmíněno, je identifikace z měření naprázdno a nakrátko pouze přibližná metoda určení hledaných parametrů R_1, L_1, R_{Fe}, L_2, R. Důvodem je úmyslné zjednodušení náhradního schématu dle obr.2.2.b) do tvaru na obr.2.4 (měření naprázdno, $s \to 0$, $R/s \to \infty$) respektive do tvaru na obr.2.7 (měření nakrátko, $s = 1$, $R/s = R$). Výhodou této metody je ovšem její jednoduchost, neboť k měření není potřeba použít dynamometru.

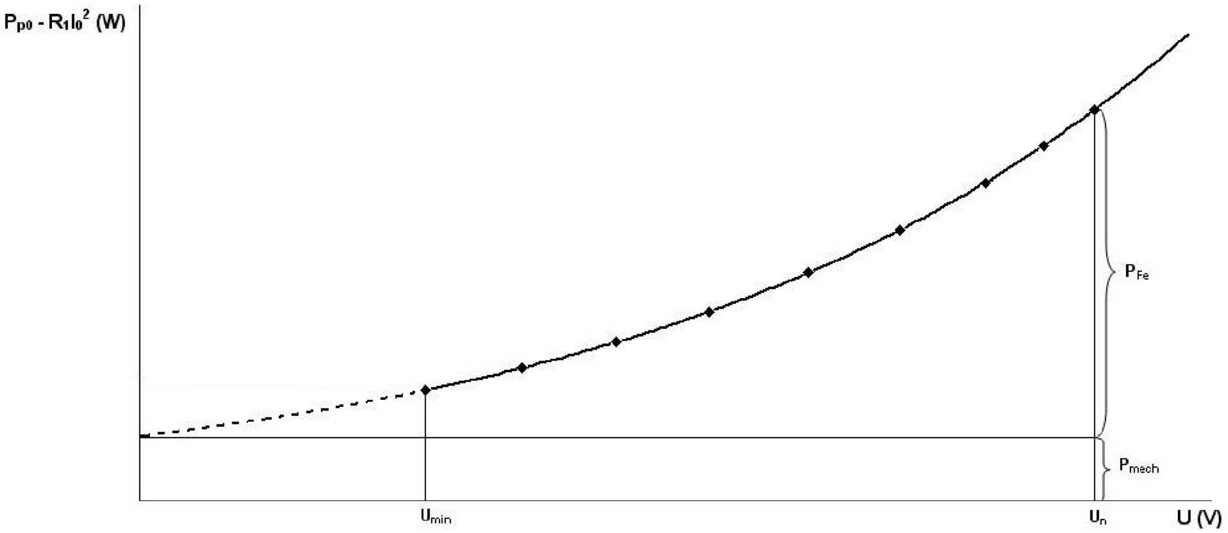


Obr.2.4. Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu naprázdno.

Při měření ve stavu naprázdno zaznamenáváme fázové napětí U, fázové proudy I a fázové činné příkony $P_č$ v každé fázi. Celkový činný příkon je dán vztahem

$$P_č = R_1 I^2 + P_{Fe} + P_{mech} . \quad (2.1)$$

Složku R_1I^2 určíme jednoduše, neboť odpor R_1 se změří Ω-metrem. Mechanické ztráty P_{mech} (ztráty ventilační a tření v ložiskách) určíme dle obr. 2.5.



Obr.2.5. Rozdělení mechanických ztrát a v železe asynchronního motoru ve stavu naprázdno.

Postup určení mechanických ztrát P_{mech}, viz obr.2.5.:

- Asynchronní motor se rozeběhne jmenovitým napájecím napětí U_n.
- Při měření postupně snižujeme napětí a měříme celkový činný příkon $P_č$.
- Na vodorovnou osu zaznamenáváme napětí U, na svislou osu zaznamenáváme ($P_č - R_1I^2$).
- Při snížení napětí pod hranici U_{min} klesne vnitřní moment motoru a motor se zastaví.
- Křivka pod hodnotou U_{min} se nedá změřit, je nutné provést extrapolaci do nuly (čárkovaná část křivky). Při nízkých hodnotách vstupního napětí roste skluz. V grafu na obr.2.5 je tato část vyznačena čárkovaně.
- V místě protnutí extrapolované části křivky s svislou osou jsou hledané mechanické ztráty, neboť podle rovnice (2.1) jsou hodnoty na svislé ose ($P_č - R_1I^2$) rovny součtu (P_{Fe}+P_{mech}).

Ztráty v železe určíme dle rovnice

$$P_{Fe} = P_č - R_1 \cdot I^2 - P_{mech} . \quad (2.2)$$

Dle obr. 2.4. platí

$$U_1 = U - R_1 I . \quad (2.3)$$

Využitím vztahů (2.2) a (2.3) určíme hodnotu parametru R_{Fe} (odpor respektující ztráty v železe)

$$R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_{Fe}}. \tag{2.4}$$

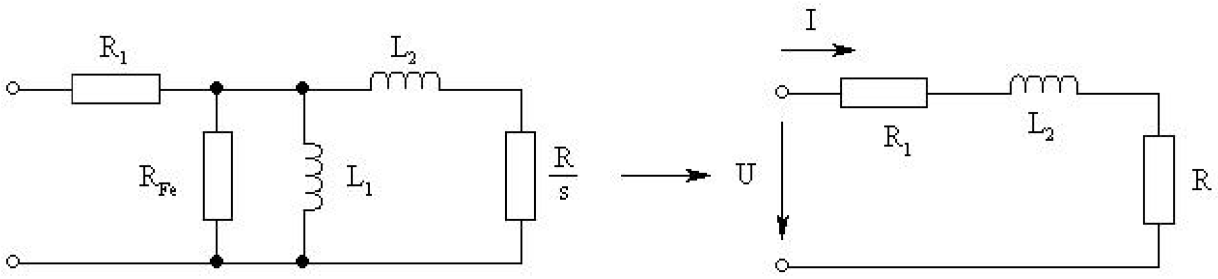
Abychom mohli určit hlavní (magnetizační) indukčnost, musíme znát hodnotu magnetizačního proudu, respektive činného proudu odpovídajícím ztrátám v železe, tj.

$$I_{\mathrm{Fe}} = \frac{P_{Fe}}{U_1}. \tag{2.5}$$

$$I_{n\acute{y}} = \sqrt{I^2 - I_{\mathrm{Fe}}^2}. \tag{2.6}$$

Hledaný parametr L_1 (hlavní indukčnost) tedy určíme dle vztahu

$$L_1 = \frac{U_1}{\omega \cdot I_{n\acute{y}}}. \tag{2.7}$$



Obr.2.6. Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu nakrátko.

Měření ve stavu nakrátko probíhá se zabržděnou hřídelí (s=1), přičemž je stroj napájen napětím takové hodnoty, při které statorový proud je roven proudu jmenovitému. Obvykle toto napájecí napětí nepřekračuje hodnotu 10% jmenovitého napětí. Celkový činný příkon je dán vztahem

$$P_{\check{c}} = (R_1 + R)I^2. \tag{2.8}$$

Ze vztahu (2.8) určíme přímo parametr R:

$$R = \frac{P_{\check{c}}}{I^2} - R_1. \tag{2.9}$$

Napětí na rozptylové indukčnosti L_2 určíme dle obr. 2.6.

$$U_2 = \sqrt{U^2 - \left((R_1 + R)I\right)^2}. \tag{2.10}$$

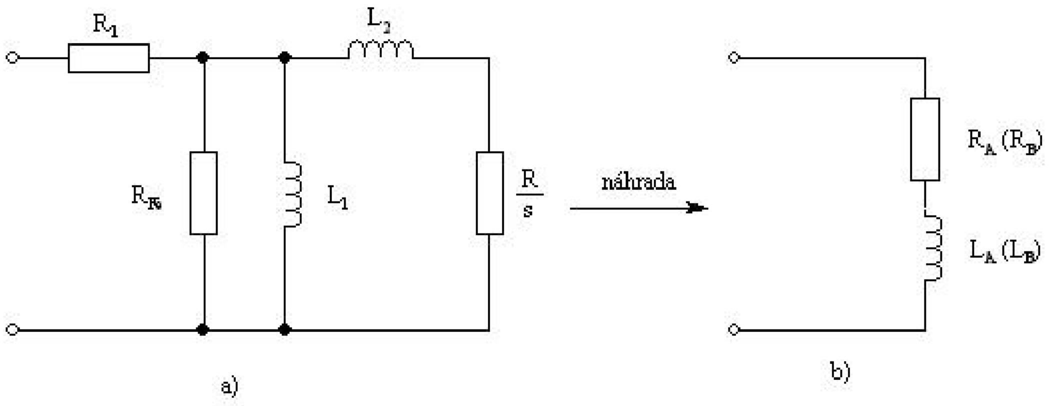
Hledaný parametr L_2 (rozptylová indukčnost) je dána vztahem:

$$L_2 = \frac{U_2}{\omega \cdot I}. \tag{2.11}$$

V případě vektorového řízení je stroj využíván v lineární části momentové charakteristiky. Ve stavu nakrátko se nikdy neprovozuje. Proto je vhodné identifikovat náhradní zapojení ze dvou bodů ležících v této oblasti. Tímto způsobem identifikované náhradní zapojení asynchronního motoru není tedy příliš vhodné.

2.1.2 Přesná identifikace náhradního zapojení

Z hodnot napětí a proudů zaznamenaných během měření v jedné fázi určíme změřenou vstupní impedanci motoru ve dvou pracovních bodech A, B, viz. obr.2.7.b). Dle obr.2.7.a) vypočítáme teoreticky vstupní impedanci motoru.



Obr.2.7. Vstupní impedance náhradního zapojení a) musí být stejná jako změřená b), převzato z [3]

Dle obr.2.7.a) nabývá teoretická vstupní impedance hodnoty

$$Z_{vst} = R + j \cdot \omega L \quad tedy$$

$$Z_{vst} = R_1 + \frac{j \cdot \omega L_1 \cdot R_{Fe} \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right)}{j \cdot \omega L_1 \cdot R_{Fe} + j \cdot \omega L_1 \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right) + R_{Fe} \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right)} \tag{2.12}$$

Obdobně vyjádříme prakticky změřenou impedanci motoru ve dvou bodech A, B

$$Z_{vst,A} = R_A + j \cdot \omega L_A$$
$$Z_{vst,B} = R_B + j \cdot \omega L_B \tag{2.13}$$

Odpor R_1 považujeme za známou hodnotu, měřením jednoznačně zjistitelnou. Porovnáním rovnic (2.12) a (2.13) získáme soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých L_1, R_{Fe}, L_2, R:

$$\begin{aligned}
&L_1R_{Fe}R_X + L_2R_{Fe}R_X + L_1R_X\frac{R}{s_A} + L_AR_{Fe}\frac{R}{s_A} = \omega^2L_AL_1L_2 + L_1R_{Fe}\frac{R}{s_A}\\
&\omega^2L_AL_1\frac{R}{s_A} + \omega^2L_AL_2R_{Fe} + \omega^2L_AL_1R_{Fe} + \omega^2L_1L_2R_X = R_{Fe}R_X\frac{R}{s_A} + \omega^2L_1L_2R_{Fe}\\
&L_1R_{Fe}R_Y + L_2R_{Fe}R_Y + L_1R_Y\frac{R}{s_B} + L_BR_{Fe}\frac{R}{s_B} = L_1R_{Fe}\frac{R}{s_B} + \omega^2L_BL_1L_2\\
&\omega^2L_BL_1\frac{R}{s_B} + \omega^2L_BL_2R_{Fe} + \omega^2L_BL_1R_{Fe} + \omega^2L_1L_2R_Y = R_{Fe}R_Y\frac{R}{s_B} + \omega^2L_1L_2R_{Fe}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Nejjednodušší řešení této soustavy je pomocí eliminační metody, tedy z jedné rovnice se vyjádří jeden hledaný parametr, který se dosadí do zbývajících rovnic. Získá se tak soustava rovnic o jedničku menší, tj. v našem případě soustava tří rovnic o třech neznámých. Stejným způsobem, tj. vyjádřením dalšího hledaného parametru a dosazením do zbývajících rovnic, pokračujeme až do úplného vyřešení celé soustavy.

V [3] bylo ukázáno, že řešení soustavy (2.14) vede na rovnice čtrnáctého řádu a je tedy algebraicky nemožné. Při zavedení vhodného zjednodušujícího předpokladu, zanedbání resp. určení parametru R_{Fe} z měření naprázdno, viz. kapitola 2.1.1, snížíme počet hledaných parametrů i rovnic v soustavě (2.14) o jedničku. Soustava rovnic má pak jednoznačné řešení:

$$R = \frac{\omega^2L_AL_1L_2s_A - L_1K_1 - L_2K_1}{L_AR_{Fe} + L_1R_X - L_1R_{Fe}} \tag{2.15}$$

$$L_2 = \frac{L_1^2K_4 - L_1K_3}{L_1^2K_2 - L_12K_4 + K_3} \tag{2.16}$$

$$L_1 = \frac{K_{10} + \sqrt{K_{10}^2 - K_9K_{11}}}{K_9} \tag{2.17}$$

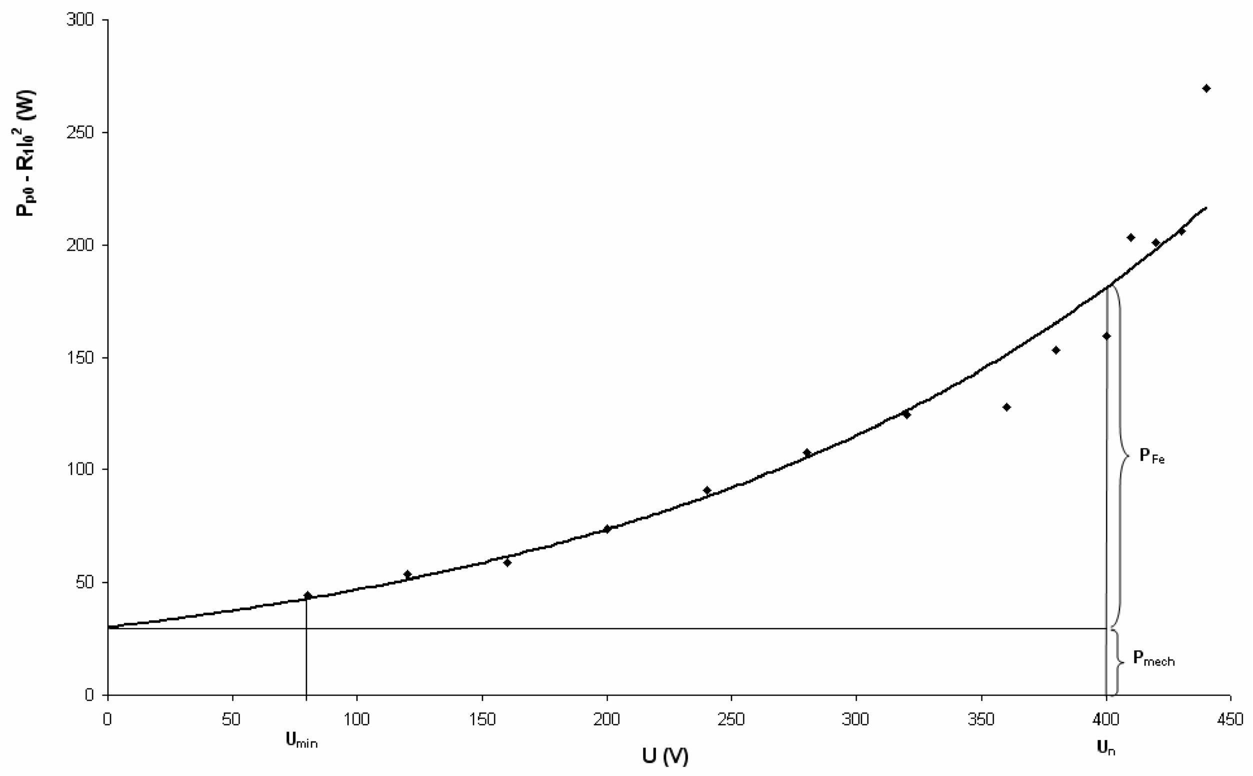
kde K_1 až K_{11} jsou obecné konstanty vzniklé při výpočtu, viz Příloha 1.

2.1.3 Identifikace parametrů motoru AOM090L02-016

K identifikaci byl zvolen asynchronní motor s kotvou nakrátko s označením AOM090L02-016, v.č. 6204718. Parametry motoru: 2p=2; 2,2KW; 400V-Y; 50Hz; $\cos\varphi$=0,88; η=81%. Identifikace vychází z naměřených hodnot. Na motoru bylo provedena zkouška naprázdno, zatěžovací při konstatním napětí, zatěžovací při konstatním momentu, zkouška nakrátko, zkouška oteplovací a měření momentové charakteristiky. Všechny naměřené hodnoty i graficky znázorněné závisloti jsou uvedeny v tabulce, viz Příloha 2.

Identifikace pomocí měření naprázdno, nakrátko:

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P2-1, viz Příloha 2. Dle tabulky P2-1 a obr.2.5 platí pro výpočet mechanických ztrát a ztrát v železe



Obr.2.8. Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718

Z obr. 2.8 a vztahu (2.2) získáme hodnotu ztrát v železe: P_{Fe} = 158,0 W.

Přímo z měření, viz Příloha 2, známe hodnotu odporu statoru: R_1 = 2,91 Ω.

Ze vztahů (2.3) a (2.4) určíme ztráty v železe:

$$R_{Fe} = \frac{(U - R_1 I_0)^2}{P_{Fe}} = \underline{\underline{982\ \Omega}}\,. \qquad (2.18)$$

Užitím vztahů (2.3), (2.5), (2.6) a (2.7) určíme hlavní indukčnost:

$$L_1 = \frac{U - R_1 I_0}{\omega \cdot \sqrt{I_0^2 - \frac{P_{Fe}^2}{(U - R_1 I_0)^2}}} = \underline{\underline{0{,}61\ H}}\,. \qquad (2.19)$$

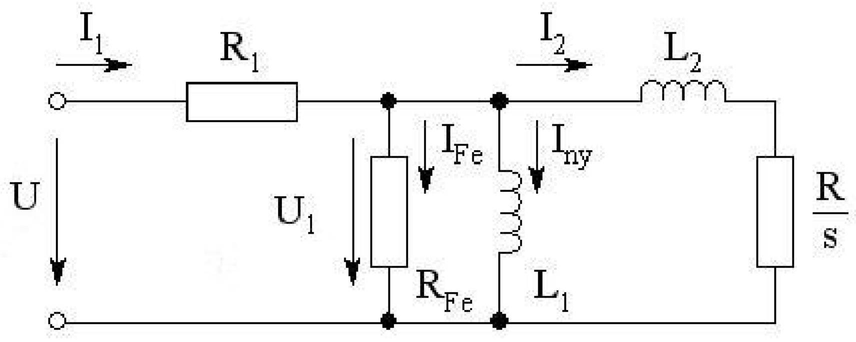
Zbylé parametry určíme z měření nakrátko. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P2-4, viz Příloha 2. Dle tabulky P2-4 a vztahu (2.9) určíme parametr R, R = 2,81 Ω.

Užitím vztahu (2.10) a (2.11) určíme rozptylovou indukčnost rotoru:

$$L_2 = \frac{\sqrt{U_K^2 - (R_1 + R)I_K^2}}{\omega \cdot I_K} = 0{,}030\ H\ . \qquad (2.20)$$

Přesná identifikace:

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P2-2, viz Příloha 2. Náhradní zapojení dle obr. 2.9



Obr.2.9. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku.

Odpor vinutí statoru známe přímo z měření, viz Příloha 2, R_1 = 2,91 Ω.

Odpor respektující ztráty v železe určíme z měření naprázdno,dle vztahu (2.18), R_{Fe} = 982 Ω.

Zbylé parametry určíme dosazením do rovnic (2.15), (2.16) a (2.17). Pro různé kombinace měření dle obr. 2.3.b) získáme různé hodnoty parametrů náhradního zapojení, viz tabulka 2.1. Výsledné hledané parametry dostaneme aritmetickým průměrem z jednotlivých měření.

Tabulka 2.1. Parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle kombinace měření A, B v lineární části momentové charakteristiky

M_A Nm	M_B Nm	L_1 H	L_2 H	R Ω
4	6	0,360	0,009	2,264
4	8	0,383	0,021	2,252
4	10	0,379	0,019	2,255
6	8	0,436	0,028	2,204
6	10	0,405	0,021	2,223
8	10	0,357	0,017	2,274

Parametry náhradní zapojení dle tabulky 2.1:

L_1 = 0,387 H.

L_2 = 0,019 H.

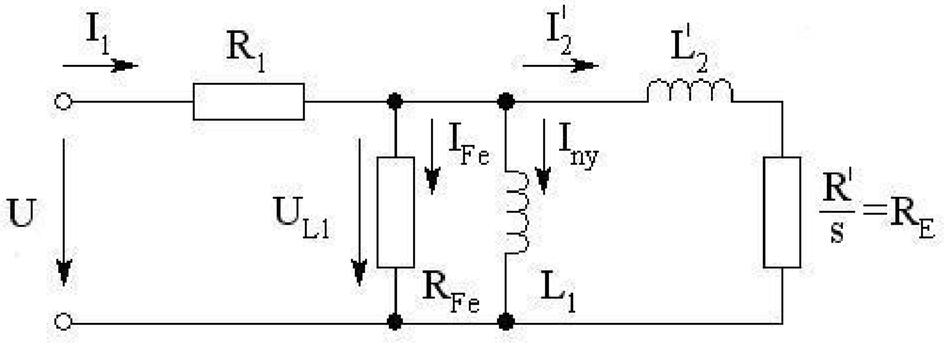
R = 2,245 Ω.

Tabulka 2.2. Přehled výsledků identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718 ve tvaru Γ-článku dle obr. 2.7.

		Identifikace z měření naprázdno, nakrátko	Identifikace přesná (z měření zatěžovacích charakteristik
R_1	[Ω]	2,910	2,910
L_1	[H]	0,610	0,387
R_{Fe}	[Ω]	982,00	982,00
L_2	[H]	0,030	0,019
R	[Ω]	2,810	2,245

3 VÝPOČET MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V předchozí kapitole byla provedena identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru dle obr.2.2.b). Tyto parametry mohou sloužit k výpočtu momentu asynchronního motoru. Moment vypočítáme podle obr.2.2.b).



Obr.3.1. Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku pro výpočet momentové charakteristiky

Vstupní impedanci náhradního zapojení asynchronního motoru dle obr.3.1 zapíšeme ve tvaru:

$$\frac{U}{I} = Z_{vst} = \frac{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2^{/}\left(R_1 + R_{Fe)}\right) + j\omega\left(L_1 + L_2^{/}\right) R_1 R_{Fe} + j\omega R_E \left(R_1 + R_{Fe}\right)}{R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2^{/} + j\omega\left(L_1 R_{Fe} + L_2^{/} R_{Fe} + L_1 R_E\right)} \qquad (3.1)$$

Napětí U_{L1} v náhradním zapojení dle obr. 3.1 je dáno:

$$U_{L1} = \frac{\dfrac{\dfrac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}}(j\omega L_2^{'} + R_E)}{\dfrac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}} + j\omega L_2^{'} + R_E}}{R_1 + \dfrac{\dfrac{j\omega L_1 R_{Fe}(j\omega L_2^{'} + R_E)}{j\omega L_1 + R_{Fe}}}{\dfrac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}} + j\omega L_2^{'} + R_E}} U_1 \qquad (3.2)$$

$$U_{L1} = U_1 \frac{\mathrm{j}\omega L_1 R_{Fe}(R_E + \mathrm{j}\omega L_2^{'})}{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2^{'}(R_1 + R_{Fe}) + \mathrm{j}\omega(L_1 + L_2^{'}) R_1 R_{Fe} + \mathrm{j}\omega L_1 R_E (R_1 + R_{Fe})} \qquad (3.3)$$

Proud rotoru přepočtený na stator je dán rovnicí:

$$I_2^{/} = \frac{U_{L1}}{R_E + \mathrm{j}\omega L_2^{'}}$$

$$I_2^{/} = U_1 \frac{\mathrm{j}\omega L_1 R_{Fe}}{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2^{'}(R_1 + R_{Fe}) + \mathrm{j}\omega(L_1 + L_2^{'})R_1 R_{Fe} + \mathrm{j}\omega L_1 R_E (R_1 + R_{Fe})} \tag{3.4}$$

$$\left|I_2^{/}\right| = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R_1\left(1+\frac{L_2^{'}}{L_1}\right)+R_E\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\right]^2 + \left[\omega L_2^{'}\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)-\frac{R_1 R_E}{\omega L_1}\right]^2}} \tag{3.5}$$

Pro výkon vzduchové mezery platí:

$$P_\delta = 2\pi n_s M = 2\pi \frac{\omega_s}{2\pi} M = \omega_s M = \frac{\omega}{p} M \tag{3.6}$$

Elektrický příkon na ekvivalentním odporu $R_E = \frac{R^{'}}{s}$ se rovná:

$$P_{el} = 3R_E \left|I_2^{/}\right|^2 = 3\frac{R^{'}}{s}\left|I_2^{'}\right|^2 \tag{3.7}$$

Přičemž musí platit:

$$P_\delta = P_{el} \tag{3.8}$$

$$M\frac{\omega}{p} = 3\frac{R^{'}}{s}\left|I_2^{'}\right|^2 \tag{3.9}$$

Odtud tedy:

$$M = 3\frac{R^{'}p}{\omega s}\left|I_2^{/}\right|^2 \tag{3.10}$$

Po dosazení čtverce absolutní hodnoty proudu $I_2^{'}$ do rovnice (3.10) získáme základní rovnici momentové charakteristiky asynchronního motoru:

$$M = \frac{3U_1^2 R^{'} p}{\omega s} \frac{1}{\left[\left(1+\frac{L_2^{'}}{L_1}\right)R_1 + \left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\frac{R^{'}}{\mathrm{s}}\right]^2 + \left[\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\omega L_2^{'} - \frac{R_1}{\omega L_1}\frac{R^{'}}{\mathrm{s}}\right]^2} \tag{3.11}$$

Celkový proud motoru plyne přímo z rovnice (3.1)

$$I = U_1 \frac{\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1+\frac{L_2^{/}}{L_1}\right)\frac{\omega}{p_p R^{/}} s + j\left(\frac{\omega^2 L_2^{/}}{p_p R_{Fe} R^{/}} s - \frac{1}{L_1}\right)}{\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\omega + \left(1+\frac{L_2^{/}}{L_1}\right)\frac{R_1\omega}{p_p R^{/}} s + j\left[\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\frac{\omega^2 L_2^{/}}{p_p R^{/}} s - \frac{R_1}{L_1}\right]} \tag{3.12}$$

Velikost proudu je pak dána rovnicí:

$$|I| = U_1 \sqrt{\frac{\left[\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1+\frac{L_2'}{L_1}\right)\frac{\omega}{p_p R'} s\right]^2 + \left[\frac{\omega^2 L_2'}{R_{Fe} p_p R'} s - \frac{1}{L_1}\right]^2}{\left[\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\omega + \left(1+\frac{L_2'}{L_1}\right)\frac{R_1 \omega}{p_p R'} s\right]^2 + \left[\left(1+\frac{R_1}{R_{Fe}}\right)\frac{\omega^2 L_2'}{p_p R'} s - \frac{R_1}{L_1}\right]^2}} \tag{3.13}$$

Pro určení extrémů derivujeme rovnici (3.11) podle skluzu a derivaci položíme rovnu nule, čímž dostaneme výraz pro skluz zvratu s_m

$$\frac{dM(s)}{dt} = 0 \tag{3.14}$$

$$s_m = \pm p_p R \sqrt{\frac{1+\frac{R_1^2}{\omega^2 L_1^2}}{R_1^2\left(1+\frac{L_2'}{L_1}\right)^2 + \omega^2 L_2'^2}} \tag{3.15}$$

Zanedbáním statorového odporu (R_1=0) zjednodušíme výraz (3.15) na (3.16) a výraz (3.11) na (3.17):

$$s_m = \pm \frac{p_p R'}{\omega L_2'} \tag{3.16}$$

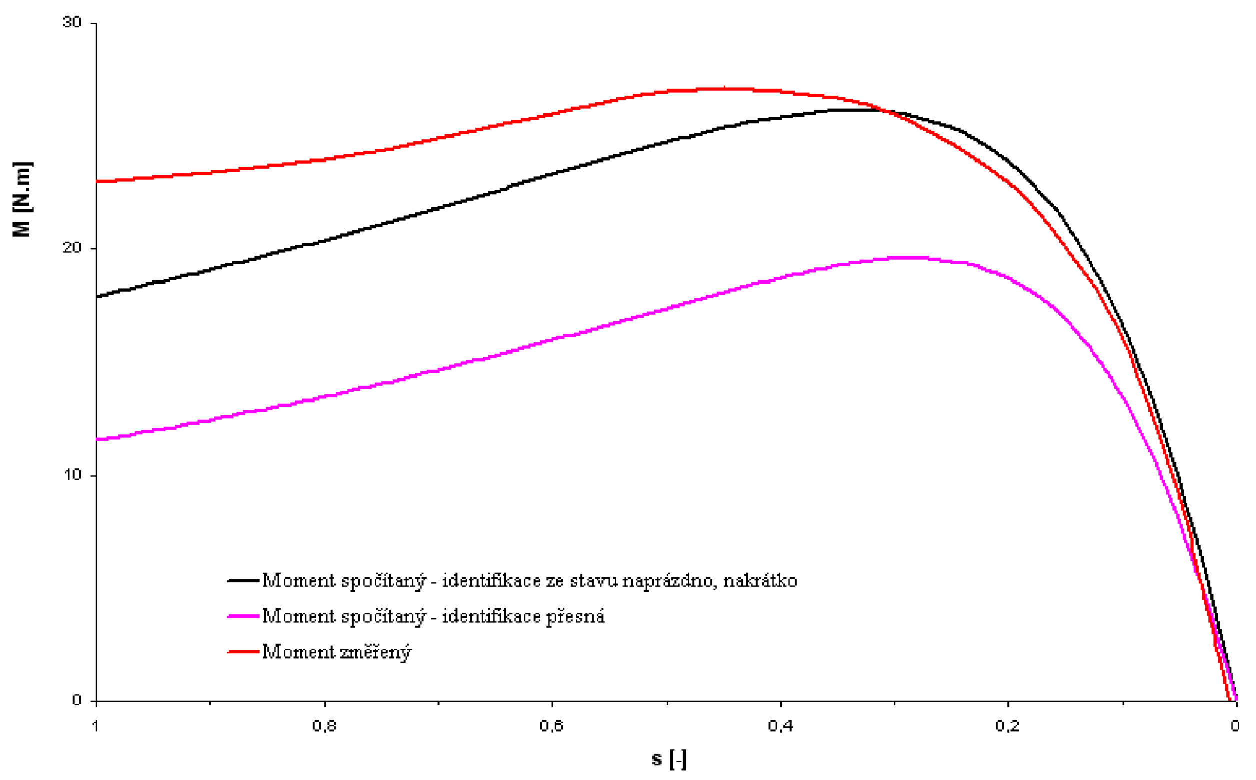
$$M = \frac{3U^2 R' p_p^2}{\omega s} \frac{1}{\left(R' \frac{p_p}{s}\right)^2 + \omega^2 L_2'^2} \tag{3.17}$$

Dosazením rovnice (3.16) resp. výrazu s=1 do rovnice (3.17) získáme vztahy pro maximální (M_m) resp. záběrový (M_z) moment asynchronního motoru:

$$M_m = \pm \frac{3U^2 p_p}{2\omega^2 L_2'} \tag{3.18}$$

$$M_z = \frac{3U^2 R' p_p^2}{\omega} \frac{1}{R'^2 p_p^2 + \omega^2 L_2'^2} = \frac{3U^2 R' p_p^2}{\omega^3 L_2'^2} \tag{3.19}$$

Vztahy (3.16) až (3.19) jsou pouze přibližné, neboť u reálného asynchronního motoru nemůže být odpor vinutí statoru v žádném případě nulový.



Obr.3.2. Momentová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016

V grafu na obr.3.2. jsou zobrazeny tři průběhy:

- Moment změřený
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace naprázdno, nakrátko
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné

Momentová charakteristika získaná identifikací naprázdno a nakrátko souhlasí s naměřenou charakteristikou přesně v oblasti $s = 0$ (stav naprázdno). Rozdíl v oblasti momentu zvratu a bodu nakrátko je způsoben jednak nárůstem teploty vinutí během měření vlivem rostoucího proudu $I_K \cong 5I_n \Rightarrow P_{Cu,K} \cong 25P_{Cu,n}$, jednak následujícím zjednodušujícím předpokladem: Při výpočtu podle rovnice (3.11) totiž považujeme zjištěné parametry za konstanty, což ovšem u reálného stroje není splněno. Momentová charakteristika získaná pomocí identifikace přesné kopíruje průběh naměřené charakteristiky od stavu naprázdno do momentu zvratu motoru.

Dosažení identického průběhu naměřené a vypočtené charakteristiky je velice obtížné. Vlivem oteplení dochází ke změně odporů vinutí a tím ke změně všech identifikovaných parametrů. Je nutné tedy provést měření ve velmi krátkém časovém úseku, aniž by došlo k nárůstu oteplení asynchronního motoru.

V dalším výpočtu vycházíme z hodnot parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru identifikovaných přesnou metodou.

3.1 Vliv změny odporu vinutí statoru na moment motoru

Každý elektrický stroj se při práci zahřívá. Dochází tedy ke vzniku energie, která způsobí ohřev jak statorového tak i rotorového vinutí. Přesný výpočet oteplení asynchronního motoru je velmi obtížný, neboť se jedná o děj fyzikálně velmi složitý.

Vznikající teplo se určí dle vztahu

$$Q = mc(\vartheta_2 - \vartheta_1) \tag{3.20}$$

Oteplení určíme dle rovnice

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{m_{Cu} c_{Cu} (\vartheta_2 - \vartheta_1)} \Delta P_{j1} \cdot t \tag{3.21}$$

kde m_{Cu} … hmotnost vinutí statoru

c_{Cu} … měrná tepelná kapacita mědi, $c_{Cu} = 3{,}4\ \mathrm{Jkg^{1}K^{-1}}$

ΔP_{j1} … ztráty ve vinutí asynchronního motoru

$$m_{Cu} = 2 m_1 N_{S1} l_v g_{km} 10^{-3} \tag{3.22}$$

kde m_1 … počet fází statoru

N_{S1} … počet závitů v sérii

l_v … střední délka statorového vodiče

g_{km} … hmotnost vodiče

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_{1n}^2 \tag{3.23}$$

Hodnoty oteplení, respektive odporu vinutí statoru určené pro asynchronní motor AOM090L02-016, 2p=2, 2,2KW, 400V-Y, 50Hz dle vztahu (3.21), respektive (3.24) viz tabulka 3.1.

Přepočet odporu vinutí statoru po oteplení

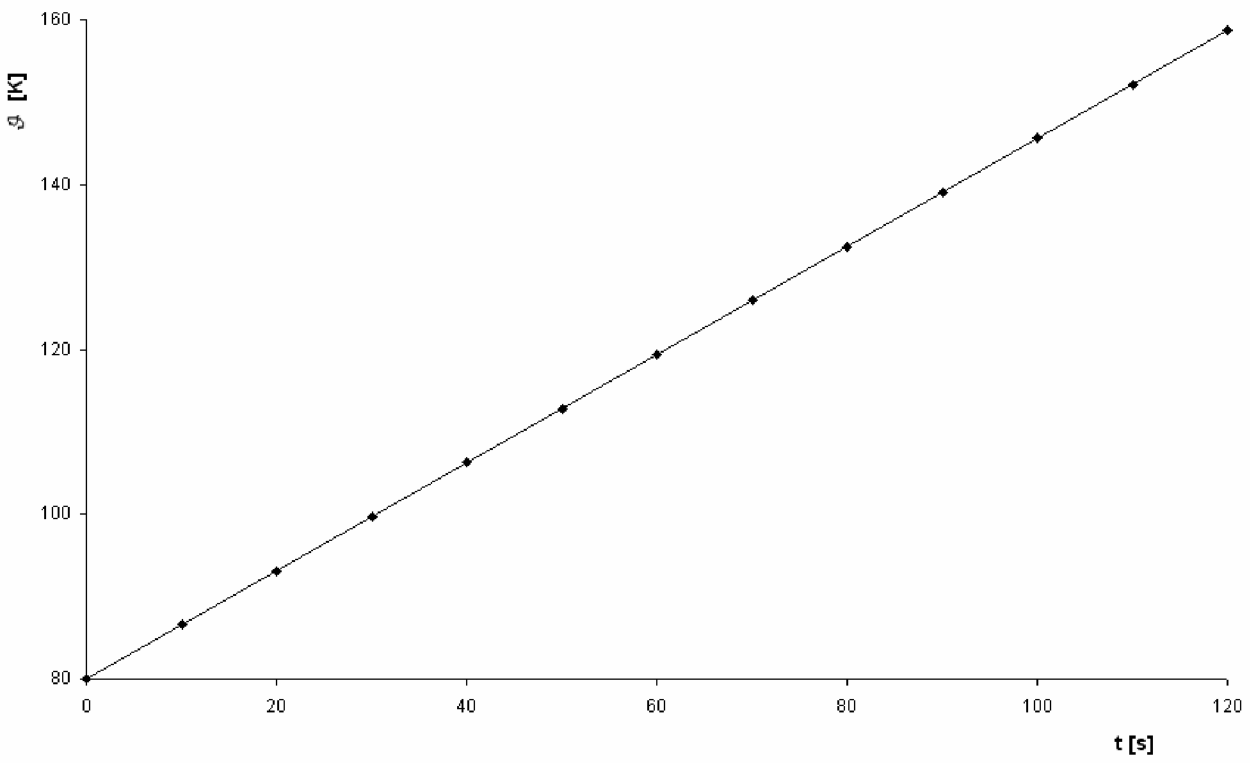
$$R_{1\vartheta} = R_1 \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \tag{3.24}$$

Na asynchronním motoru byla provedena oteplovací zkouška, viz Příloha 2, tabulka P2-6. Na konci oteplovací zkoušky byl změřen odpor vinutí statoru v závislosti na čase, viz. Obr.P2-6.1. Odtud plyne, že na konci oteplovací zkoušky hodnota odporu dosahovala hodnoty $R_{1,oteplovaci} = 3{,}86\ \Omega$, což dle tabulky 3.1. odpovídá oteplení ϑ = 105K.

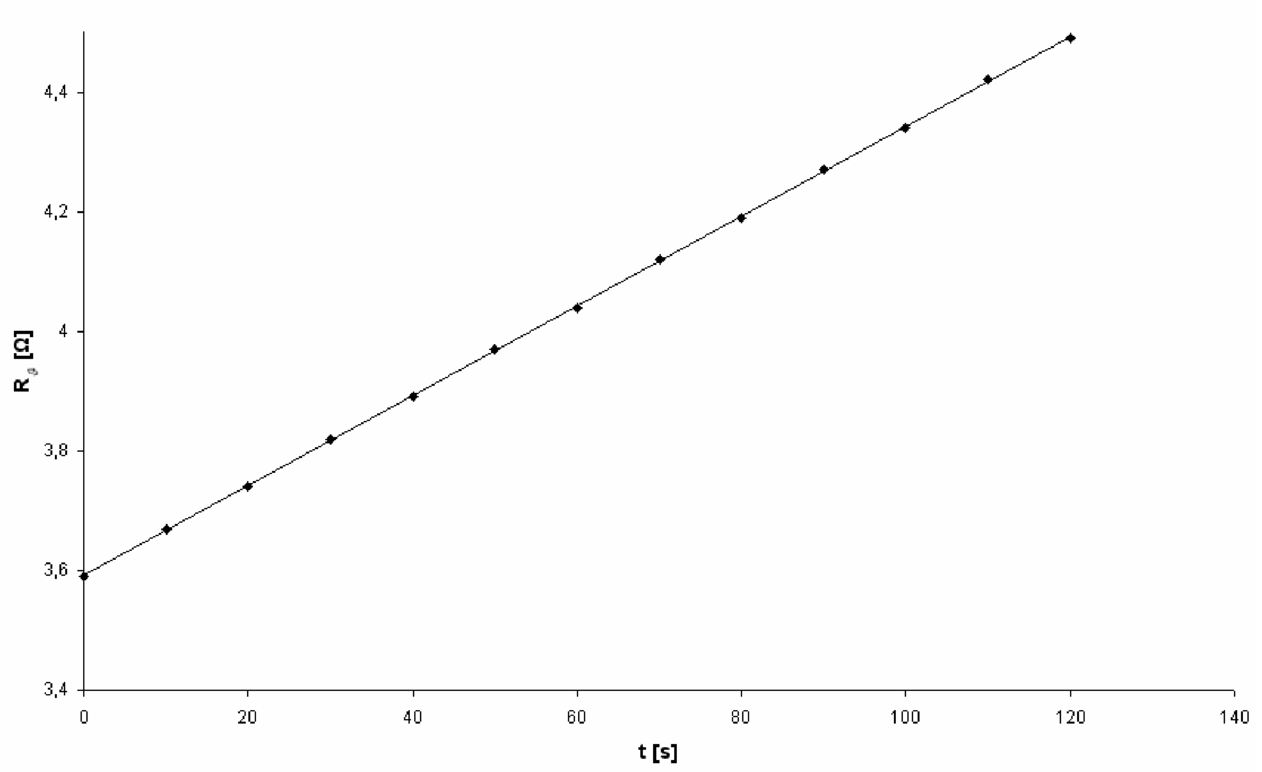
Jak bylo již zmíněno momentová charakteristika závisí právě na velikosti odporu vinutí statoru. Graficky je tato závislost naznačena na obr. 3.5.

Tabulka 3.1 Hodnoty oteplení a odporu vinutí statoru

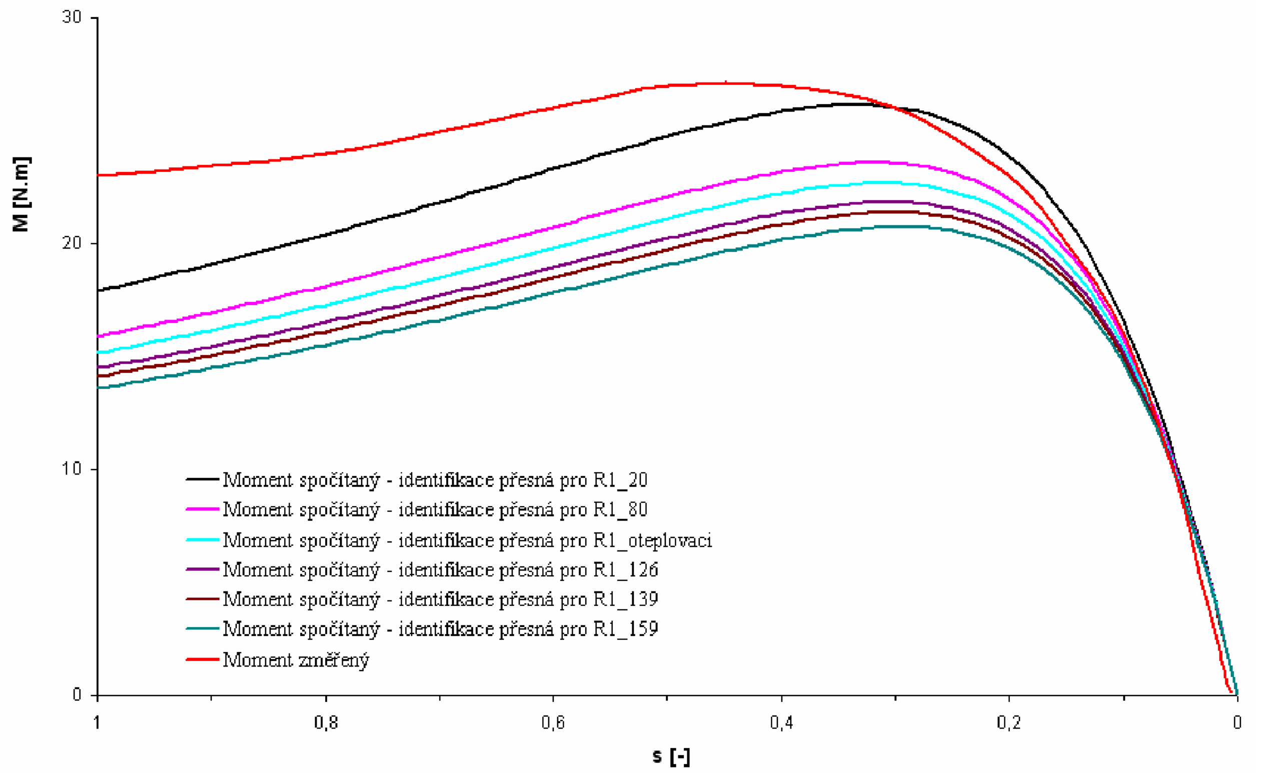
t [s]	ϑ [K]	R_{ϑ} [Ω]
10	86,56	3,67
20	93,13	3,74
30	99,69	3,82
40	106,26	3,89
50	112,82	3,97
60	119,39	4,04
70	125,95	4,12
80	132,51	4,19
90	139,08	4,27
100	145,64	4,34
110	152,21	4,42
120	158,77	4,49



Obr.3.3. Závislost oteplení na čase



Obr.3.4. Závislost odporu vinutí statoru na čase



Obr.3.5. Závislost momentové charakteristiky na odporu vinutí statoru asynchronního motoru AOM090L02-016

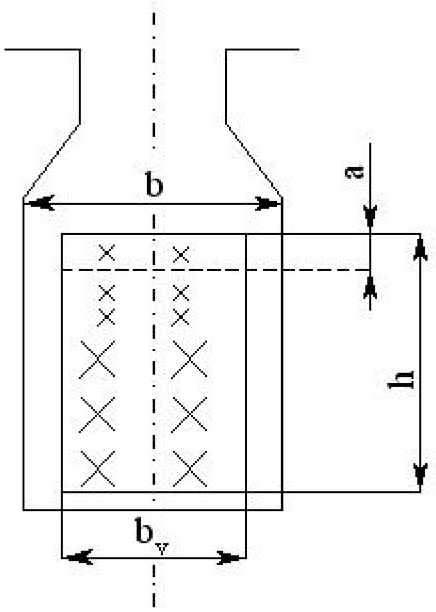
V grafu na obr.3.5. je zobrazeno několik průběhů:

- Moment změřený
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné. Moment je spočítán pro různé hodnoty odporu vinutí statoru R_1 dle tabulky 3.1.

Ze sítě momentových charakteristik zobrazených v grafu na obr.3.5. nejvíce odpovídá měřené charakteristice momentová charakteristika vypočítaná pro hodnotu odporu $R_{1,80}$ respektive $R_{1,\mathrm{oteplovaci}}$. Odpor $R_{1,80}$ = 3,59Ω jsme určili výpočtem dle rovnice (3.24). Odpor $R_{1,\mathrm{oteplovaci}}$ = 3,86Ω jsme získali z měření, viz tabulka P2-6.1. Rozdíl těchto hodnot činí 7%. Lze tedy říci, že vypočtená momentová charakteristika velmi dobře souhlasí s charakteristikou experimentálně určenou (v lineární části křivky, tj. po moment zvratu). Rozdíl v nelineární části je tedy způsoben vlivem skinefektu v tyčích rotoru.

3.2 Vliv skinefektu v tyčích rotoru na moment motoru

Vlivem skinefektu dochází k tzv. vytlačování střídavého proudu, respektive toku, ze středu vodiče k jeho povrchu, tedy ke zmenšení průřezu vodiče, kterým protéká proud, tedy k zvětšení odporu vodiče.



Obr.3.6. Znázornění rozptylového toku rotorové tyče uložené v drážce obdélníkového typu

Veličina a je tzv. „hloubka vniku“, tj. vzdálenost do níž bude stěsnán proud ve vodiči:

$$a = \sqrt{\frac{2b}{b_v \omega \mu_0 \gamma}}, \qquad (3.25)$$

kde ω je rotorová frekvence, nikoliv frekvence statoru (f_1 = 50Hz), tedy

$$\omega = 2\pi \cdot f_2 = 2\pi \cdot (s \cdot f_1) \tag{3.26}$$

Veličina ξ je tzv. redukovaná výška vodiče, tj. poměr výška vodiče h ke hloubce vniku a

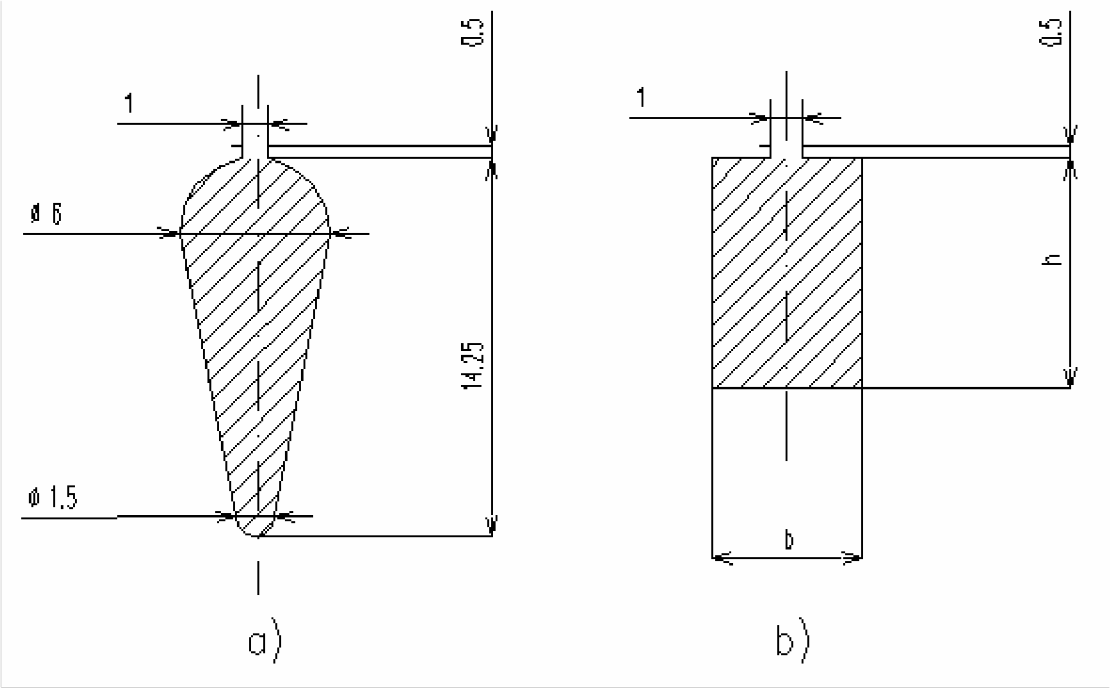
$$\xi = \frac{h}{a} \tag{3.27}$$

Závislost odporu rotoru na kmitočtu je dán poměrem

$$\varphi(\xi) = \frac{R_{skin}}{R} = \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \tag{3.28}$$

kde R_{skin} je odpor s uvážením skinefektu, R je odpor bez uvažování skinefektu.

V asynchronním motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718 má rotorová drážka tvar dle obr.3.7.a). Pro výpočet skinefektu nejdříve tuto drážku přepočítáme na tvar drážky dle obr.3.7.b).



Obr.3.7. a) Rozměry a tvar drážky asynchronního motoru AOM090L02-016. b) Rozměry a tvar drážky pro výpočet skinefektu v tyčích rotoru motoru AOM090L02-016.

Plocha drážky na obr. 3.7.a) určíme dle vztahu

$$S_{t,a)} = S_1 + S_h + S_2 = \frac{\pi}{8} \cdot b_{1r}^2 + \frac{1}{2} \cdot (b_{1r} + b_{2r}) \cdot \left(h - \frac{b_{1r}}{2} - \frac{b_{2r}}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot b_{2r}^2 = \underline{\underline{54{,}4\ mm^2}} \tag{3.29}$$

Plocha drážky na obr 3.7.b) musí být stejná jako na obr. 3.7.a) tedy $S_{t,a)} = S_{t,b)}$. Při zvolení jednoho rozměru drážky (šířka drážky b, resp. hloubka drážky h) pak velice jednoduše

dopočítáme druhý rozměr (hloubka drážky *h*, resp. šířka drážka *b*), dle obr. 3.7.b), viz tabulka 3.2.

Tabulka 3.2 Rozměry drážky dle obr.3.7.b)

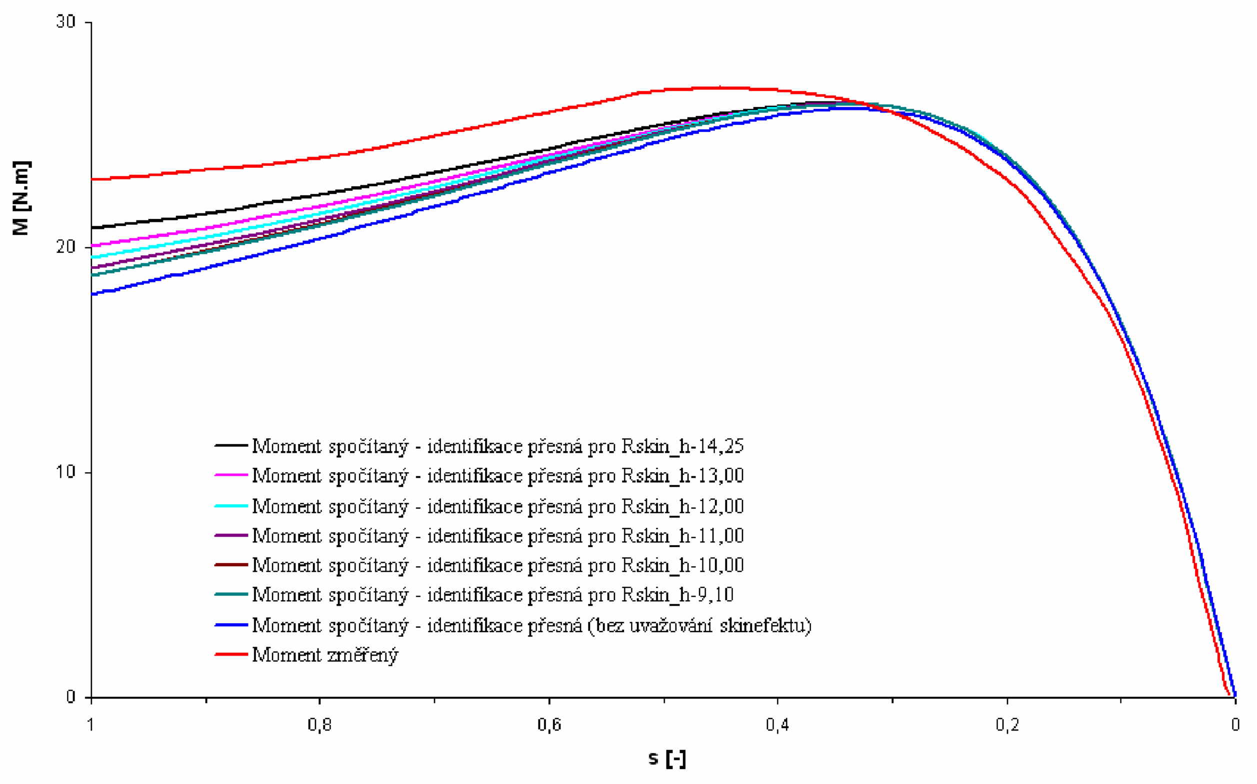
h	b
[mm]	[mm]
14,25	3,82
13,00	4,18
12,00	4,53
11,00	4,95
10,00	5,44
9,10	6,00

Hodnoty hloubky vniku, respektive odporu vinutí rotoru s uvažováním skinefektu, určené pro asynchronní motor AOM090L02-016, 2p=2, 2,2KW, 400V-Y, 50Hz dle vztahu (3.25), respektive (3.28), viz tabulka 3.3.

Tabulka 3.3 Hodnoty získané výpočtem dle rovnic (3.25) až (3.28)

n	s	f_2	a	b = 3,82 mm h = 14,25 mm			b = 4,18 mm h = 13,00 mm			b = 4,53 mm h = 12,00 mm		
				ξ	φ(ξ)	R_{skin}	ξ	φ(ξ)	R_{skin}	ξ	φ(ξ)	R_{skin}
[min^{-1}]	[-]	[Hz]	[mm]	[-]	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[Ω]
0	1,00	50,00	11,969	1,191	1,166	2,618	1,086	1,117	2,509	1,003	1,086	2,439
150	0,95	47,50	12,280	1,160	1,151	2,584	1,059	1,107	2,484	0,977	1,078	2,421
300	0,90	45,00	12,617	1,129	1,136	2,551	1,030	1,096	2,461	0,951	1,071	2,403
500	0,83	41,67	13,112	1,087	1,118	2,509	0,991	1,083	2,431	0,915	1,061	2,381
750	0,75	37,50	13,821	1,031	1,096	2,461	0,941	1,068	2,397	0,868	1,049	2,356
900	0,70	35,00	14,306	0,996	1,084	2,434	0,909	1,059	2,378	0,839	1,043	2,342
1100	0,63	31,67	15,040	0,947	1,069	2,401	0,864	1,049	2,354	0,798	1,035	2,325
1250	0,58	29,17	15,672	0,909	1,059	2,378	0,830	1,041	2,338	0,766	1,030	2,313
1500	0,50	25,00	16,927	0,842	1,044	2,343	0,768	1,031	2,314	0,709	1,022	2,295
1750	0,42	20,83	18,543	0,768	1,031	2,314	0,701	1,021	2,293	0,647	1,015	2,280
2000	0,33	16,67	20,732	0,687	1,020	2,289	0,627	1,014	2,276	0,579	1,010	2,267
2500	0,17	8,33	29,319	0,486	1,005	2,256	0,443	1,003	2,253	0,409	1,002	2,251
2800	0,07	3,33	46,358	0,307	1,001	2,247	0,280	1,001	2,246	0,259	1,000	2,246
2900	0,03	1,67	65,559	0,217	1,000	2,245	0,198	1,000	2,245	0,183	1,000	2,245

n	s	f_2	a	b = 4,95 mm h = 11,00 mm			b = 5,44 mm h = 10,00 mm			b = 6,00 mm h = 9,10 mm		
				ξ	φ(ξ)	R_{skin}	ξ	φ(ξ)	R_{skin}	ξ	φ(ξ)	R_{skin}
[min^{-1}]	[-]	[Hz]	[mm]	[-]	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[Ω]
0	1,00	50,00	11,969	0,919	1,062	2,384	0,835	1,043	2,340	0,760	1,029	2,311
150	0,95	47,50	12,280	0,896	1,056	2,370	0,814	1,038	2,331	0,741	1,026	2,304
300	0,90	45,00	12,617	0,872	1,050	2,358	0,793	1,035	2,323	0,721	1,024	2,298
500	0,83	41,67	13,112	0,839	1,043	2,342	0,763	1,030	2,312	0,694	1,020	2,291
750	0,75	37,50	13,821	0,796	1,035	2,324	0,724	1,024	2,299	0,658	1,017	2,282
900	0,70	35,00	14,306	0,769	1,031	2,314	0,699	1,021	2,292	0,636	1,014	2,277
1100	0,63	31,67	15,040	0,731	1,025	2,301	0,665	1,017	2,284	0,605	1,012	2,272
1250	0,58	29,17	15,672	0,702	1,021	2,293	0,638	1,015	2,278	0,581	1,010	2,268
1500	0,50	25,00	16,927	0,650	1,016	2,280	0,591	1,011	2,269	0,538	1,007	2,262
1750	0,42	20,83	18,543	0,593	1,011	2,270	0,539	1,007	2,262	0,491	1,005	2,257
2000	0,33	16,67	20,732	0,531	1,007	2,261	0,482	1,005	2,256	0,439	1,003	2,252
2500	0,17	8,33	29,319	0,375	1,002	2,249	0,341	1,001	2,248	0,310	1,001	2,247
2800	0,07	3,33	46,358	0,237	1,000	2,246	0,216	1,000	2,245	0,196	1,000	2,245
2900	0,03	1,67	65,559	0,168	1,000	2,245	0,153	1,000	2,245	0,139	1,000	2,245



Obr.3.8. Závislost momentové charakteristiky na odporu vinutí rotoru asynchronního motoru AOM090L02-016 s uvažování skinefektu.

V grafu na obr.3.8 je zobrazeno několik průběhů:

- Moment změřený.
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné (modrá křivka, tj. bez uvažování vlivu skinefektu).
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné. Moment je spočítán pro různé hodnoty odporu vinutí rotoru *R* dle tabulky 3.3 (s uvažováním vlivu skinefektu).

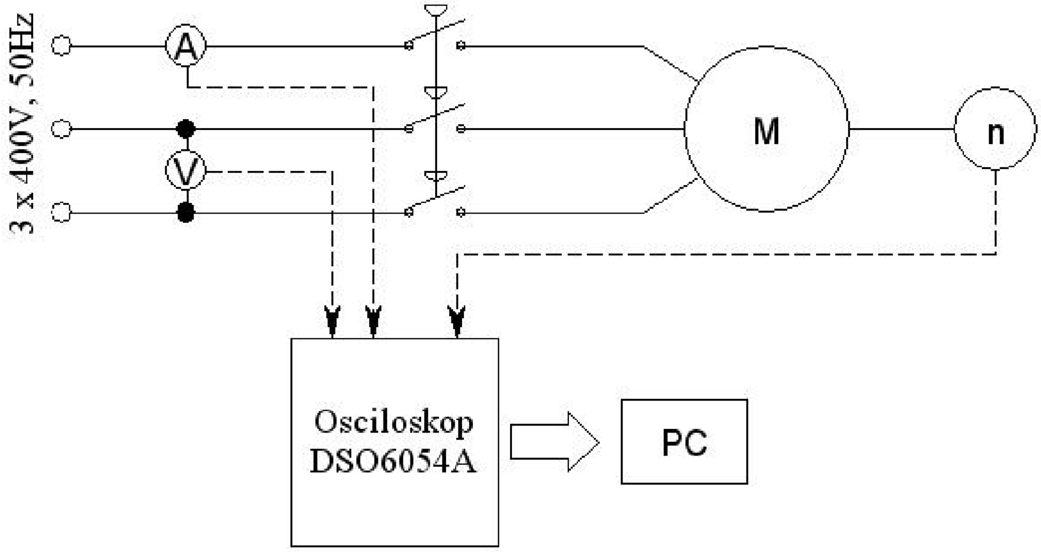
V grafu na obr. 3.8. jsou znázorněny momentové křivky s korekcí na skinefekt v tyčích rotoru. Z grafu plyne, že skinefekt ovlivňuje momentovou charakteristiku zcela zásadně v oblasti od záběrového momentu po moment zvratu. To je dáno rotorovým kmitočtem, který v oblasti záběrového momentu nabývá hodnoty 50Hz a postupně klesá. K dosažení shodného průběhu naměřené a vypočtené momentové charakteristiky je tedy nutno vždy uvažovat skinefektu v tyčích rotoru.

4 MĚŘENÍ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY POMOCÍ SETRVAČNÍKU

V grafu na obr. 3.2. je zobrazena momentová charakteristika určená výpočtem z identifikovaných hodnot a momentová charakteristika zjištěná měřením. Rozdíl obou charakteristiky je jednak způsoben vlivem skinefektu v tyčích rotoru, viz kapitola 3.2.,jednak teplotní závislostí odporů vinutí na čase.

Rozdíl obou charakteristik je také způsoben rychlostí odečtení hodnot z přístrojů během měření momentové charakteristiky klasickým způsobem, tj. pomocí dynamometru. Měření tímto způsobem trvá relativně dlouho. Dochází tak ke zvyšování teploty vlivem vzrůstajícího proudu. Teplota uvnitř vinutí se tedy zvyšuje řádově až o 100K. Následkem je pak zvýšení odporu vinutí během měření.

Za účelem zrychlení měření, získání přesného průběhu momentové charakteristiky nezdeformované vlivem změn odporů byla v [4] publikována metoda měření momentové charakteristiky pomocí setrvačníku. Princip metody spočívá v tom, že přímo na hřídeli asynchronního motoru jsou uloženy setrvačníky o vhodné velikosti momentu setrvačnosti *J*. Motor je rozebíhán přímo ze napájecí sítě, tedy se rozeběhne z nulových otáček až po otáčky téměř synchronní během několika málo sekund.



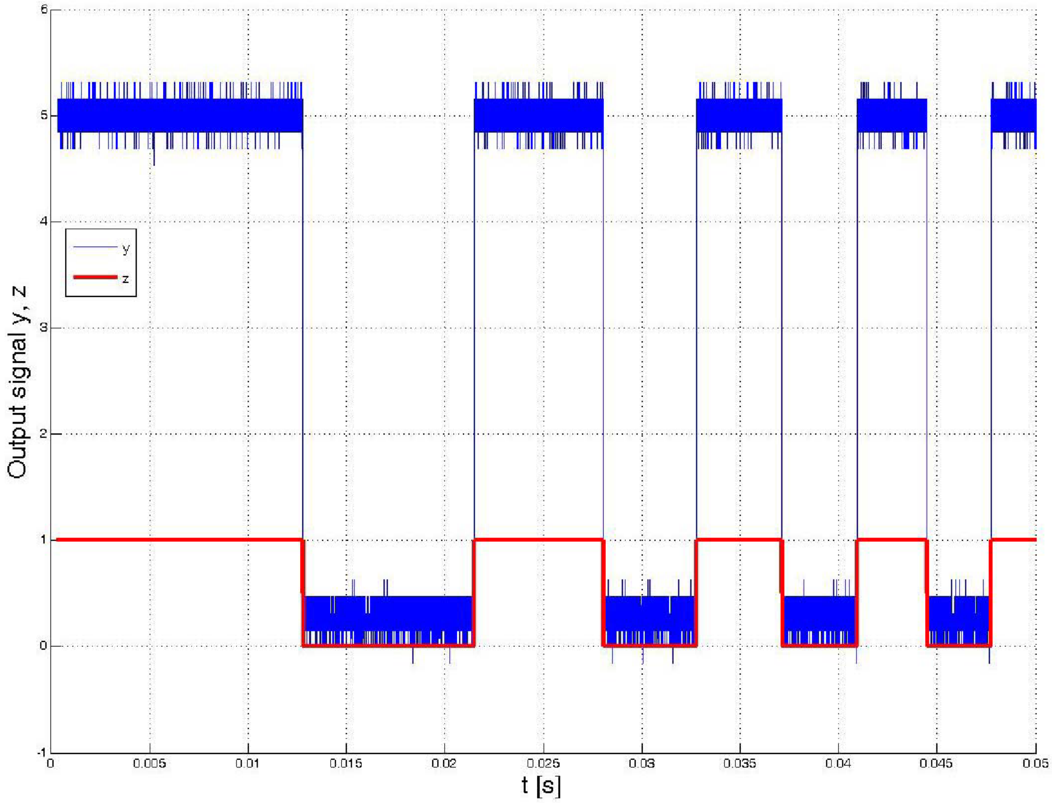
Obr.4.1. Zapojení měřicího pracoviště pro měření momentových charakteristik pomocí setrvačníků, převzato z [4].

Jako měřicí stanice je využit čtyřkanálový osciloskop Agilent Technologies DSO6054A (kapacita paměti 8MB/channel). Během měření jsou zaznamenávány otáčky, napětí a proud ve všech fázích. Z okamžité rychlosti je dopočítáno zrychlení. Ze zrychlení a momentu setrvačnosti je dopočítaná hledaná závislost momentu na skluzu.

Ke zpracování signálů z inkrementálního čidla otáček je s výhodou využito programu MATLAB. Data z čidla otáček jsou uloženy do matice **f**, kterou tvoří vektory navzorkovaných hodnot **y** a časy **t**

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} y_1 & t_1 \\ y_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ y_N & t_N \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

kde N je celkový počet vzorků.

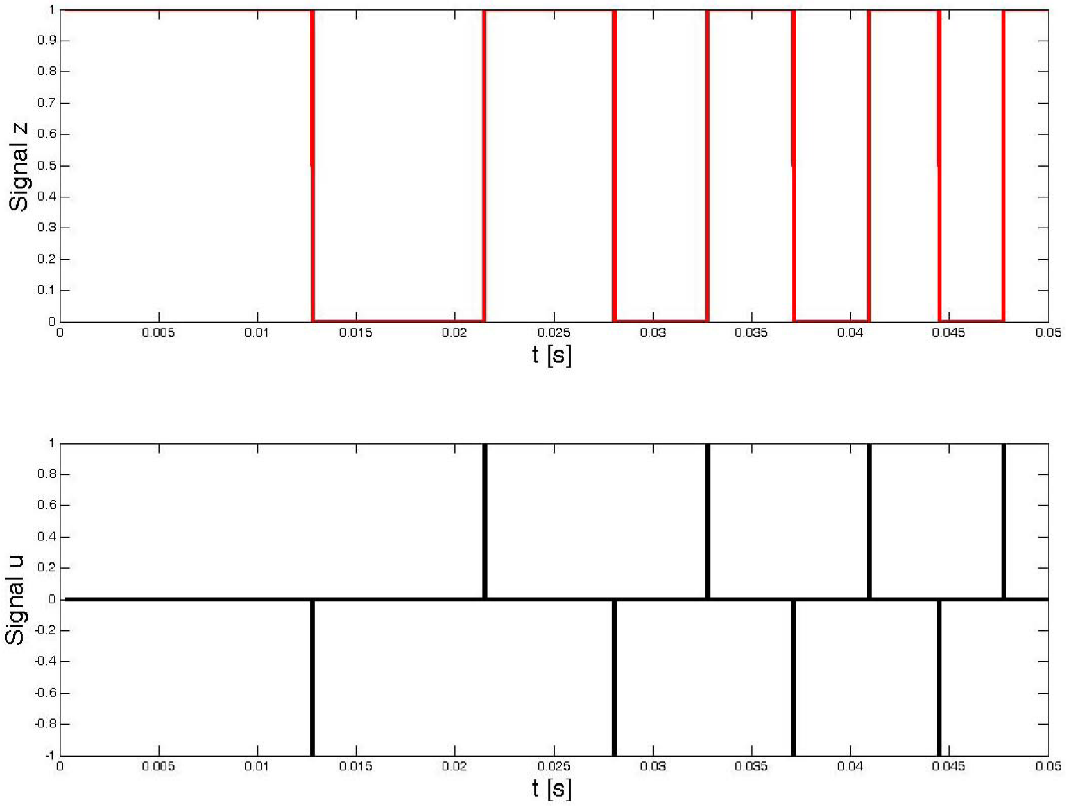


Obr.4.2. Výstupní signál *y* z čidla otáček a upravený signál z, převzato z [4].

Čistý signál $z(k)$ o normovanmé výšce jedna (již je odstraněn šum, viz obr.4.2) získáme srovnáním vzorků $y(k)$ s hodnotou Y (rozhodovací úroveň). Polohu náběžných, respektive sestupných hran signálu $z(k)$ získáme dle vztahu:

$$u(k+1) = z(k+1) - z(k). \tag{4.2}$$

Signál $u(k)$ nabývá pouze tří hodnot: 1, 0, -1, viz obr.4.3



Obr.4.3. Signál z(k). Zobrazení signálu u(k) dle rovnice (4.2), převzato z [4].

Pro výpočet rychlosti využijeme pouze kladné náběžné hrany ze signálu $z(k)$, tedy dle obr.4.3 pouze polohu $u(k)$ = 1. Vytvoříme tedy novou matici $\mathbf{f_2}$ odpovídající pouze těmto náběžným hranám a jejich časovým hodnotám

$$\mathbf{f}_2 = [t_1 \quad t_2 \quad \cdots]^T \tag{4.3}$$

Okamžitou úhlovou rychlost asynchronního motoru určíme ze vztahu

$$\omega(k) = \frac{2\pi}{K} \frac{1}{t(k+1) - t(k)} \tag{4.4}$$

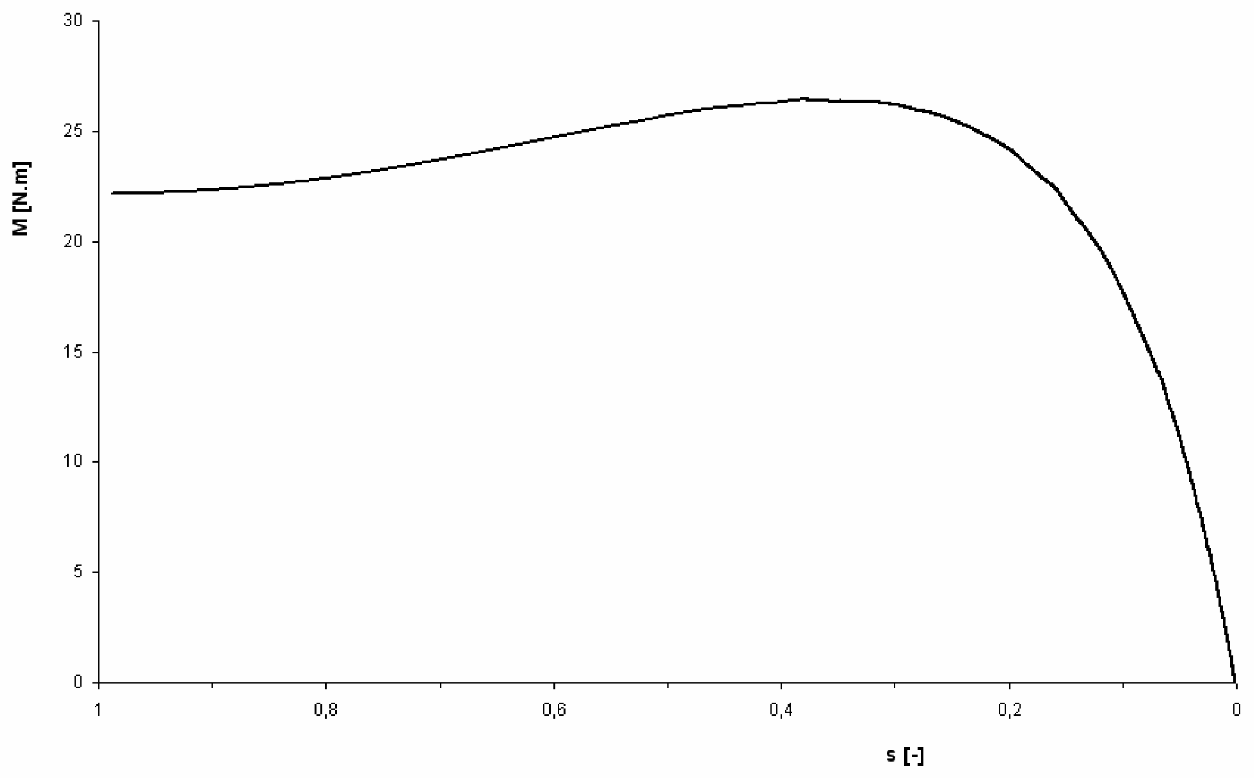
kde K je celkový počet pulsů na jednu otáčku.

Moment asynchronního motoru při rozběhu (4.6) pak určíme ze znalosti celkového momentu setrvačnosti J a vztahu pro dynamický moment (4.5):

$$M = J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{4.5}$$

$$M(k) = J\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = J\frac{\omega(k+1) - \omega(k-1)}{t(k+1) - t(k-1)} \qquad (4.6)$$

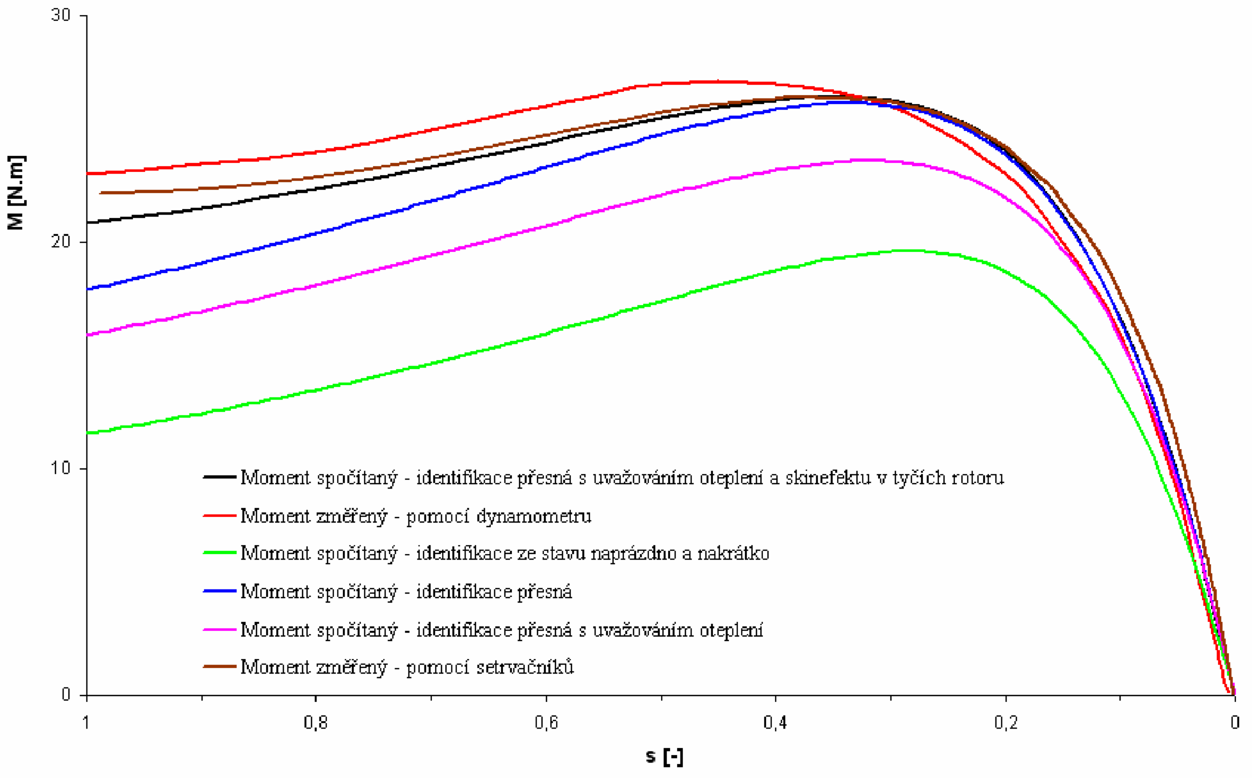
Měření bylo provedeno na asynchronním motoru AOM090L02-016, 2p=2; 400 V – Y; 2,2 kW; 4,5 A; 50 Hz; 2872 min^{-1}.



Obr.4.4. Graf závislosti momentu asynchronního motoru AOM090L02-016 na skluzu.

V grafu na obr.4.4 je vykreslena momentová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016 získaná z měření pomocí setrvačníků. Vypočtený jmenovitý moment motoru AOM090L02-016 je M_n = 7,3 Nm při jmenovitém skluzu s_n = 0,0427. Z grafu na obr. 4.4 odečteme pro s_n = 0,0427 hodnotu jmenovitého momentu M_n = 7,8 Nm. Rozdíl činí 6,41%. Lze tedy říci, že naměřený i vypočtený jmenovitý moment motoru jsou shodný. Výhodou této metody měření je to, že celé měření probíhá velice rychle, teplota vinutí je tedy prakticky konstantní (nepatrný nárůst je omezen velkou tepelnou kapacitou vinutí), tedy odpory vinutí během měření jsou konstantní.

5 POROVNÁNÍ VYPOČÍTANÉ A NAMĚŘENÉ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY MOTORU



Obr.5.1. Momentové charakteristiky asynchronního motoru AOM090L02-016.

V grafu na obr.5.1. je zobrazeno několik průběhů:

- Moment změřený – pomocí dynamometru.
- Moment změřený – pomocí setrvačníků.
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné s korekcí na oteplení a skinefekt.
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace naprázdno a nakrátko.

V grafu na obr.5.1. je porovnáno několik průběhů momentových charakteristik. Z grafu vyplývá, že charakteristika získaná výpočtem z parametrů z identifikace naprázdno a nakrátko nejméně odpovídá charakteristikám změřeným. Charakteristika získaná výpočtem z parametrů z identifikace přesné plně souhlasí s charakteristikami změřenými v pracovní oblasti. V oblasti záběrového momentu a momentu zvratu také souhlasí s charakteristikami změřenými při zahrnutí vlivu skinefektu. K dosažení shodného průběhu naměřené a vypočtené momentové charakteristiky je tedy nutno vždy uvažovat skinefekt v tyčích rotoru. Charakteristika změřená pomocí setrvačníků (hnědá křivka) velmi přesně kopíruje průběh charakteristiky získané

výpočtem pomocí identifikace přesné s korekcí na oteplení a skinefekt (černá křivka). Závěrem lze tedy říci, že pro přesnou identifikaci parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru je nutno využít vždy identifikace přesné. V případě měření momentové charakteristiky asynchronního motoru je velice výhodné využít dynamického měření, tj. pomocí setrvačníků, kdy samotné měření je sice velice jednoduché i časově nenáročné, ovšem z hlediska zpracování naměřených dat poměrně složité.

6 ZÁVĚR

Práce je rozdělena do několika celků.

V prvním z nich, kapitola 2, je popsáno náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ-článku. Jsou zde popsány metody identifikace parametrů náhradního zapojení, tj. identifikace vycházející z měření ve stavu naprázdno a nakrátko, identifikace vycházející z měření blízko jmenovitého bodu. Identifikace je provedena na konkrétním asynchronním motoru s kotvou nakrátko, označení AOM090L02-016, v.č. v.č. 6204718. Parametry motoru: 2p=2; 2,2KW; 400V-Y; 50Hz; cosφ=0,88; η=81%.

V kapitole 3 je ukázán výpočet momentové charakteristiky asynchronního motoru. Je zde také ukázán vliv oteplení a skinefektu v tyčích rotoru na tvar momentové charakteristiky. Všechny získané průběhy jsou zobrazeny v grafu na obr.5.1.

Součástí práce bylo také měření na asynchronním motoru. Provádělo se jednak klasické měření typové zkoušky, tj. zkoušky naprázdno, nakrátko, zatěžovací (při konstantním napětí, při konstantním momentu), oteplovací a měření momentové charakteristiky, pomocí dynamometru, výsledky viz Příloha 2., jednak tzv. dynamické měření momentové charakteristiky, viz kapitola 4. Oproti klasickému měření je dynamické časově nenáročné, z hlediska zpracování naměřených dat ovšem poměrně složité. Výhodou této metody měření oproti klasickému měření pomocí dynamometru je to, že celé měření probíhá velice rychle, teplota vinutí je tedy prakticky konstantní (nepatrný nárůst je omezen velkou tepelnou kapacitou vinutí), tedy odpory vinutí během měření jsou konstantní.

LITERATURA

[1] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.:Teorie elektrických strojů, Praha, SNTL/ALFA, 1968.

[2] Patočka, M.: Několik poznámek k transformátoru. Sborník Sympózia učitelů elektrických pohonů, SYMEP 04, Praha, ČVUT FEL, červen 2004.

[3] Patočka, M., Běloušek, J.: Identifikace parametrů asynchronního motoru, EPVE 06, VUT FEKT, 2006.

[4] Patočka, M., Běloušek, J., Cipín, R.: Dynamic measurement of induction machine torque characteristics, ZKWE 09, Institut of Electrical Engineering and Electronics of the Poznan University, 2009.

[5] Brázda, M., Staňa, R.: Výpočet asynchronního motoru, VUES, TZ-1600.

[6] Kopylov, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů, Praha, SNTL, 1988.

[7] Klimeš, B. a kol.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky, Praha, SPN, 1988.

[8] Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P.: Elektrické stroje, Praha, ČVUT, říjen 2001.

PŘÍLOHA 1

Konstanty vzniklé při určování vztahů identifikujících parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle obr.2.2.b).

$$K_1 = R_{Fe} R_X s_A$$

$$R_X = R_A - R_1$$

$$R_Y = R_B - R_1$$

$$K_2 = \omega^2 R_X^2 - 2\omega^2 R_{Fe} R_X + \omega^4 L_A^2 + \omega^2 R_{Fe}^2$$

$$K_3 = \omega^2 L_A^2 R_{Fe}^2 + R_{Fe}^2 R_X^2$$

$$K_4 = \omega^2 L_A R_{Fe}^2$$

$$K_5 = \omega^4 L_A L_B \frac{s_A}{s_B} + \omega^2 R_X R_Y + \omega^2 R_{Fe}^2 - \omega^2 R_{Fe} \left(R_X + R_Y\right)$$

$$K_6 = \omega^2 L_B R_{Fe} R_X \left(1 - \frac{s_A}{s_B}\right) - \omega^2 L_B R_{Fe}^2$$

$$K_7 = \omega^2 L_A L_B R_{Fe}^2 + R_{Fe}^2 R_X R_Y \frac{s_A}{s_B}$$

$$K_8 = K_6 + \omega^2 L_A R_{Fe} R_Y \left(1 - \frac{s_A}{s_B}\right) - \omega^2 L_A R_{Fe}^2$$

$$K_9 = K_4 K_5 + K_2 K_6$$

$$K_{10} = \frac{1}{2}\left(K_3 K_5 + 2K_4 K_6 - K_2 K_7 - K_4 K_8\right)$$

$$K_{11} = K_3 K_6 - K_3 K_8 - K_4 K_7$$

PŘÍLOHA 2

Typ: AOM090L02-016, 400 V–, 2.2 kW, 4.5 A, 2 860 min^{-1}, tř.isol. F,50 Hz, cos φ 0.88

Odpory za studena:

$R_{U\text{-}V}$ [Ω] 5,84

$R_{U\text{-}W}$ [Ω] 5,82

$R_{V\text{-}W}$ [Ω] 5,82

Izolační odpor:

R_{izol} [MΩ] >5,84

Elektrická odolnost:

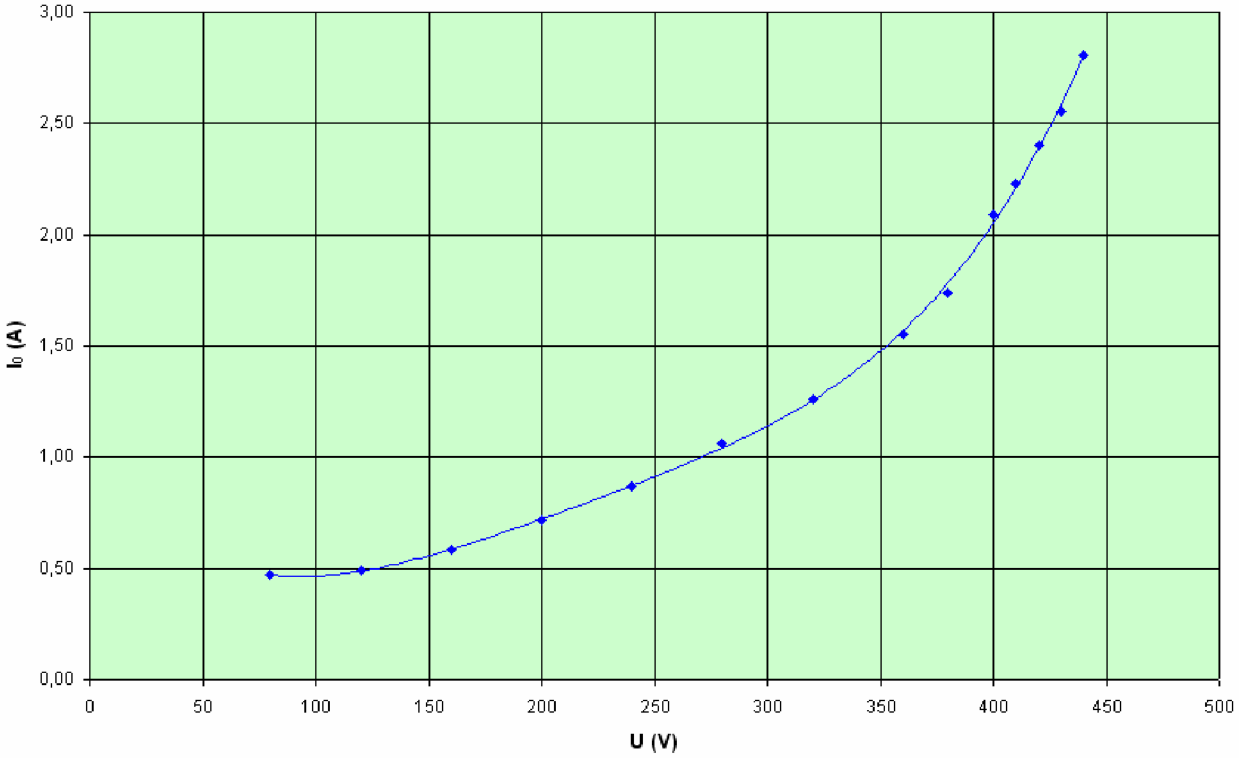
U_Z [kV] 2,0

t [s] 1,0

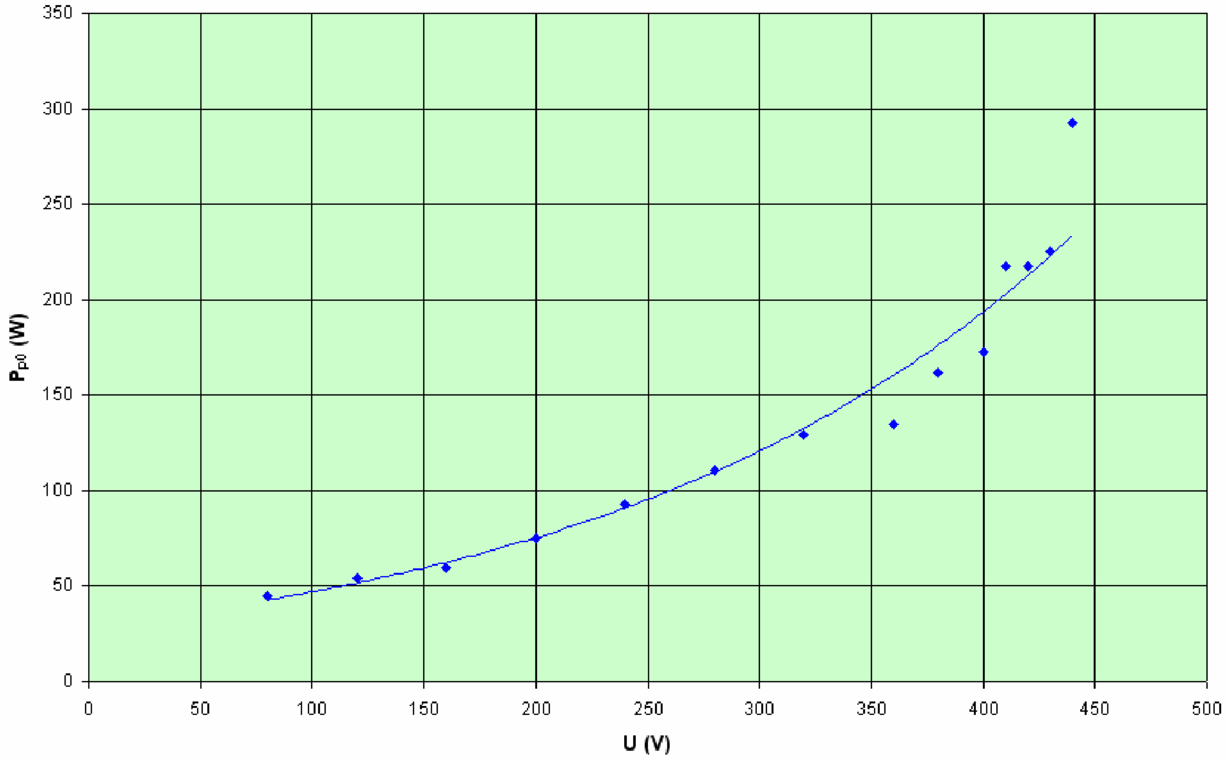
Protokol o typové zkoušce – Zkouška naprázdno, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-1. Hodnoty z měření naprázdno

U_0	V	80	120	160	200	240	280	320	360	380	400	410	420	430	440
I_U	d	1,21	1,25	1,55	1,85	2,31	2,81	3,21	4,05	4,43	2,17	2,25	2,38	2,59	2,75
I_V	d	1,18	1,24	1,45	1,81	2,15	2,64	3,23	3,95	4,45	2,17	2,33	2,51	2,61	2,96
I_W	d	1,14	1,19	1,39	1,71	2,05	2,49	3,04	3,63	4,15	1,94	2,12	2,32	2,47	2,71
Φ	d	1,18	1,23	1,46	1,79	2,17	2,65	3,16	3,88	4,34	2,09	2,23	2,40	2,56	2,81
k	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1	1	1	1
I_O	A	0,47	0,49	0,59	0,72	0,87	1,06	1,26	1,55	1,74	2,09	2,23	2,40	2,56	2,81
α	d	4,5	7,0	11,0	16,5	22,5	31,5	42,5	54,5	64,0	30,5	34,5	37,5	41,0	47,0
±	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β	d	3,0	2,0	1,0	4,0	7,0	13,0	21,0	32,0	37,0	19,0	20,0	23,0	26,0	27,5
Σ	d	7,5	9,0	10,0	12,5	15,5	18,5	21,5	22,5	27,0	11,5	14,5	14,5	15,0	19,5
k	-	6	6	6	6	6	6	6	6	6	15	15	15	15	15
P_{po}	W	45,0	54,0	60,0	75,0	93,0	111,0	129,0	135,0	162,0	172,5	217,5	217,5	225,0	292,5



Obr.P2-1.1. Graf závislosti proudu na napětí při měření naprázdno.

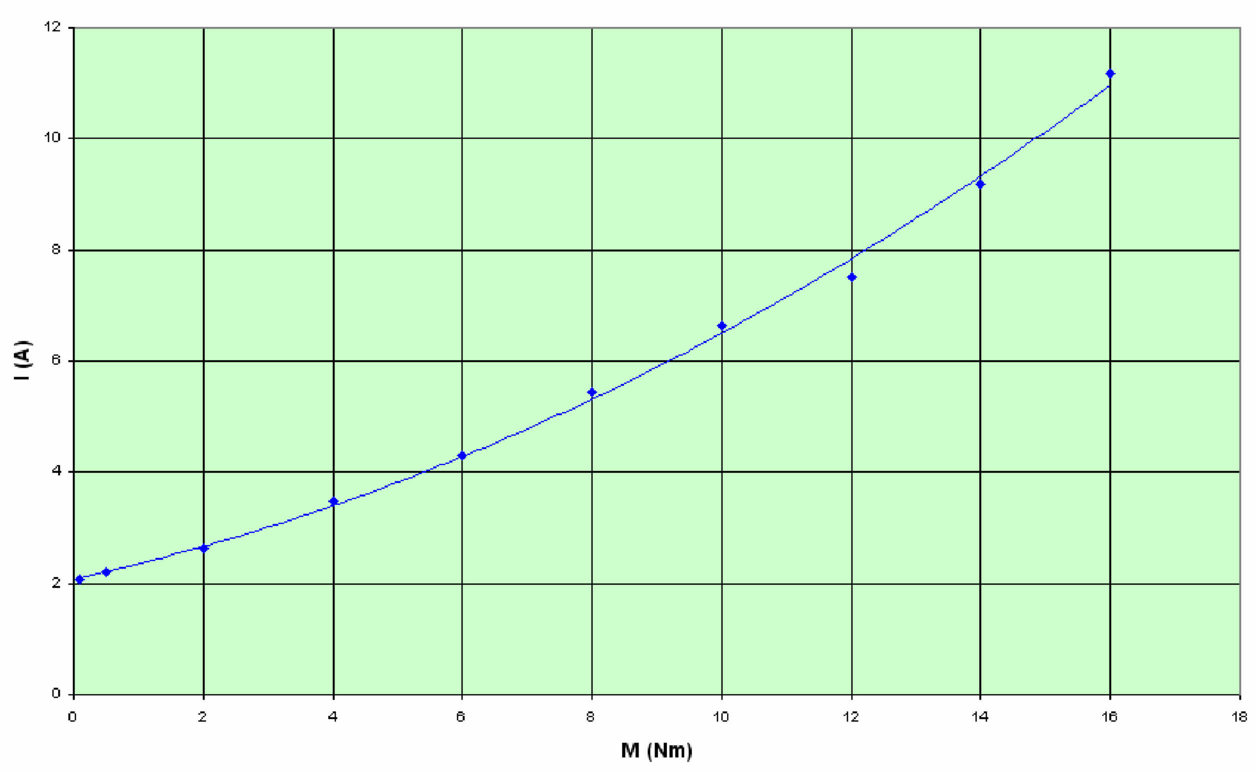


Obr.P2-1.2. Graf závislosti příkonu na napětí při měření naprázdno.

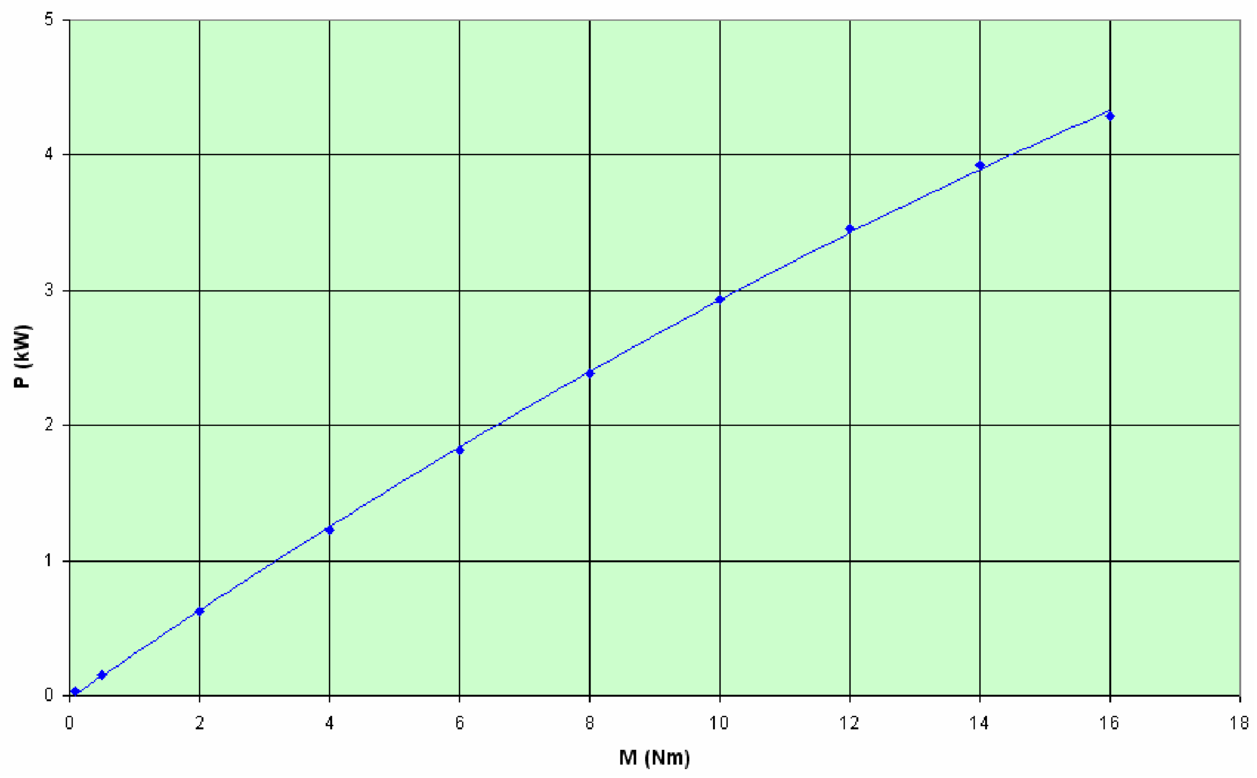
Protokol o typové zkoušce – Zkouška zatěžovací, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-2. Hodnoty z měření při zatížení (U_1 = konst.)

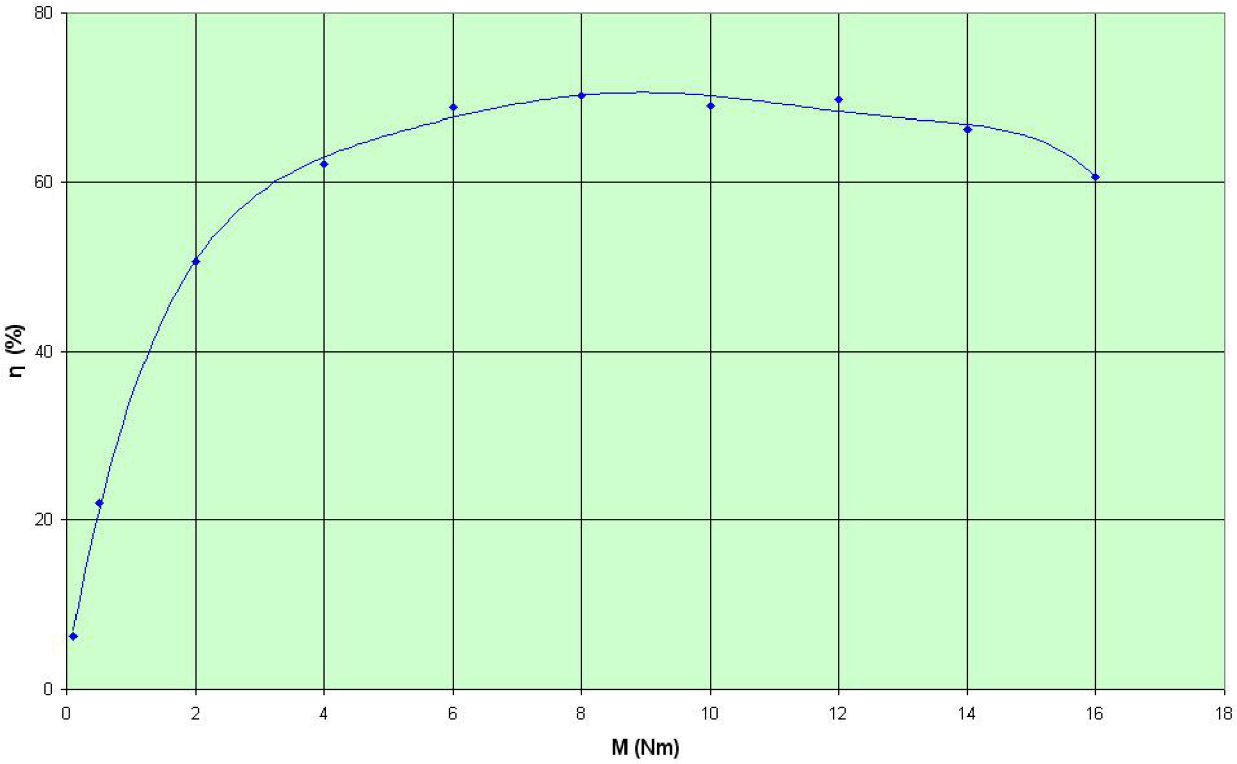
U_1	V	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
I_U	d	2,08	2,25	2,64	3,51	4,35	2,75	3,34	3,75	4,59	2,80
I_V	d	2,15	2,25	2,66	3,49	4,36	2,71	3,32	3,75	4,61	2,79
I_W	d	1,95	2,15	2,55	3,40	4,22	2,69	3,31	3,76	4,56	2,80
Φ	d	2,06	2,22	2,62	3,47	4,31	2,72	3,32	3,75	4,59	2,80
k	-	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4
I_1	A	2,06	2,22	2,62	3,47	4,31	5,44	6,64	7,50	9,18	11,20
α	d	39,0	46,0	64,0	90,5	114,0	71,0	88,0	102,0	121,5	72,5
±	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β	d	6,0	1,0	17,5	41,0	62,0	42,5	54,0	63,5	76,0	46,0
Σ	d	33,0	47,0	81,5	131,5	176,0	113,5	142,0	165,5	197,5	118,0
k	-	15	15	15	15	15	30	30	30	30	60
P_{p1}	kW	0,495	0,705	1,222	1,973	2,640	3,405	4,260	4,965	5,925	7,080
M	Nm	0,1	0,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0
n	min^{-1}	2983	2974	2953	2922	2892	2853	2804	2755	2676	2559
P_1	kW	0,031	0,156	0,618	1,224	1,817	2,390	2,936	3,462	3,923	4,287
η	%	6,310	22,086	50,587	62,047	68,824	70,189	68,923	69,724	66,210	60,556
cos φ	-	0,347	0,495	0,674	0,821	0,884	0,905	0,925	0,955	0,932	0,914



Obr.P2-2.1. Graf závislosti proudu na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.).



Obr.P2-2.2. Graf příkonu na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.).

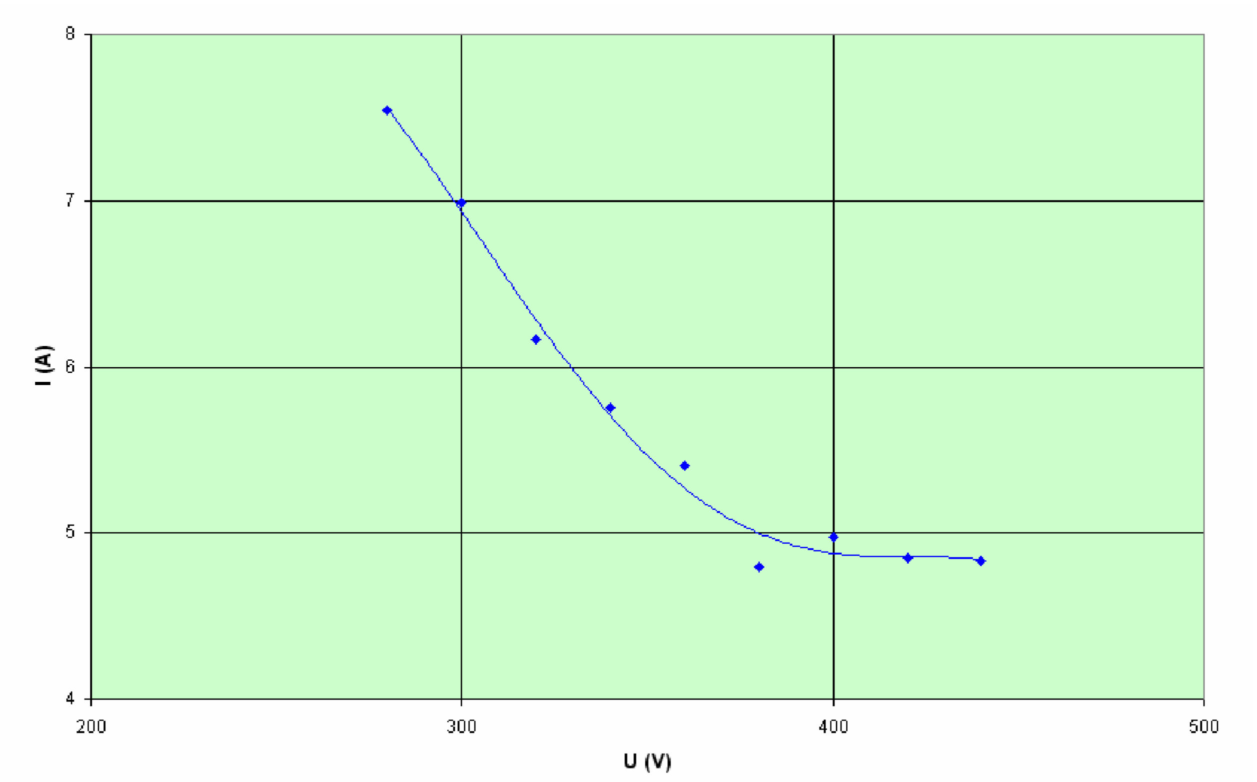


Obr.P2-2.3. Graf závislosti účinnosti na momentu při zatěžovací zkoušce (U_1 = konst.).

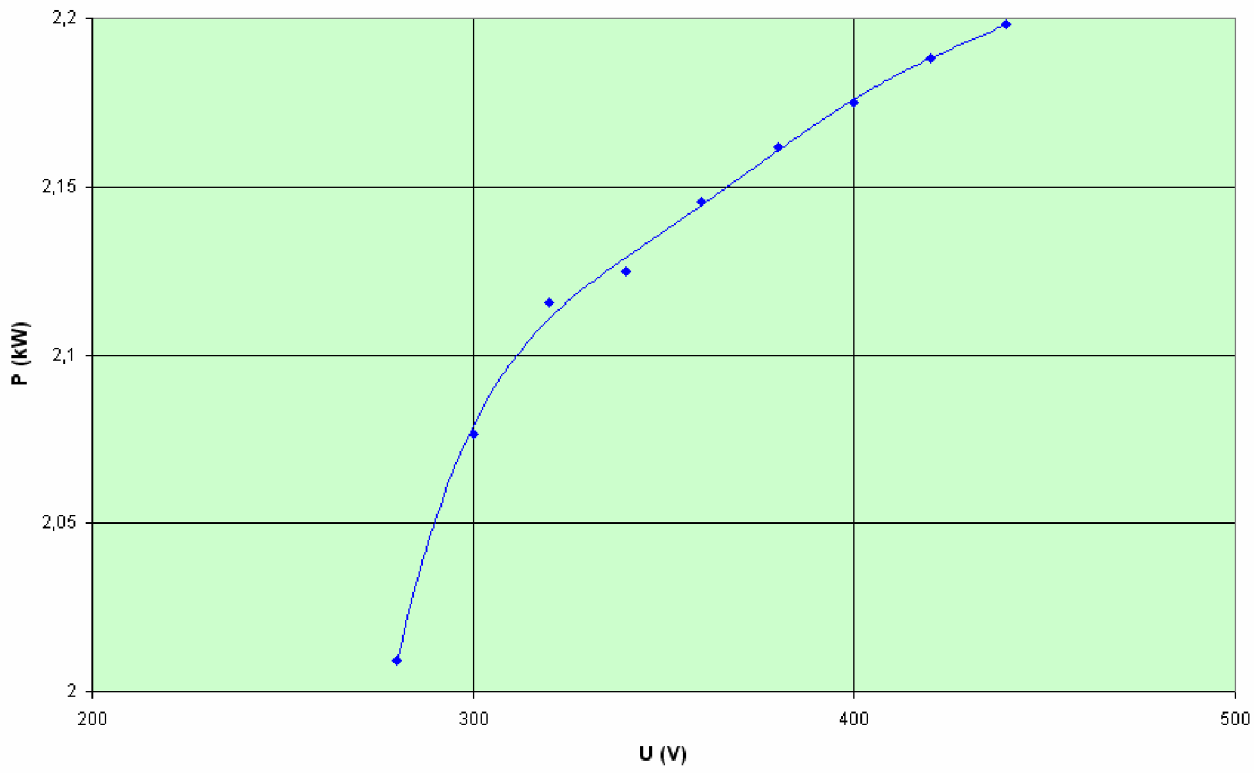
Protokol o typové zkoušce – Zkouška zatěžovací, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-3. Hodnoty z měření při zatížení (M = konst.)

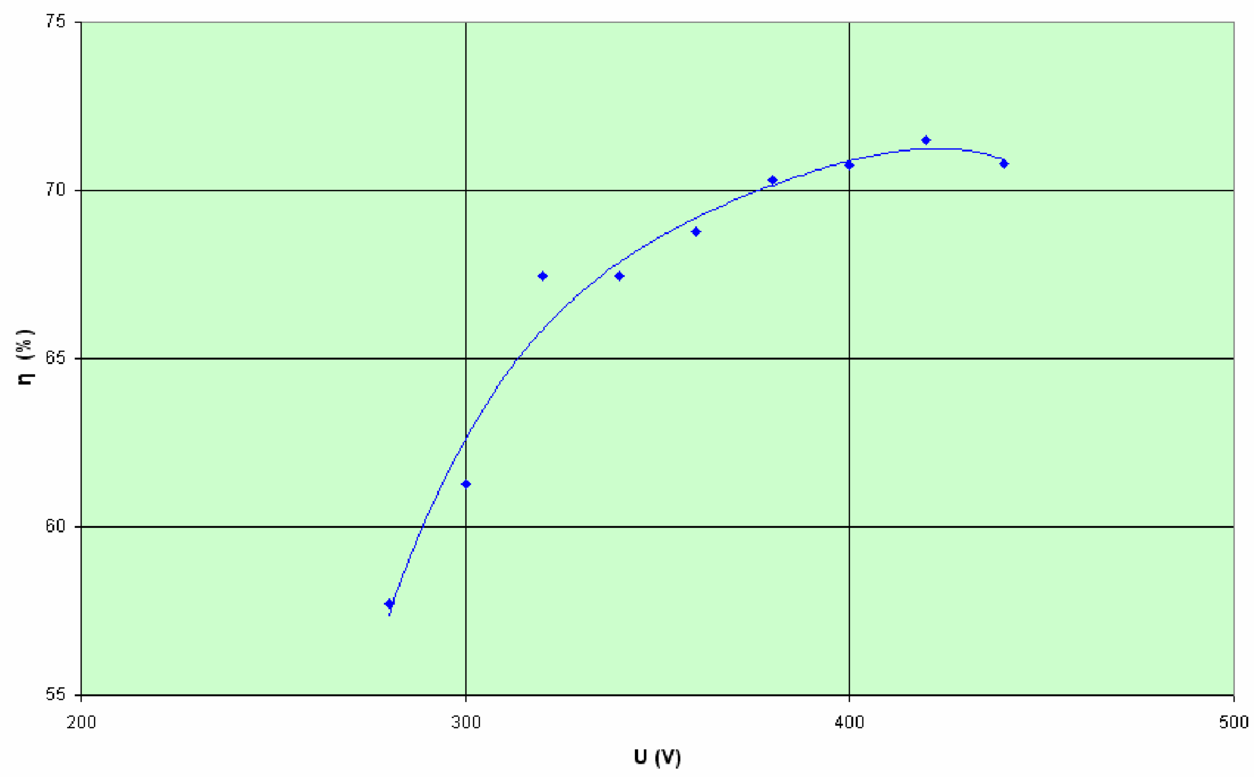
U_1	V	440	420	400	380	360	340	320	300	280
I_U	d	2,45	2,47	2,52	2,60	2,74	2,91	3,09	3,49	3,77
I_V	d	2,46	2,45	2,51	2,58	2,69	2,88	3,11	3,51	3,79
I_W	d	2,34	2,36	2,43	2,01	2,68	2,84	3,05	3,48	3,75
Φ	d	2,42	2,43	2,49	2,40	2,70	2,88	3,08	3,49	3,77
k	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
I_1	A	2,84	2,86	4,98	4,80	5,40	5,76	6,16	6,98	7,54
α	d	69,0	66,0	64,5	63,5	64,0	64,0	64,0	69,0	72,0
±	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β	d	34,5	36,0	38,0	39,0	40,0	41,0	40,5	44,0	44,0
Σ	d	103,5	102,0	102,5	102,5	104,0	105,0	104,5	113,0	116,0
k	-	30	30	30	30	30	30	30	30	30
P_{p1}	kW	3,105	3,060	3,075	3,075	3,120	3,150	3,135	3,390	3,480
M	Nm	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
n	min^{-1}	2837	2824	2807	2790	2769	2742	2730	2680	2593
P_1	kW	2,198	2,188	2,175	2,162	2,146	2,125	2,115	2,077	2,009
η	%	70,799	71,511	70,734	70,305	68,770	67,451	67,477	61,258	57,737
cos φ	-	0,843	0,867	0,892	0,975	0,925	0,930	0,917	0,934	0,952



Obr.P2-3.1. Graf závislosti proudu na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.).



Obr.P2-3.2. Graf závislosti výkonu na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.).

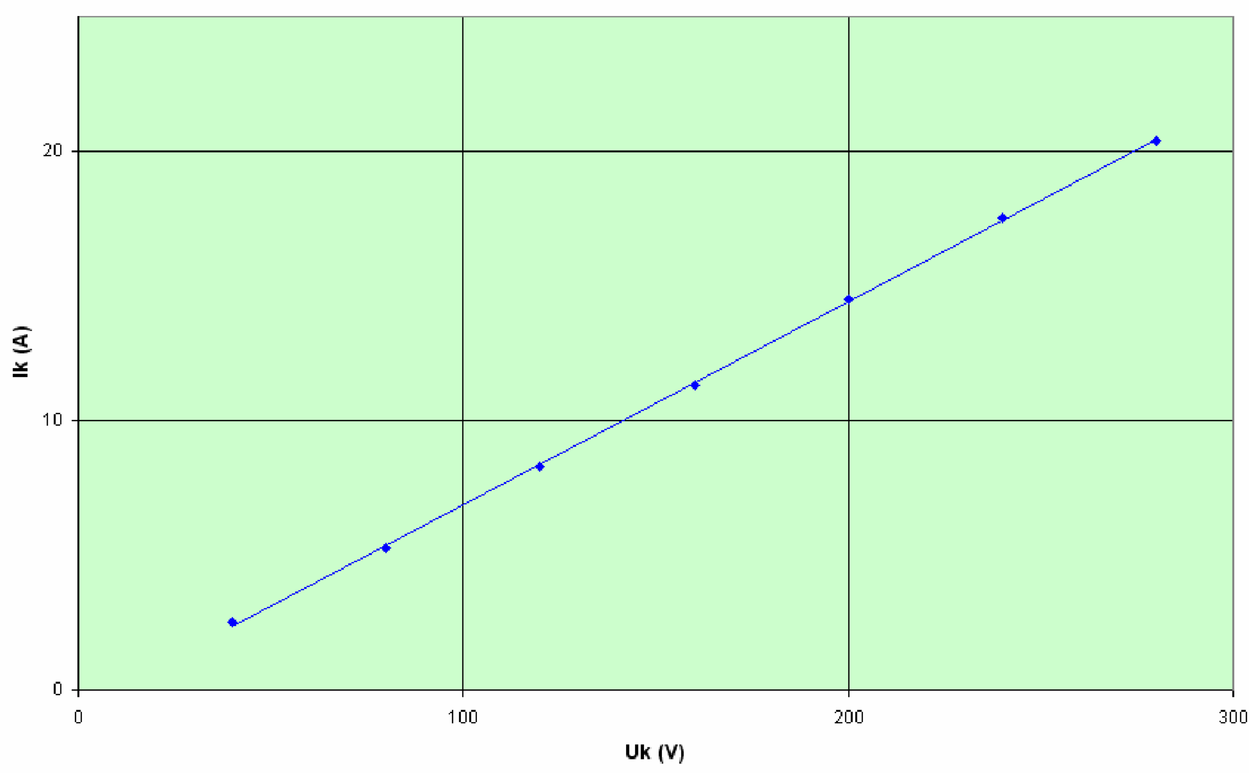


Obr.P2-3.3. Graf závislosti účinnosti na napětí při zatěžovací zkoušce (M = konst.).

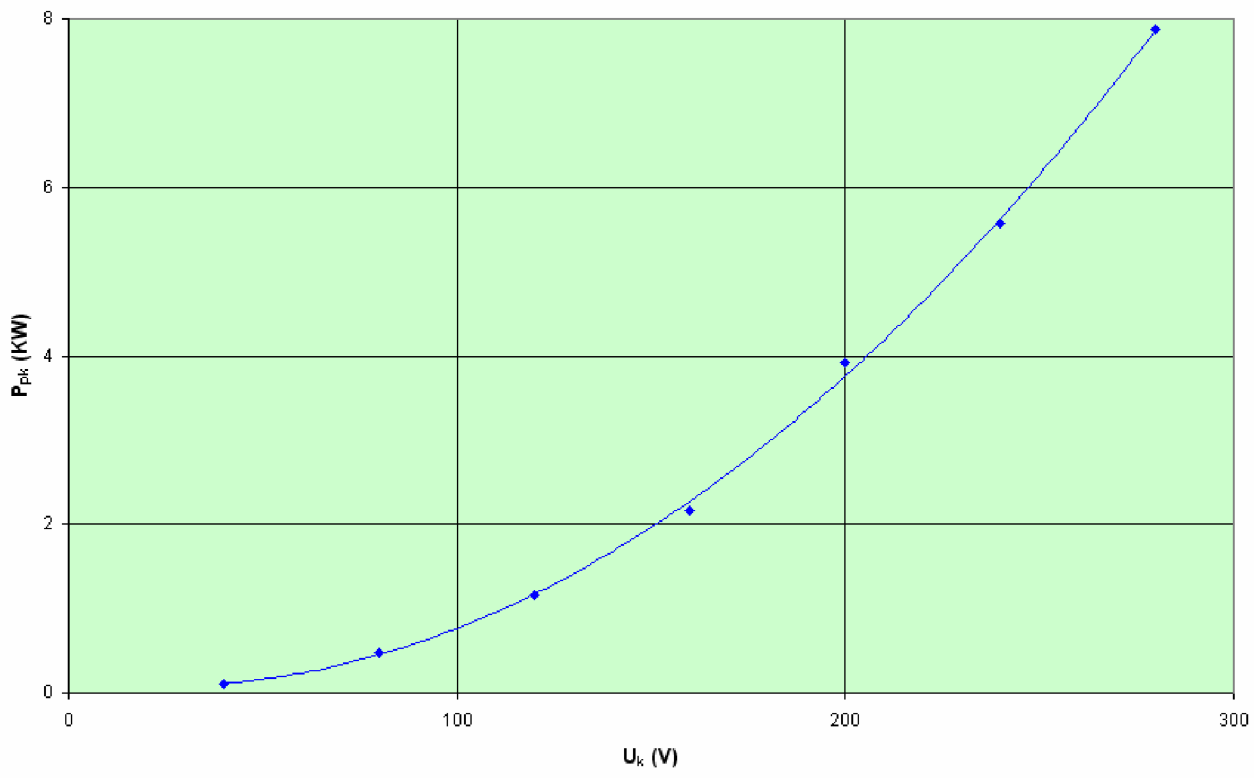
Protokol o typové zkoušce – Zkouška nakrátko, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-4. Hodnoty z měření při zkoušce nakrátko

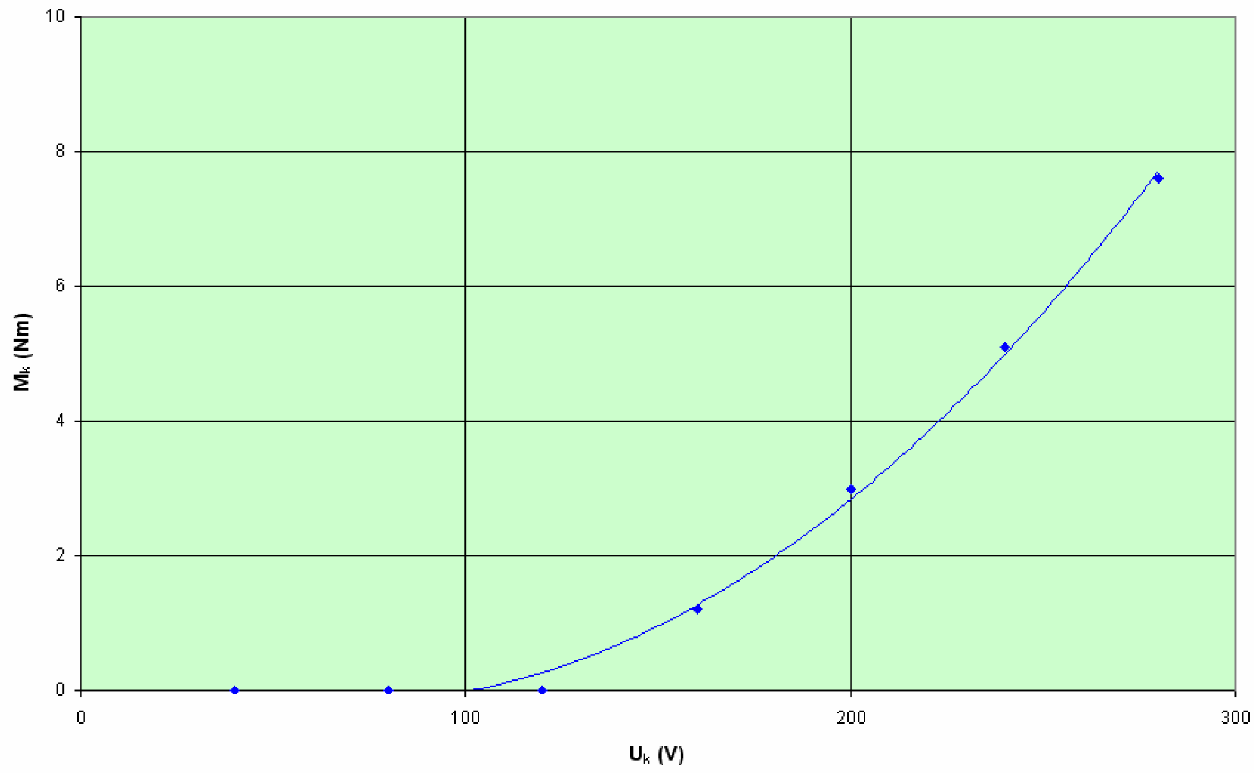
U_k	V	40	80	120	160	200	240	280
I_U	d	2,50	2,61	4,15	2,85	3,61	4,40	2,05
I_V	d	2,56	2,66	4,18	2,80	3,65	4,35	2,05
I_W	d	2,55	2,62	4,15	2,84	3,62	4,40	2,02
Φ	d	2,54	2,63	4,16	2,83	3,63	4,38	2,04
k	-	1	2	2	4	4	4	10
I_k	A	2,54	5,26	8,32	11,32	14,51	17,53	20,40
α	d	19,5	41,0	96,0	44,0	77,0	105,0	39,0
±	-	+	+	+	+	+	+	+
β	d	3,0	6,5	20,0	10,0	21,0	34,5	13,5
Σ	d	22,5	47,5	116,0	54,0	98,0	139,5	52,5
k	-	5	10	10	40	40	40	150
P_{pk}	kW	0,113	0,475	1,160	2,160	3,920	5,580	7,875
M_k	Nm	0	0	0	1,2	3,0	5,1	7,6



Obr.P2-4.1. Graf závislosti proudu na napětí při zkoušce nakrátko.



Obr.P2-4.2. Graf závislosti příkonu na napětí při měření nakrátko.

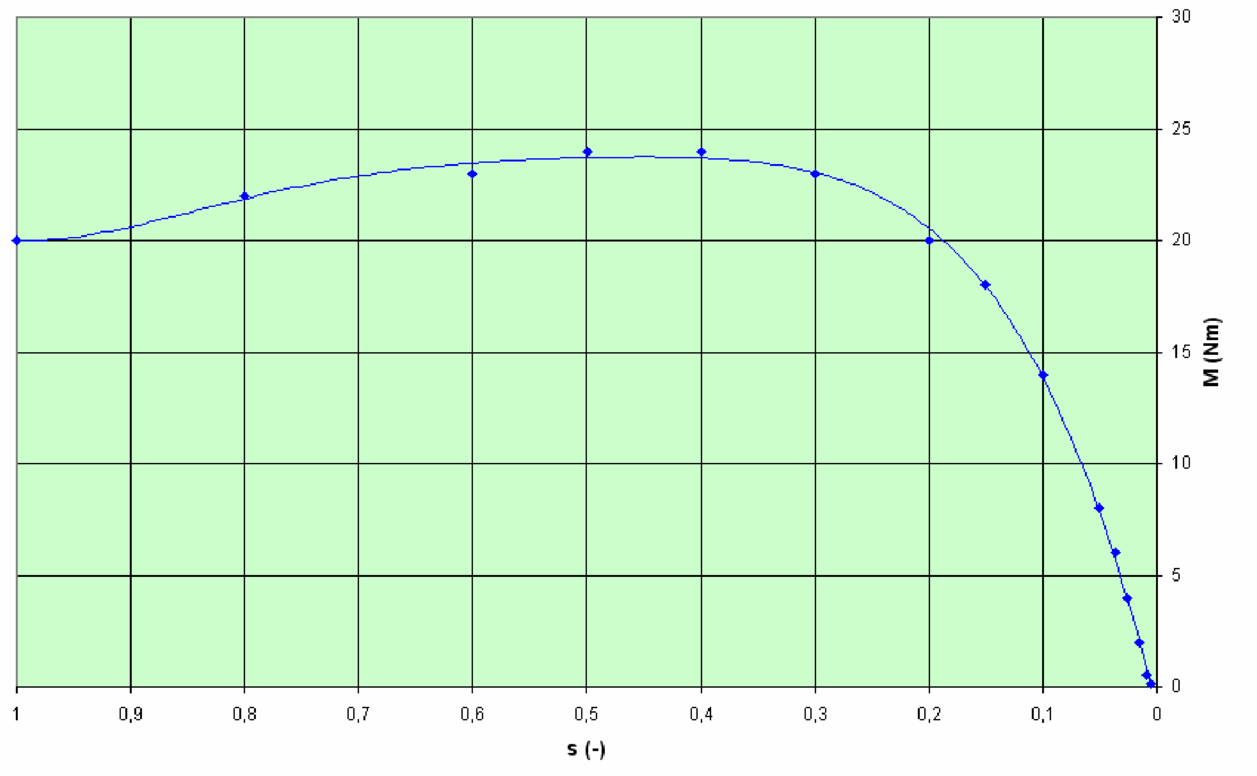


Obr.P2-4.3. Graf závislosti momentu na napětí při měření nakrátko.

Protokol o typové zkoušce – Momentová charakteristika, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-5. Hodnoty z měření při měření momentové charakteristiky

U_1	I_1	P_1	cos φ	n	M	s
V	A	kW	-	min^{-1}	Nm	-
400	2,06	0,030	0,347	2983	0,1	0,005667
400	2,62	0,618	0,674	2953	2,0	0,015667
400	3,47	1,223	0,821	2922	4,0	0,026000
400	4,92	2,430	0,874	2850	8,0	0,050000
400	8,40	3,930	0,908	2700	16,0	0,100000
400	11,37	4,720	0,903	2550	20,0	0,150000
400	13,88	5,060	0,892	2400	23,0	0,200000
400	17,92	5,000	0,872	2100	26,0	0,300000
400	21,06	4,490	0,857	1800	27,0	0,400000
400	23,56	3,770	0,845	1500	27,0	0,500000
400	25,58	2,980	0,835	1200	26,0	0,600000
400	28,46	1,390	0,814	600	24,0	0,800000
400	30,27	0	0,792	0	23,0	1,000000

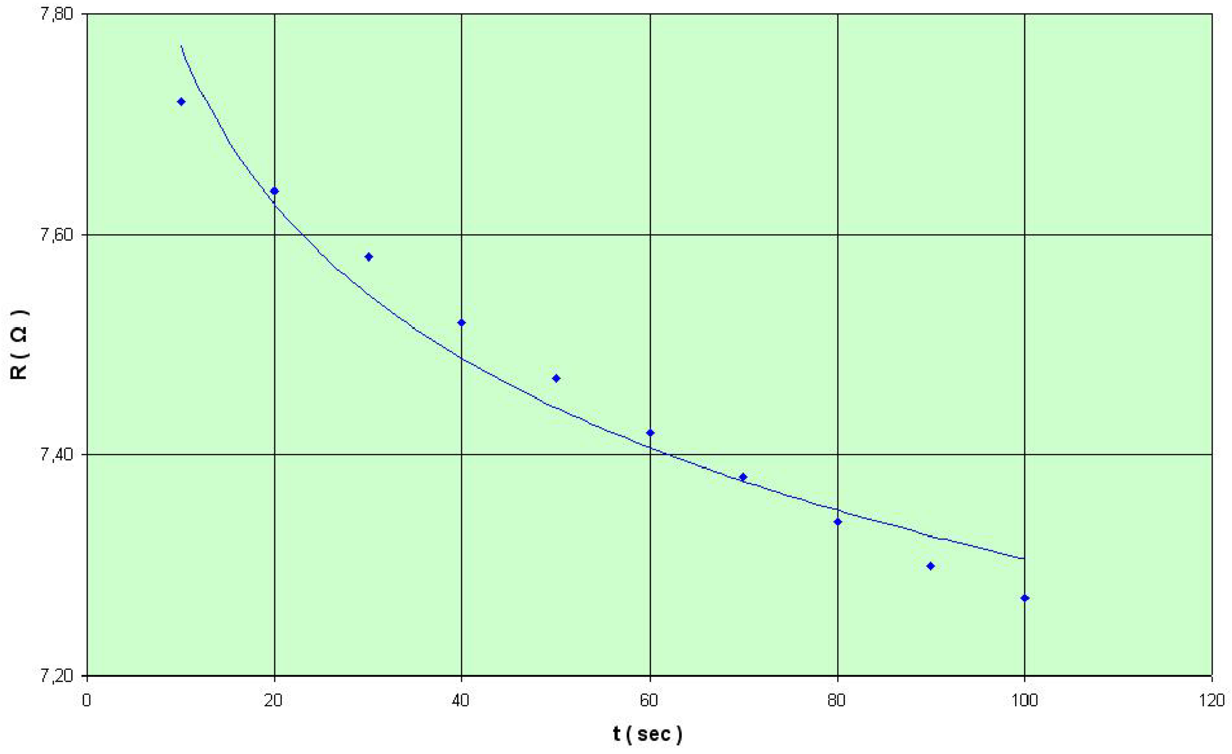


Obr.P2-5.1. Momentová charakteristika.

Protokol o typové zkoušce – Zkouška oteplovací, motor AOM090L02-016, v.č.6204718

Tabulka P2.-6. Hodnoty z měření při zkoušce oteplení (M = 7,4Nm, U = 400V)

U_1	V	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
t	min	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I_U	d	5,20	5,04	5,10	5,14	5,10	5,16	5,16	5,16	5,08	5,10
I_V	d	5,30	5,14	5,14	5,06	5,14	5,06	5,08	5,08	5,10	5,10
I_W	d	5,20	5,00	5,06	5,04	5,14	5,08	5,04	5,06	5,12	5,12
Φ	d	5,23	5,06	5,10	5,09	5,13	5,15	5,09	5,10	5,10	5,11
k	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_1	A	5,23	5,06	5,10	5,09	5,13	5,15	5,09	5,10	5,10	5,11
α	d	61,0	59,0	60,0	60,0	59,0	60,0	60,0	59,5	59,0	60,0
±	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β	d	37,0	37,0	37,0	36,0	37,0	36,0	36,0	36,0	36,5	36,0
Σ	d	98,0	96,0	97,0	96,0	96,0	96,0	96,0	95,5	95,5	96,0
k	-	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
P_{p1}	kW	2,940	2,880	2,910	2,880	2,880	2,880	2,880	2,865	2,865	2,880
M	Nm	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
n	min^{-1}	2854	2822	2811	2809	2808	2807	2807	2808	2808	2808
P_1	kW	2,209	2,184	2,176	2,174	2,174	2,173	2,173	2,174	2,174	2,174
η	%	75,14	75,85	74,77	75,47	75,47	75.44	75,44	75,88	75,88	75,47
cos φ	-	0,811	0,821	0,824	0,817	0,810	0,807	0,817	0,811	0,811	0,814
$t_{okolí}$	°C	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
t_{pov}	°C	21	48,0	52,0	54,0	55,0	55,0	56,0	55,0	55,0	55,0
t_{svo}	°C	21	34,5	39,0	42,0	48,0	49,0	49,0	48,5	49,0	49,0
t_{kab}	°C	21,0	33,0	37,0	40,5	43,5	44,5	45,0	45,5	45,5	46,0
t	sec	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R_{U-V}	Ω	7,72	7,64	7,58	7,52	7,47	7,42	7,38	7,34	7,30	7,27



Obr.P2-6.1. Graf závislosti odporu na čase