

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

SPECIÁLNÍ ASYNCHRONNÍ MOTOR JAKO ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

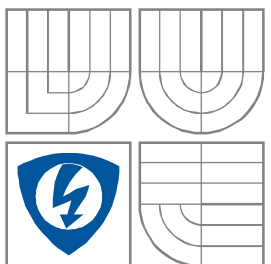
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Dušek

BRNO 2008



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 RADIO ELECTRONICS

SPECIÁLNÍ ASYNCHRONNÍ MOTOR JAKO ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE

SPECIAL INDUCTION MACHINE AS SOURCE OF ELECTRIC ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Dušek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Miroslav Skalka

BRNO, 2008



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: Dušek Jiří

Ročník: 3

ID: 78036

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši dané problematiky
2. Změňte zatěžovací charakteristiky pro daný stroj
3. Výsledky zpracujte a porovnejte pro různé zapojení statorového vnutí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 10.10.2007

Termín odevzdání: 06.06.2008

Vedoucí projektu: Ing. Miroslav Skalka

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: Jiří Dušek

Bytem: Jamborova 12, Žďár nad Sázavou 7, 591 01

Narozen/a (datum a místo): 3.8.1985, Nové město na Moravě

(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: Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Miroslav Skalka

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 16.6.2008

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 užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování 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
 Y 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 tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

V této práci je popsán princip funkce asynchronního stroje jak v motorickém, tak i v generátorickém režimu. Podrobněji se tato práce zabývá využitím speciálního asynchronního stroje jako generátoru elektrické energie pracující do samostatné zátěže. V práci je popsán návrh budicí kapacity nutné ke správné funkci asynchronního generátoru. V závěru práce je provedeno vyhodnocení měření na konkrétním asynchronním stroji s různou velikostí budicí kapacity a způsobem zapojení svorkovnice.

Klíčová slova

Asynchronní generátor, nabuzení, budicí kapacita, samostatná síť, svorkovnice, svorka

Abstract

This work deals with description of an induction machine principles for both of motor and generator operations. Then is been described a special kind of an induction generator working into an isolated system. The construction of an induction generator was designed with two stator winding connection due to possibility of the variable number of pole pairs. Also there is an excitation capacity design for self-excitation. Last part of this work contains the measurement of an induction generator with different values of excitation capacity and both terminal clamps connection.

Keywords

Induction generator, self-excitation, excitation capacity, isolated system, terminal, clamp

Bibliografická citace

DUŠEK, J. *Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 85 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Skalka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Speciální asynchronní motor jako generátor elektrické energie 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

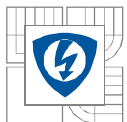
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Skalkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Zvláštní dík patří mé rodině za morální a materiální podporu během studia.

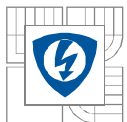
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 Úvod.....	16
2 Asynchronní stroj obecně.....	17
2.1 Konstrukce asynchronního stroje	17
2.2 Princip činnosti.....	17
3 Asynchronní stroj jako generátor elektrické energie.....	21
3.1 Asynchronní generátor připojený k veřejné trojfázové síti	21
3.2 Asynchronní generátor připojený k izolované síti.....	21
3.3 Nabuzení izolovaného asynchronního generátoru.....	22
3.4 Návrh budící kapacity	24
4 Měřený stroj	26
4.1 Druh měřeného stroje.....	26
4.1.1 Motory s oddělenými statorovými vinutími	26
4.1.2 Motory s dělenými vinutími statoru (Dahlanderovo zapojení)	26
4.1.3 Velikost statorového proudu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru	28
4.1.4 Velikost výkonu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru	28
4.1.5 Velikost momentu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru	29
5 Měření na asynchronním generátoru	31
5.1 Schéma zapojení	32
5.2 Popis měření	33
5.3 Budící kapacita	33
5.4 Použité kondenzátory	34
5.5 Připojení svorkovnice asynchronního generátoru.....	35
5.5.1 Zapojení YY	35
5.5.2 Zapojení D	36
5.6 Chyba měření	37
5.6.1 Výpočet chyby měření proudu.....	37
5.6.2 Výpočet chyby měření napětí	39
5.6.3 Výpočet chyby měření otáček.....	40
6 Porovnání výsledků.....	41
7 Závěr.....	49
literatura.....	50
Přílohy	51
Příloha č.1.....	51
Příloha č.2: Zapojení YY, C=14 μ F	52
Příloha č.3: Zapojení YY, C=28,5 μ F	59
Příloha č.4: Zapojení D, C=14 μ F	67
Příloha č.5: Zapojení D, C=28,5 μ F	75
Příloha č.6: Grafy generovaných veličin AG.....	83



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Vznik točivého momentu asynchronního motoru</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.2: Momentová charakteristika asynchronního motoru</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2.3: Energetická bilance asynchronního motoru.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.1: Náhradní schéma jedné fáze asynchronního stroje se zanedbáním R_{Fe}.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2: Nabuzení asynchronního stroje.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.3: Způsoby připojení budící kapacity k AS generátoru a) spojení do hvězdy b) spojení do trojúhelníku</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.1: Možné způsoby připojení statorového vinutí k síti. a) zapojení YY b) zapojení D.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.2: Realizace zapojení na svorkovnici stroje</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.3: Měřený asynchronní stroj.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik na asynchronním generátoru</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.2: Zapojení měřicích přístrojů a zátěže.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.3: Vytvoření kapacity $C=28,5\mu F$.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.4: Kondenzátory v zapojení pro $C=28,5\mu F$.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.5: Celkové připojení kondenzátorové baterie $C=3x28,5\mu F$ k AG</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.6: Zapojení svorkovnice pro realizaci zapojení YY.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.7: Zapojení svorkovnice pro realizaci zapojení D</i>	<i>36</i>

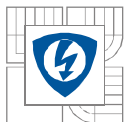


SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=14\mu F$, $U=180V=konst$.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 2: Pokračování tabulky č.1.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=14\mu F$, $U=160V=konst$.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4: Pokračování tabulky č.3.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=14\mu F$, $U=140V=konst$.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 6: Pokračování tabulky č.5.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=14\mu F$</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 8: Odbuzení asynchronního generátoru, Zapojení YY, $C=14\mu F$</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 9: Měření při zapojení YY, $C=14\mu F$, $n=konst$.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 10: Pokračování tabulky č.9.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $U=180V=konst$</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 12: Pokračování tabulky č.11.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 13: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $U=160V=konst$</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 14: Pokračování tabulky č.13.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 15: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $U=140V=konst$</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 16: Pokračování tabulky č.15.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 17: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=28,5\mu F$</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 18: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=28,5\mu F$</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 19: Měření při zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $n=konst$.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 20: Pokračování tabulky č.19.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 21: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=14\mu F$, $U=180V=konst$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 22: Pokračování tabulky č.21.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 23: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=14\mu F$, $U=160V=konst$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 24: Pokračování tabulky č.23.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 25: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=14\mu F$, $U=140V=konst$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 26: Pokračování tabulky č.25.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 27: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=14\mu F$.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 28: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=14\mu F$.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 29: Měření při zapojení D, $C=14\mu F$, $n=konst$.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 30: Pokračování tabulky č.29.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 31: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=28,5\mu F$, $U=180V=konst$.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 32: Pokračování tabulky č.31.....</i>	<i>75</i>



<i>Tabulka 33: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=28,5\mu F$, $U=160V=konst$.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 34: Pokračování tabulky č.33.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 35: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=28,5\mu F$, $U=140V=konst$.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 36: Pokračování tabulky č.35.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 37: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=28,5\mu F$.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 38: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=28,5\mu F$.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 39: Měření při zapojení D, $C=28,5\mu F$, $n=konst$</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 40: Pokračování tabulky č.39.....</i>	<i>81</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ZNAČKA	VELIČINA	JEDNOTKA
AG	asynchronní generátor	-
AM	asynchronní motor	-
AS	asynchronní stroj	-
C	kapacita budícího kondenzátoru pro zapojení do hvězdy	F
C_{Δ}	kapacita budícího kondenzátoru pro zapojení do trojúhelníku	F
f_1	kmitočet statorového proudu	Hz
f_2	kmitočet magnetického pole ve vzduchové mezeře	Hz
f_n	jmenovitý kmitočet statorového vinutí	Hz
I_1	proud statoru měřeného stroje	A
I_{10}	proud při měření naprázdno	A
I_{1C}	magnetizační proud kondenzátoru	A
I_{1D}	proud jedné fáze statoru při zapojení vinutí statoru do trojúhelníku	A
I_{1YY}	proud jedné fáze statoru při zapojení vinutí statoru do hvězdy	A
$I_{1\mu}$	magnetizační proud generátoru	A
I_2'	přepočtený proud rotorem generátoru	A
I_n	jmenovitý proud asynchronního stroje	A
k	poměrný proud naprázdno asynchronního stroje	A
M_D	moment měřeného stroje při zapojení vinutí statoru do trojúhelníku	Nm
M_{YY}	moment měřeného stroje při zapojení vinutí statoru do hvězdy	Nm
n_1	otáčky točivého stroje na hřídeli	min^{-1}
n_2	otáčky magnetického pole ve vzduchové mezeře	min^{-1}
n_n	jmenovité otáčky stroje	min^{-1}
n_s	otáčky točivého magnetického pole	min^{-1}
p	počet pólových dvojic	-
P	výkon asynchronního stroje	W
P_1	příkon asynchronního stroje	W
P_D	výkon motoru při zapojení vinutí statoru do trojúhelníku	W
P_n	jmenovitý výkon asynchronního stroje	W
P_{YY}	výkon motoru při zapojení vinutí statoru do hvězdy	W
R_2'	přepočítaný odpor vinutí rotoru	W
R_1	odpor jedné fáze vinutí statoru	Ω
s	skluz	-
U_1	fázové napětí generátoru	V
U_n	jmenovité napětí motoru	V
U_s	sdržené napětí stroje	V
X_{11}	celková reaktance statoru	Ω
$X_{1\sigma}$	rozptylová reaktance statoru	Ω
X_C	kapacitní reaktance statoru	Ω
δ	šířka vzduchové mezery mezi rotorem a statoru	mm
ΔP_d	dodatečné ztráty	W



ΔP_{Fe}	ztráty v železe	W
ΔP_{j1}	Joulovy ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{j2}	Joulovy ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	W
ΔP_{δ}	ztráty přes vzduchovou mezeru	W
VA	voltampérová	
η	účinnost	%
$\cos\varphi_1$	účinník	-
ω_2	úhlová rychlost točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_s	úhlová rychlost točivého magnetického pole statoru	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$



1 ÚVOD

Žijeme v době, kdy ceny energií závratně rostou. Je nasnadě zamyslet se tedy nad možnostmi využití dostupných prostředků, k získání vlastního nezávislého zdroje elektrické energie.

Jednou z možností, jak se této myšlence přiblížit, je vytvořit takový zdroj, který by dokázal dodávat elektrickou energii do sítě vytvořené například synchronními generátory. Zmenší se tak výdaje za spotřebovanou elektrickou energii.

V případě, kdy takováto síť z nějakého důvodu nebude k dispozici (například výpadek proudu nebo porucha), by tento zdroj měl být schopen fungovat jako samostatný generátor elektrické energie.

Chceme-li řešení dostupné pro širokou veřejnost, musí být pořizovací cena a náklady spojené s údržbou co nejnižší, nenáročná obsluha a samozřejmě vysoce spolehlivé.

Tyto požadavky nejlépe splňuje asynchronní stroj, použitý jako generátor poháněný turbínou, kterou otáčí proudící voda (malá vodní elektrárna), nebo vítr (větrná elektrárna). Vzhledem ke konstrukci asynchronního stroje je jeho výroba ve srovnání s jinými elektrickými točivými stroji mnohem levnější. Asynchronní stroj vybavený klecovým rotorem není náročný na údržbu, která je u některých elektrických strojů vzhledem k mechanickým opotřebením nutná a nákladná, například u synchronního stroje s kroužky a kartáči, kde dochází k opotřebením uhlíků. Nevýhodou asynchronního motoru je velký proudový náraz při spouštění a induktivní účinník $\cos \varphi$, způsobující jalové zatížení sítě.

Asynchronní motor potřebuje ke své správné funkci zdroj jalové energie. V případě, že použijeme tento motor jako generátor, který bude dodávat elektrickou energii do již vytvořené sítě, je zdrojem jalové energie síť. Pokud však bude třeba tento motor použít jako zdroj elektrické energie v autonomní síti, kde není zdroj jalové energie, je třeba pro výrobu energie dodat motoru tuto jalovou energii jinak. Nejčastěji používaným způsobem je připojení kondenzátorových baterií paralelně k zátěži.



2 ASYNCHRONNÍ STROJ OBECNĚ

2.1 Konstrukce asynchronního stroje

Asynchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru (kotvy). Stator trojfázového (nebo u malých výkonů jednofázového) asynchronního motoru je tvořen statorovým vinutím, uloženým v drážkách statoru. Konstrukce rotoru je závislá na druhu asynchronního stroje.

Rozlišují se dva druhy asynchronních motorů:

- stroje s kotvou nakrátko
- stroje s kotvou kroužkovou

Stroje s kotvou nakrátko

Jejich rotorové vinutí je zhotoveno z tyčí, které jsou jak na začátku, tak na konci spojeny propojovacími vodičy kruhy.

Stroje s kotvou kroužkovou

Rotor těchto strojů je tvořen třífázovým vinutím, jehož začátky jsou vyvedeny na izolované kroužky na hřídeli. Přes tyto kroužky je pomocí kartáčů vinutí rotoru připojeno k regulačním odporům.

2.2 Princip činnosti

Po připojení trojfázového statorového vinutí na napájecí síť o frekvenci f_1 vytvářejí proudy ve statorovém vinutí ve vzduchové mezeře točivé magnetické pole. Rychlost otáčení tohoto magnetického pole (synchronní otáčky) závisí na frekvenci napájecí sítě f_1 a na počtu pólových dvojic stroje p (pro jednu pólovou dvojici, $p=1$, jsou $n_s=3000 \text{ min}^{-1}$, $p=2 \rightarrow n_s=1500 \text{ min}^{-1}$, $p=3 \rightarrow n_s=1000 \text{ min}^{-1}$ atd.)

$$n_s = \frac{f_1}{p} \quad [\text{s}^{-1}] \quad \text{nebo} \quad n_s = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

A také:

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.2)$$

Indukční čáry točivého magnetického pole protínají vodiče statorového a rotorového vinutí a indukují v nich napětí - proto je asynchronní motor nazýván indukčním strojem. Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě, čímž omezuje statorový proud na hodnotu, pro kterou je stroj navržen. Napětí indukované v rotoru vyvolá v uzavřeném rotorovém vinutí průtok proudu. Na rotorové vinutí, nacházející se v magnetickém poli a protékané proudem, působí mechanická síla jako na každý proudovodič v magnetickém poli. Na základě Lenzova zákona se vodiče začnou vychylovat ve směru otáčení magnetického pole. Rotorové proudy rovněž vytvářejí točivé magnetické pole ve vzduchové mezeře s otáčkami n_2 vzhledem k rotoru.

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.3)$$

Při postupném narůstání otáček se snižuje relativní pohyb vodičů vůči poli, indukované napětí a proud, v důsledku čehož se zmenší síla působící na vodič. Tak dochází k ustálení otáček rotoru na určité hodnotě menší, než jsou synchronní otáčky. Motor ani nemůže dosáhnout synchronních otáček, protože při nich by se neindukovalo napětí a nepůsobila by mechanická síla způsobující točivý moment. V nezátíženém stavu se rotor otáčí otáčkami naprázdno, které jsou téměř shodné se synchronními otáčkami n_s .

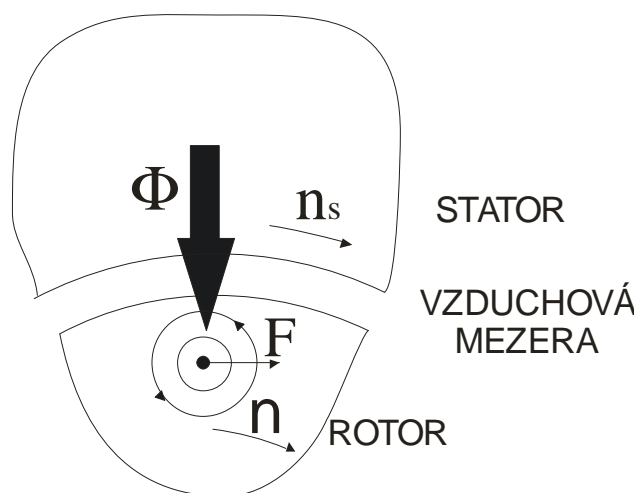
V zatíženém stavu jsou otáčky rotoru n menší než synchronní otáčky n_s . Toto zaostávání se označuje jako skluz, vyjádřený relativní hodnotou:

$$s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{f_2}{f_1} \quad (2.4)$$

Pro otáčky rotoru asynchronního motoru platí vztah:

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.5)$$

Elektrická energie odebíraná ze sítě a vstupující do statoru se prostřednictvím magnetického pole přenáší na rotor a odtud v mechanické formě na hřídel hnaného stroje. Stroj pracuje jako motor a vytváří na hřídeli hnací točivý moment. Tento děj je znázorněn na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Vznik točivého momentu asynchronního motoru

Existují tři režimy práce asynchronního motoru:

a) Generátorický ($s < 0$)

- Zde dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou. O tomto režimu je více napsáno dále.

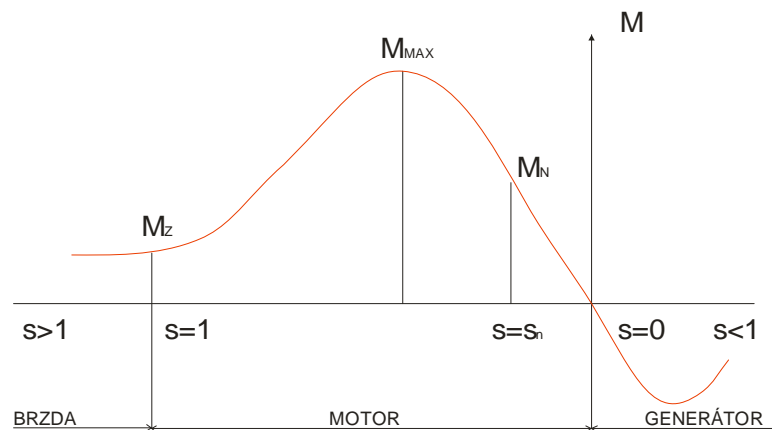
b) Motorický ($0 < s < 1$)

- V tomto režimu dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou.

c) Brzda ($s > 1$)

- Tato situace nastává, pokud se rotor otáčí proti smyslu točení magnetického pole statoru.

Všechny tři režimy jsou znázorněny na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Momentová charakteristika asynchronního motoru

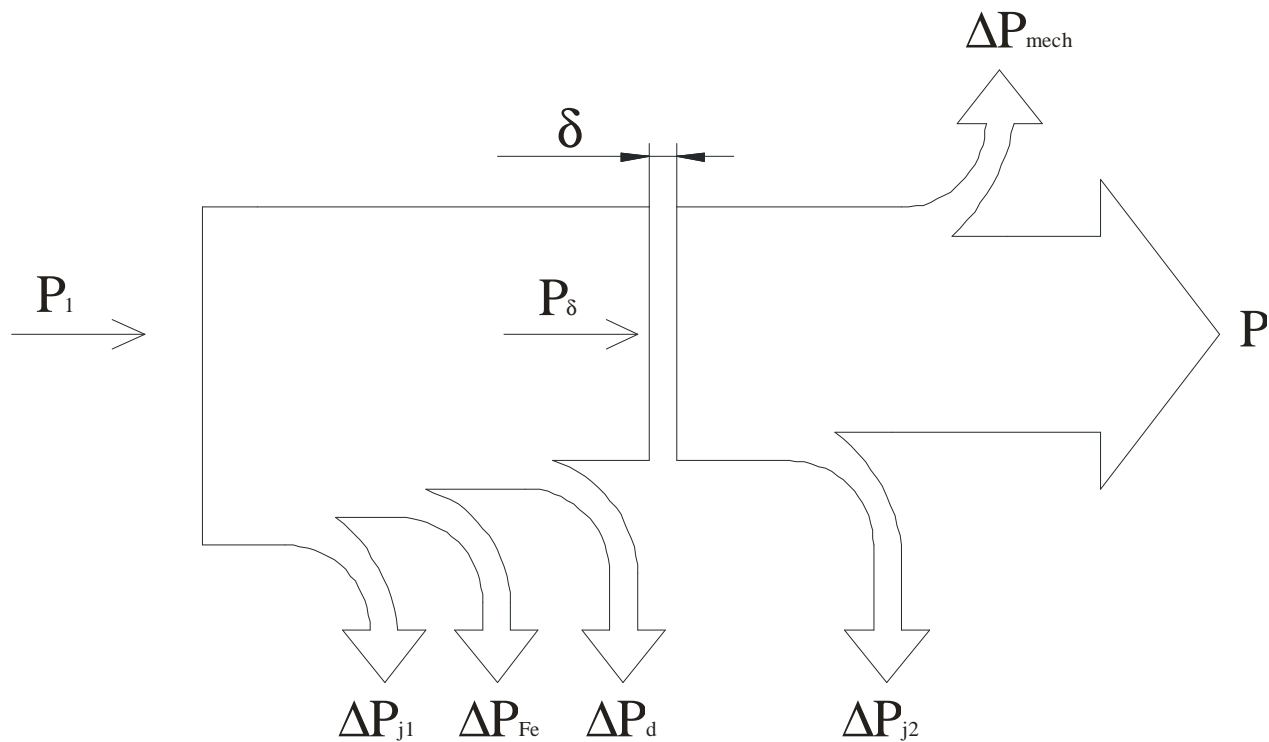
Výkon asynchronního motoru je dán vztahem:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.6)$$

Při přeměně elektrické energie na mechanickou vznikají v motoru následující ztráty:

ΔP_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_d	Dodatečné ztráty
ΔP_{j2}	Ztráty ve vinutí rotoru
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty

Názorněji jsou tyto ztráty znázorněny na Obr. 2.3



Obr. 2.3: Energetická bilance asynchronního motoru

Výkon P je pak rozdíl příkonu P_1 a součtu všech ztrát:

$$P = P_1 - (\Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech}) \quad (2.7)$$



3 ASYNCHRONNÍ STROJ JAKO GENERÁTOR ELEKTRICKÉ ENERGIE

Asynchronní stroje se dnes jako zdroje elektrické energie používají jen velice zřídka, například v malých vodních a větrných elektrárnách.

Nejdříve je třeba vybrat vhodný asynchronní stroj vzhledem k počtu pólů.

Jako logická volba se nabízí stroj s větším počtem pólových dvojic. Pro výrobu elektrické energie by pak stačili nižší otáčky. U takového stroje je ale problém s chlazením, právě kvůli malým otáčkám rotoru. Většinou je totiž chladicí ventilátor připevněn k hřídeli stroje a při malých otáčkách by nedocházelo k dostatečnému ochlazení stroje.

Ani volba stroje s příliš malým počtem pólových dvojic není vhodná. Pro požadovanou frekvenci by musel být rotor stroje roztočen na velmi vysoké otáčky, což by v praxi znamenalo značné komplikace.

Jako ideální se jeví použití stroje s dvěma až třemi pólovými dvojicemi. Je to vhodný kompromis mezi předešlými skupinami strojů. Otáčky nutné k vytvoření požadované frekvence nejsou příliš vysoké a nemusíme se obávat přehřátí stroje, způsobené malými otáčkami rotoru a tím i chladicího ventilátoru.

Pokud má být asynchronní stroj použit jako generátor elektrické energie, je nejdříve třeba vědět, jakého charakteru je síť, do které bude tento generátor dodávat energii. Mohou nastat tyto případy:

3.1 Asynchronní generátor připojený k veřejné trojfázové síti

Princip tohoto řešení je velice prostý. Pro připojení generátoru není nutné fázovat zdroj na síť, podobně jako je to třeba u synchronních generátorů. Obsluha je velmi jednoduchá a lze ji snadno automatizovat. Vodní motor je zpočátku uzavřený. Generátor se připojí k síti. Začne pracovat jako elektromotor a dosáhne asynchronních otáček. Potom obsluhující personál nebo automatika pozvolna otevře přívod vody do vodního motoru. Vodní motor začne generátor zrychlovat a až jej roztočí na nadsynchronní otáčky, začne stroj dodávat energii do sítě. Tím dojde k mechanickému zatížení a stroj se na těchto otáčkách ustálí. Zastavovat soustrojí se doporučuje obráceným postupem. Musí být však každopádně zabráněno obsluze připojit generátor omylem k síti, běželi vodní motor naprázdno vysokými otáčkami.

Vzhledem k tomu, že ne všude je k dispozici trojfázová síť, je třeba řešit problém, kdy je nutné dodávat elektrickou energii do izolované sítě. V následující kapitole se pokusím vysvětlit, jak je možné použít asynchronní stroj jako zdroj elektrické energie pro izolovanou síť.

3.2 Asynchronní generátor připojený k izolované síti

Jak jsem již uvedl v druhé kapitole, asynchronní stroj potřebuje ke své funkci zdroj jalové energie. V předchozím případě poskytovala jalovou energii třífázová síť, ke které byl stroj připojen. Nyní ovšem v síti žádný takový zdroj není, a proto je třeba tento zdroj



obstarat. Zdrojem jalové energie může být kondenzátorová baterie připojená paralelně ke svorkám generátoru. To znamená, že je vinutí generátoru a část zátěže neustále zatížena jalovou složkou proudu, kterou spotřebitel nevyužije. Pokud bude navíc generátor napájet zátěž induktivního typu, tak musí kondenzátory dodávat jalovou energii jak do vinutí statoru, tak do zátěže. Velikost potřebné kapacity baterie je závislá na konstrukci stroje, zatížení a rozsahu otáček.

Pokud je generátor rozbíhán pohonem je třeba dát pozor na to, aby budící kondenzátory byli připojeni až v okamžiku, kdy otáčky generátoru dosáhnou 95% až 105% synchronních otáček a připojit je ke generátoru bez napětí.

3.3 Nabuzení izolovaného asynchronního generátoru

Má-li se stroj s paralelně připojenými kondenzátory nabudit, musí mít zbytkový magnetismus. Pokud je zbytkový magnetismus příliš malý, musí se generátor i s kondenzátory připojit na stejnosměrné napětí. Tím zajistíme zmagnetizování rotoru, Nabuzení pak probíhá podobně jako u stejnosměrného dynamu s paralelním buzením.

Autor [1] předpokládá, že pro napětí indukčního generátoru při připojení kondenzátorů platí rovnice:

$$U_1 = I_{1c} \cdot X_c \quad (3.1)$$

Kde kapacitní reaktance:

$$X_c = \frac{1}{\omega_s - C} \quad (3.2)$$

Rovnice (3.1) je rovnicí zatěžovací přímky kondenzátou. Dále také platí rovnice odvozené z náhradního schématu asynchronního stroje (Obr. 3.1)

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I_1 + jX_{1\mu} \cdot (I_{1\mu} + I_2') \quad (3.3)$$

$$0 = \frac{R_2'}{s} I_2' + jX_{2\sigma}' I_2' + jX_{1\mu} (I_{1\mu} + I_2') \quad (3.4)$$

Pro chod naprázdno platí:

$$(I_1 + I_2') = I_{1\mu} = I_{1c} \quad (3.5)$$

Podle schématu, pokud bude skluz záporný, bude platit, že:

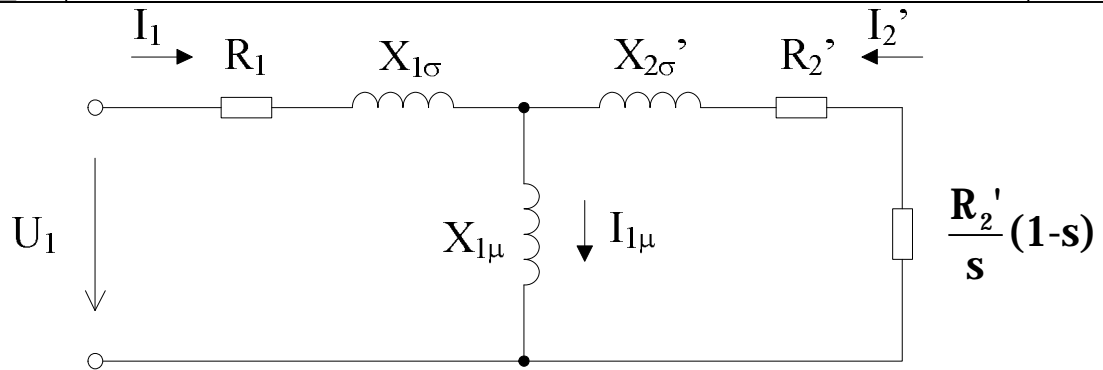
$$\frac{R_2'}{s} < 0 \quad (3.6)$$

Což znamená, že tento odpor bude zdrojem činné energie.

Dále autor [1] uvádí, že pro lineární oblast magnetizační charakteristiky asynchronního stroje platí rovnice:

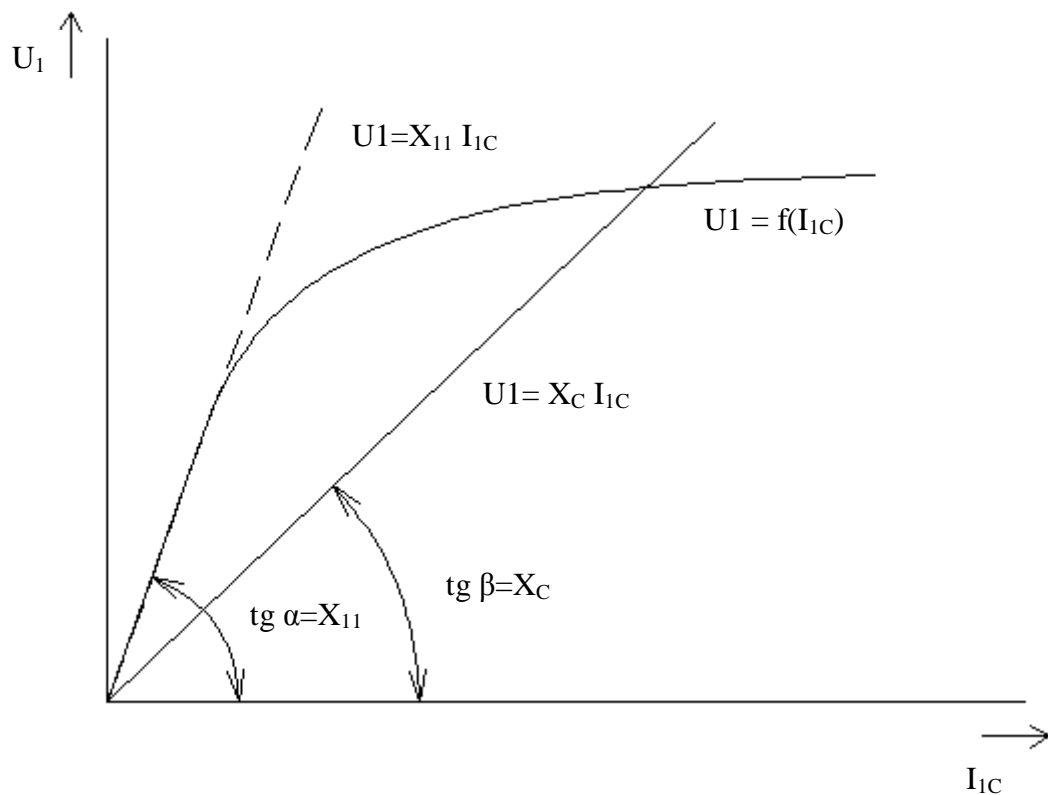
$$U_0 = I_{1\mu} \cdot X_{11} \quad (3.7)$$

Aby se tedy asynchronní generátor nabudil, musí kapacitní přímka rovnicí (3.1) protínat magnetizační charakteristiku naprázdno. To znamená, že $X_c < X_{11}$



Obr. 3.1: Náhradní schéma jedné fáze asynchronního stroje se zanedbáním R_{Fe}

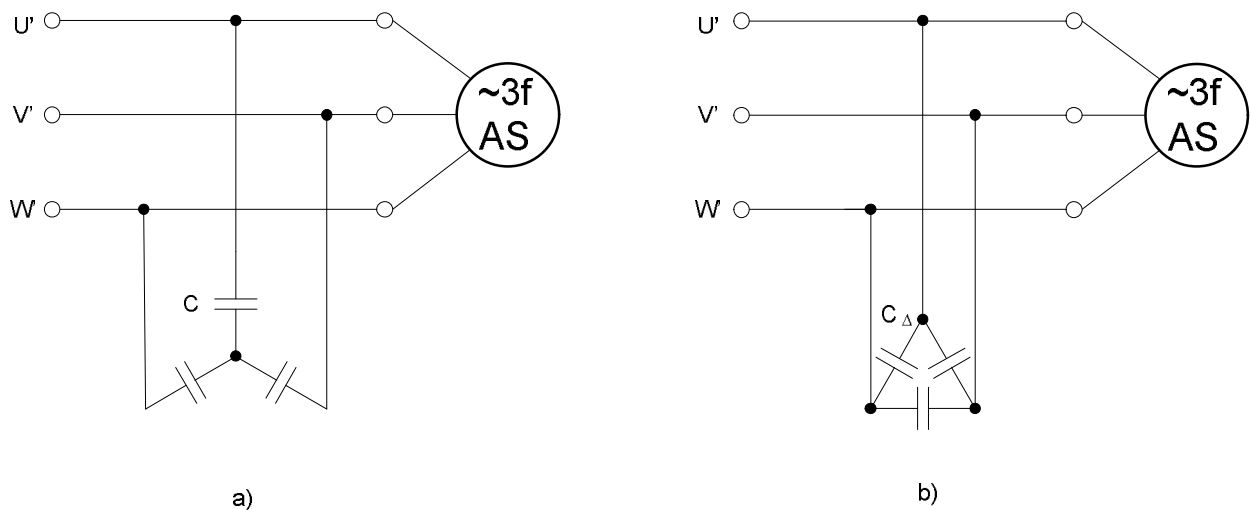
Velikost napětí, na které se asynchronní generátor nabudí, závisí na velikosti připojených kondenzátorů a na jeho charakteristice naprázdno. Jestliže se stroj otáčí rychlostí n_1 a je k němu připojena kondenzátorová baterie o velikosti C , prochází jeho vinutím a kondenzátorem proud, odpovídající remanentnímu napětí. Tento budící proud vybudí magnetické pole, které indukuje ve vinutí větší napětí. Zvětší se tedy proud kondenzátorem a celý proces se opakuje dokud nenastane rovnováha mezi napětím generátoru (3.7) a napětím na kondenzátoru (3.1). Při konstantní kapacitě C a zvětšení rychlosti otáčení rotoru dojde ke zvětšení reaktance X_{11} , ale kapacitní reaktance $X_C = (\omega_s \cdot C)^{-1}$ klesá. Proto se stroj nabudí na vyšší napětí při vyšších otáčkách. Pokud při konstantní kapacitě snížíme otáčky, stroj se odbudí.



Obr. 3.2: Nabuzení asynchronního stroje

3.4 Návrh budící kapacity

Jak plyne z předešlé kapitoly, velikost budící kapacity má značný vliv na činnost asynchronního stroje jako generátoru. Proto je třeba nejdříve určit vhodnou velikost budící kapacity. Velikost kapacity lze získat pomocí magnetizačního proudu stroje. Proud potřebný k nabuzení asynchronního generátoru je proud protékající kondenzátorem v každé ze tří fází dle rovnice (3.1). Způsob připojení budící kapacity k asynchronnímu generátoru je zobrazen na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Způsoby připojení budící kapacity k AS generátoru a) spojení do hvězdy b) spojení do trojúhelníku

K přesnému určení potřebné kapacity musíme stanovit magnetizační proud. Tento proud lze získat z měření charakteristiky naprázdno $U_1 = f(I_{1\mu})$. Jelikož proud naprázdno asynchronního stroje má podobný charakter jako proud naprázdno transformátoru, je možné považovat charakteristiku naprázdno za indukční charakteristiku asynchronního stroje.

Z rovnic (3.1) a (3.2) lze získat vztah pro potřebnou budící kapacitu:

$$C = \frac{I_{1c}}{2\pi \cdot f \cdot U_1} \quad (3.8)$$

Velikost budící kapacity lze stanovit i jiným způsobem. Tento způsob lze použít, neznáme-li hodnotu proudu naprázdno. Je ovšem méně přesný. Autor [1] zjistil, že velikost budící kapacity lze stanovit takto:

$$C = k \frac{I_n}{2\pi \cdot f \cdot U_1} \quad (3.9)$$

Kde k je konstanta eliminující chybu způsobenou při použití jmenovitého proudu, namísto proudu naprázdno k výpočtu velikosti budící kapacity.

Konkrétní hodnoty konstanty k jsou uvedeny v příloze č. 1.

Výsledkem je velikost potřebné budící kapacity jedné fáze. V případě, že nejsou k dispozici kondenzátory s dostatečně velkou kapacitou, je výhodné použít zapojení



z Obr3.3-b. Je nutno mít na paměti, že je třeba přepočítat kapacitu kondenzátoru ze zapojení do hvězdy na zapojení do trojúhelníku.

Pokud vyjdeme z předpokladu nutnosti rovnosti výkonů obou zapojení, dostaneme následující vztah pro velikost kapacity při zapojení do trojúhelníku:

$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3} \quad (3.10)$$



4 MĚŘENÝ STROJ

4.1 Druh měřeného stroje

Pro svoji práci jsem si vybral stroj, který je označován jako přepínatelný. Znamená to, že změnu otáček rotoru lze provést nejen změnou frekvence napájecího napětí, ale také přepnutím počtu pólů. V praxi se lze setkat se dvěma druhy těchto motorů.

4.1.1 Motory s oddělenými statorovými vinutími

Dvě oddělená statorová vinutí s rozdílnými počty pólů umožňují dvoje otáčky v libovolném celočíselném poměru (např. 3:4, 3:2, 5:3 atd.). Točivý moment je takřka stejný pro dané poměry otáček a výkony motoru jsou přibližně v poměru otáček.

Tento způsob konstrukce ovšem vyžaduje zvýšené náklady na vinutí i elektroplechy. Používají se tedy hlavně tam, kde by přechod 1:2 byl příliš hrubý.

4.1.2 Motory s dělenými vinutími statoru (Dahlanderovo zapojení)

Tímto vinutím je vybaven měřený asynchronní stroj. Při tomto zapojení je každé vinutí statoru rozděleno odbočkou na dvě části. Přepínáním skupin cívek ze sériového na paralelní zapojení je totiž původní počet pólů zmenšen na polovinu a tím se zdvojnásobí otáčky točivého pole statoru n_s .

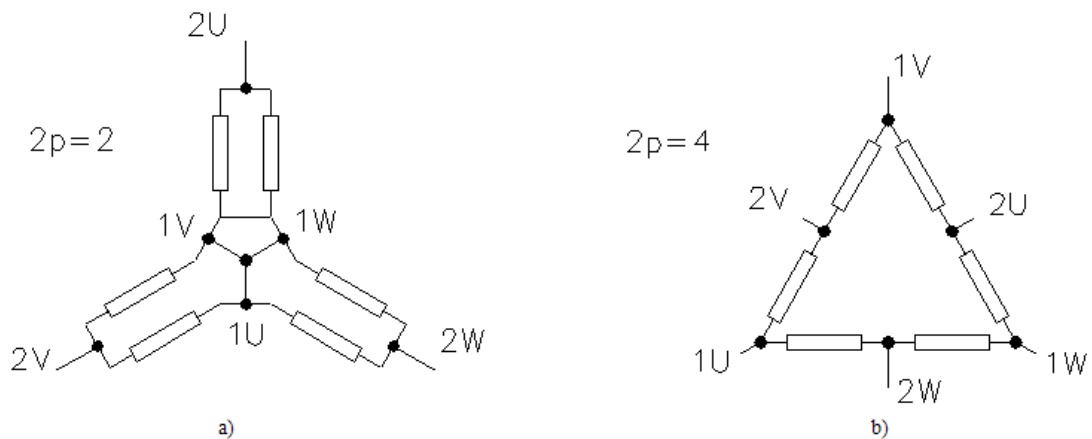
Nejpoužívanějším zapojením je zapojení trojúhelník – dvojitá hvězda (D – YY). Sériovým spojením částí vinutí vznikne sdružení vinutí do trojúhelníka, při paralelním spojení vynutí, umožní sdružení do hvězdy. Zapojení do hvězdy umožní snížením napětí zabránit vysoké indukci v oblasti drážek statoru. Touto cestou je dosaženo dvojnásobné zvýšení otáček a přibližně 1,5 krát větší výkon. Točivý moment je přibližně stejný v obou oblastech.

Hlavně díky této vlastnosti se používají tyto motory jako pohony obráběcích strojů.

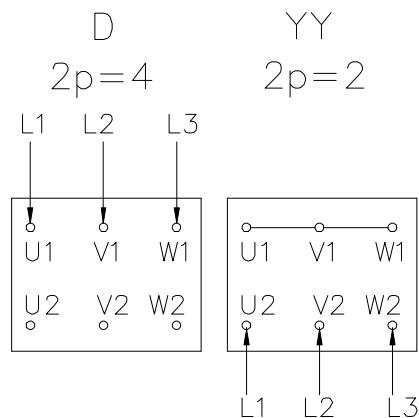
Svorkovnice motoru má pro každý počet pólů 3 svorky. Motor proto může být používán na jediné svorkové napětí. Svorky pro nízké otáčky jsou 1U, 1V, 1W a pro vysoké otáčky 2U, 2V a 2W.

Často bývají přehozeny svorky 1U a 1W (to je i případ měřeného stroje). Je to z toho důvodu, aby při připojení stejného typu zůstal zachován směr otáček.

Pro názornost je způsob zapojení statorového vinutí znázorněn na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Možné způsoby připojení statorového vinutí k síti. a) zapojení YY b) zapojení D



Obr. 4.2: Realizace zapojení na svorkovnici stroje

V následující části se pokusím ukázat, jak závisí výkon, proud statorem a moment motoru na způsobu zapojení vinutí statoru měřeného motoru. Výpočty jsou provedeny vždy pro jednu fázi. Motor budu považovat za ideální, což znamená, že zanedbám veškeré ztráty. Vinutí motoru bude pro zjednodušení charakterizováno pouze odporem o velikosti R .



4.1.3 Velikost statorového proudu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru

a) Zapojení YY:

Z Obr. 4.1a) plyne :

$$I_{1YY} = \frac{U_1}{\frac{R}{2}} = \frac{2 \cdot U_1}{R} \quad (4.1)$$

b) Zapojení D:

$$I_{1D} = \frac{U_{1s}}{2 \cdot R} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{2 \cdot R} \quad (4.2)$$

4.1.4 Velikost výkonu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru

a) Zapojení YY:

Z Obr. 4.1a) plyne, že:

$$P_{YY} = U_1 \cdot I_{1YY} \cdot \cos \varphi_1 \quad (4.3)$$

Po dosazení (4.1) do (4.3) získáme obecný vztah pro výkon motoru v zapojení YY:

$$P_{YY} = \frac{2 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{R} \quad (4.4)$$

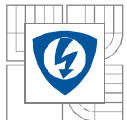
b) Zapojení D:

Z Obr.4.1b) plyne, že:

$$P_D = U_s \cdot I_{1D} \cdot \cos \varphi_1 \quad (4.5)$$

Po dosazení (4.2) do (4.5) získáme obecný vztah pro výkon motoru v zapojení YY:

$$P_D = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2 \cdot R} \quad (4.6)$$



4.1.5 Velikost momentu v závislosti na způsobu zapojení vinutí statoru

a) Zapojení YY:

$$M_{YY} = \frac{P_{YY}}{\omega_1} \quad (4.7)$$

Pokud do rovnice (4.7) dosadíme rovnici (4.4) dostaneme:

$$M_{YY} = \frac{2 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot n_1} = \frac{2 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot f_1} = \frac{p \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{\pi \cdot f_1 \cdot R} \quad (4.8)$$

b) Zapojení D:

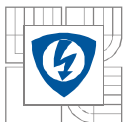
$$M_D = \frac{P_D}{\omega_1} \quad (4.9)$$

Po dosazení rovnic (2.1), (2.2) a (4.6) dostaneme:

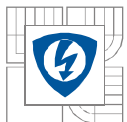
$$M_D = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot n_1} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot f_1} = \frac{3 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot f \cdot R} \quad (4.10)$$

Je důležité si uvědomit, že při tomto zapojení se zdvojnásobí počet magnetických Parametry měřeného stroje

Výrobce:	EMP Slavkov u Brna	
Typ:	TM90-2/4S B3	
zapojení:	YY	D
výkon P_n :	1,5kW	1,1kW
napětí U_n :	400V	
proud I_n :	3,7 A	2,7 A
$\cos \varphi$	0,84	0,81
otáčky n_n	2800 min ⁻¹	1400 min ⁻¹
frekvence f	50 Hz	
třída krytí	IP54	
typ zatížení	S1	



Obr. 4.3: Měřený asynchronní stroj

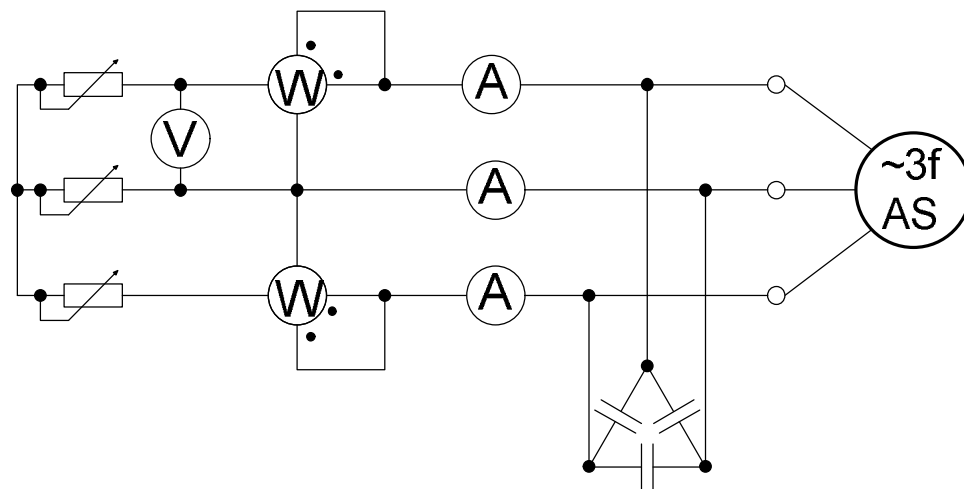


5 MĚŘENÍ NA ASYNCHRONNÍM GENERÁTORU

Použité přístroje

Přístroj	Výrobce	Typ	Výrobní č.	TP	Rozsah	Max Zatížení
Voltmetr	Metra		4709959	1,5	2,4-240V	-
Voltmetr	Metra		4789212	1,5	2,4 - 240V	-
Ampérmetr	Metra		1150108	1	1-20A	-
Ampérmetr	Metra		1173342	1	1-20A	-
Ampérmetr	Metra		1173341	1	1-20A	-
Proměnný odpor	Metra	-	2187391	-	0-410Ω	1,2A
Proměnný odpor	Krompachy	-	-	-	0-410Ω	1,8A
Proměnný odpor	Krompachy	-	-	-	0-510Ω	1,1A
Wattmetr	Metra		794226	0,5	120-360V/5-10A	-
Wattmetr	Metra		825805	0,5	120-360V/5-10A	-
Otáčkoměr	Jaquet	DH0907	2895.204223	-	-	-
Digitální wattmetr	YOKOGAWA	WT1600	-	-	-	-

5.1 Schéma zapojení



Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik na asynchronním generátoru



Obr. 5.2: Zapojení měřicích přístrojů a zátěže



5.2 Popis měření

Pro všechny možné kombinace velikosti budící kapacity ($C=14\mu\text{F}$, $C=28,5\mu\text{F}$) a způsobu připojení svorkovnice AS k zátěži (YY, D) byla provedena následující měření:

- a) Měření při konstantním napětí U_s , $n=f(I)$

Při tomto měření byly nejdříve nastaveny otáčky AG tak, aby výstupní napětí U_s bylo požadované velikosti. Následně byla zvyšována zátěž AG a to do okamžiku kdy proud zátěží dosáhl 1A. Hranice 1A byla zvolena vzhledem k maximálnímu možnému zatížení proměnných odporů. Dalším omezením, kterému bylo nutno přizpůsobit měření, bylo napětí kondenzátorů, které mohlo být maximálně 250V. Napětí U_s bylo pomocí zvyšování otáček s rostoucí zátěží udržováno konstantní. Toto měření bylo provedeno pokaždé pro 180V, 160V a 140V.

- b) Měření při konstantních otáčkách, $n=\text{konst}$, $U=f(I)$

Při tomto měření byly nastaveny otáčky tak, aby výstupní napětí $U_s=240\text{V}$. Následně byl AG symetricky zatěžován a to do okamžiku, kdy proud zátěží vzrostl na 1A, nebo dokud se AG neobudil.

- c) Měření nabuzení AG, $U=f(n)$

Při tomto měření byly postupně zvyšovány otáčky AG, dokud se nenabudil. V závislosti na otáčkách bylo sledováno výstupní napětí U_s .

- d) Měření obuzení AG, $U=f(n)$

Při tomto měření byly nastaveny otáčky AG tak, aby výstupní napětí $U_s=240\text{V}$ a následně byly otáčky snižovány do okamžiku, kdy se stroj obudil a výstupní napětí $U_s=0\text{V}$.

5.3 Budící kapacita

Jak již bylo dříve zmíněno, je třeba asynchronnímu generátoru pracujícímu v samostatné síti zajistit zdroj jalové energie. Tuto energii v tomto případě obstarali kondenzátory, které byly původně používány v jiné aplikaci jako kompenzační.

Nejdříve je ovšem třeba navrhnout vhodnou velikost budící kapacity. Tu zjistíme pomocí vzorce (3.9).

Pro zapojení YY bude potřebná minimální budící kapacita:

$$C = k \frac{I_n}{2\pi \cdot f \cdot U_1} = 0,5 \frac{3,7}{2\pi \cdot 50 \cdot 230} = 25,6\mu\text{F} \quad (5.1)$$

Pro zapojení D bude potřebná minimální budící kapacita:

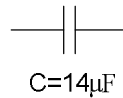
$$C = k \frac{I_n}{2\pi \cdot f \cdot U_1} = 0,5 \frac{2,7}{2\pi \cdot 50 \cdot 230} = 18,6\mu\text{F} \quad (5.2)$$

Vzhledem k použitým kondenzátorům, o kterých je více uvedeno v následující části, ale i vzhledem k názornosti budou kondenzátory propojeny do trojúhelníku.

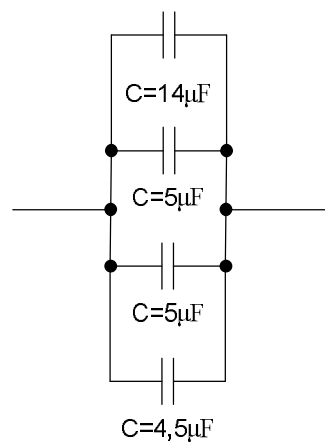
5.4 Použité kondenzátory

Pro budící kapacitu byly použity kondenzátory, původně použité v jiné aplikaci jako kompenzační. Vhodným spojením bylo dosaženo dvou kapacit:

a) $C=3 \times 14 \mu\text{F}$



b) $C=3 \times 28,5 \mu\text{F}$

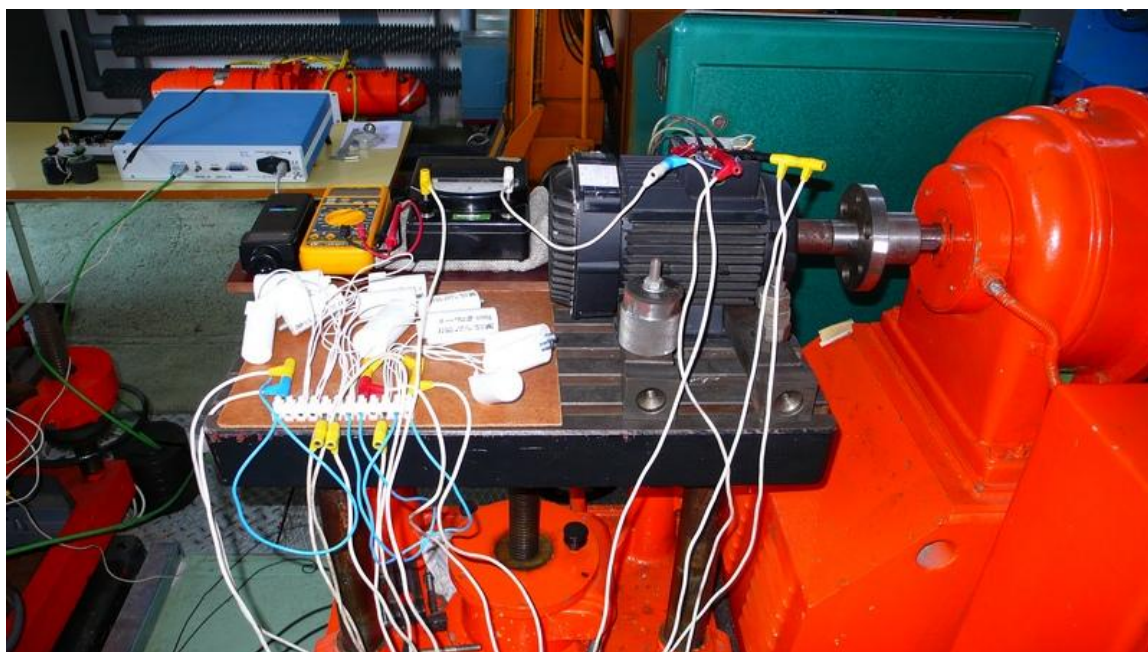


Obr. 5.3: Vytvoření kapacity $C=28,5 \mu\text{F}$

Obrázky ukazují, jakým způsobem bylo dosaženo požadované kapacity pro jednu fázi zátěže. Při každém měření byly připojeny kondenzátory paralelně k zátěži pro každou fázi zvlášť (Obr. 5.1).



Obr. 5.4: Kondenzátory v zapojení pro $C=28,5 \mu\text{F}$

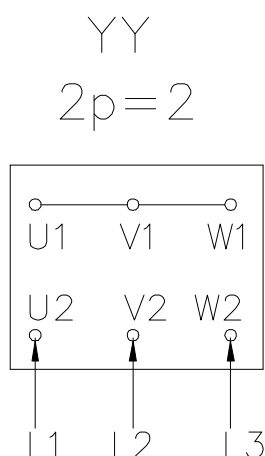


Obr. 5.5: Celkové připojení kondenzátorové baterie $C=3 \times 28,5 \mu\text{F}$ k AG

Na Obr. 5.5 je vidět, jak vypadalo připojení kondenzátorové baterie ke svorkám AG. Baterie byla vytvořena pomocí 12 kondenzátorů, kde pro každou fázi byly použity vždy 4 paralelně spojené kondenzátory, které dohromady tvořili kapacitu $C=28,5 \mu\text{F}$. Takto vzniklé kapacity byly propojeny pomocí svorkovnice do trojúhelníka a podle Obr. 3.3b byly připojeny k AG.

5.5 Připojení svorkovnice asynchronního generátoru

5.5.1 Zapojení YY

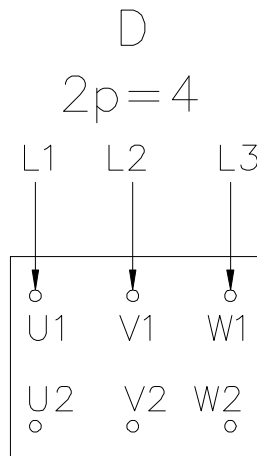


Obr. 5.6: Zapojení svorkovnice pro realizaci zapojení YY

Pro realizaci zapojení YY je třeba na svorkovnici měřeného stroje zkratovat svorky U1, V1 a W1. Zátěž se připojí na svorky U2, V2 a W2 (viz. Obr. 5.6).



5.5.2 Zapojení D



Obr. 5.7: Zapojení svorkovnice pro realizaci zapojení D

Pro realizaci zapojení D je třeba nechat svorky U2, V2 a W2 nezapojené a zátěž připojit na svorky U1, V1 a W1 (viz, Obr. 5.7).



5.6 Chyba měření

5.6.1 Výpočet chyby měření proudu

Výpočet aritmetického průměru naměřených proudů:

$$\bar{X} = X_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5.3)$$

$$\bar{I} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{n} = \frac{0,21A + 0,22A + 0,23A}{3} = \frac{0,66A}{3} = 0,22A \quad (5.4)$$

$$X_s = 0,22A \quad (5.5)$$

Výpočet zdánlivé absolutní chyby měření:

$$\Delta_i = X_i - X_s \quad (5.6)$$

$$\Delta_1 = I_1 - X_s = 0,21A - 0,22A = -0,01A \quad (5.7)$$

$$\Delta_2 = I_2 - X_s = 0,22A - 0,22A = 0A \quad (5.8)$$

$$\Delta_3 = I_3 - X_s = 0,23A - 0,22A = 0,01A \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = -0,01A + 0A + 0,01A = 0A \quad (5.10)$$

Výpočet střední kvadratické chyby:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_s)^2}{n-1}} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{(I_1 - X_s)^2 + (I_2 - X_s)^2 + (I_3 - X_s)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(0,21A - 0,22A)^2 + (0,22A - 0,22A)^2 + (0,23A - 0,22A)^2}{3-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{(-0,01A)^2 + (0,00A)^2 + (0,01A)^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,0001 + 0,0001}{2}} = \sqrt{\frac{0,0002}{2}} = \sqrt{0,0001} = 0,01A \end{aligned} \quad (5.12)$$

Výpočet střední kvadratické chyby aritmetického středu řady měření:

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_s)^2}{n(n-1)}} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} s_n &= \sqrt{\frac{(I_1 - X_s)^2 + (I_2 - X_s)^2 + (I_3 - X_s)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(0,21A - 0,22A)^2 + (0,22A - 0,22A)^2 + (0,23A - 0,22A)^2}{3(3-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(-0,01A)^2 + (0,00A)^2 + (0,01A)^2}{6}} = \sqrt{\frac{0,0001 + 0,0001}{6}} = \sqrt{\frac{0,0002}{6}} = \sqrt{0,0000333} = 0,0057A = 0,01A \end{aligned} \quad (5.14)$$



Výpočet náhodné chyby:

$$X_I = X_s \pm s_n \quad (5.15)$$

$$X_I = 0,22A \pm 0,01A \quad (5.16)$$



5.6.2 Výpočet chyby měření napětí

Výpočet aritmetického průměru naměřených:

$$\bar{U} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{n} = \frac{160\text{V} + 159\text{V} + 162\text{V}}{3} = \frac{481\text{V}}{3} = 160,33\text{V} \quad (5.17)$$

$$X_s = 160,33\text{V} \quad (5.18)$$

Výpočet zdánlivé absolutní chyby měření:

$$\Delta_1 = U_1 - X_s = 160\text{V} - 160,33\text{V} = -0,33\text{V} \quad (5.19)$$

$$\Delta_2 = U_2 - X_s = 159\text{V} - 160,33\text{V} = -1,33\text{V} \quad (5.20)$$

$$\Delta_3 = U_3 - X_s = 162\text{V} - 160,33\text{V} = 2,33\text{V} \quad (5.21)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = -0,33\text{V} - 1,33\text{V} + 2,33\text{V} = 0,67\text{V} \quad (5.22)$$

Výpočet střední kvadratické chyby:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{(U_1 - X_s)^2 + (U_2 - X_s)^2 + (U_3 - X_s)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(160\text{V} - 160,33\text{V})^2 + (159\text{V} - 160,33\text{V})^2 + (162 - 160,33\text{V})^2}{3-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{(-0,33\text{V})^2 + (-1,33\text{V})^2 + (2,33)^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,1089 + 1,7689 + 5,4289}{2}} = \sqrt{\frac{7,3067}{2}} = \sqrt{3,6534} = 1,91\text{V} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Výpočet střední kvadratické chyby aritmetického středu řady měření:

$$\begin{aligned} s_n &= \sqrt{\frac{(U_1 - X_s)^2 + (U_2 - X_s)^2 + (U_3 - X_s)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(160\text{V} - 160,33\text{V})^2 + (159\text{V} - 160,33\text{V})^2 + (162 - 160,33\text{V})^2}{3(3-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(-0,33\text{V})^2 + (-1,33\text{V})^2 + (2,33)^2}{6}} = \sqrt{\frac{0,1089 + 1,7689 + 5,4289}{6}} = \sqrt{\frac{7,3067}{6}} = \sqrt{1,2178} = 1,10\text{V} \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$X_U = X_s \pm s_n \quad (5.25)$$

$$X_U = 160,33\text{V} \pm 1,10\text{V} \quad (5.26)$$



5.6.3 Výpočet chyby měření otáček

Výpočet aritmetického průměru naměřených otáček:

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{n} = \frac{1427 \text{ min}^{-1} + 1425 \text{ min}^{-1} + 1426 \text{ min}^{-1}}{3} = \frac{4278}{3} = 1426 \text{ min}^{-1} \quad (5.27)$$

$$X_s = 1426 \text{ min}^{-1} \quad (5.28)$$

Výpočet zdánlivé absolutní chyby měření:

$$\Delta_1 = n_1 - X_s = 1427 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1} = 1 \text{ min}^{-1} \quad (5.29)$$

$$\Delta_2 = n_2 - X_s = 1425 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1} = -1 \text{ min}^{-1} \quad (5.30)$$

$$\Delta_3 = n_3 - X_s = 1426 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1} = 0 \text{ min}^{-1} \quad (5.31)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = 1 \text{ min}^{-1} - 1 \text{ min}^{-1} + 0 \text{ min}^{-1} = 0 \text{ min}^{-1} \quad (5.32)$$

Výpočet střední kvadratické chyby:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{(n_1 - X_s)^2 + (n_2 - X_s)^2 + (n_3 - X_s)^2}{n-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{(1427 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2 + (1425 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2 + (1426 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2}{3-1}} = \quad (5.33) \\ &= \sqrt{\frac{(1 \text{ min}^{-1})^2 + (-1 \text{ min}^{-1})^2 + (0 \text{ min}^{-1})^2}{2}} = \sqrt{\frac{1 \text{ min}^{-1} + 1 \text{ min}^{-1}}{2}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = \sqrt{1} = 1 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

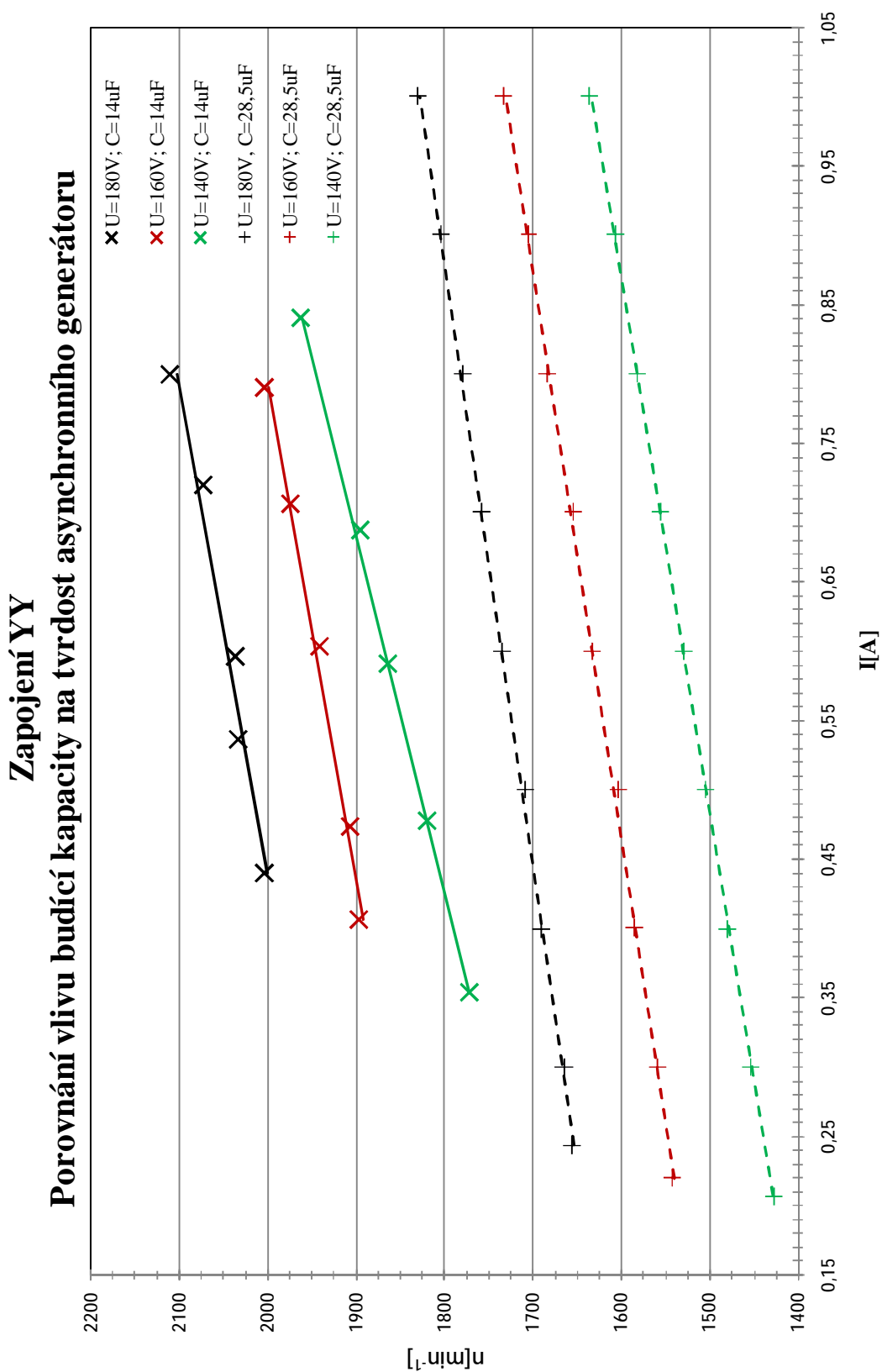
Výpočet střední kvadratické chyby aritmetického středu řady měření:

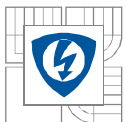
$$\begin{aligned} s_n &= \sqrt{\frac{(n_1 - X_s)^2 + (n_2 - X_s)^2 + (n_3 - X_s)^2}{n(n-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(1427 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2 + (1425 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2 + (1426 \text{ min}^{-1} - 1426 \text{ min}^{-1})^2}{3(3-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(1 \text{ min}^{-1})^2 + (-1 \text{ min}^{-1})^2 + (0 \text{ min}^{-1})^2}{6}} = \sqrt{\frac{1 \text{ min}^{-1} + 1 \text{ min}^{-1}}{6}} = \sqrt{\frac{2}{6}} = \sqrt{0,33} = 0,58 \text{ min}^{-1} \quad (5.34) \end{aligned}$$

$$X_n = X_s \pm s_n \quad (5.35)$$

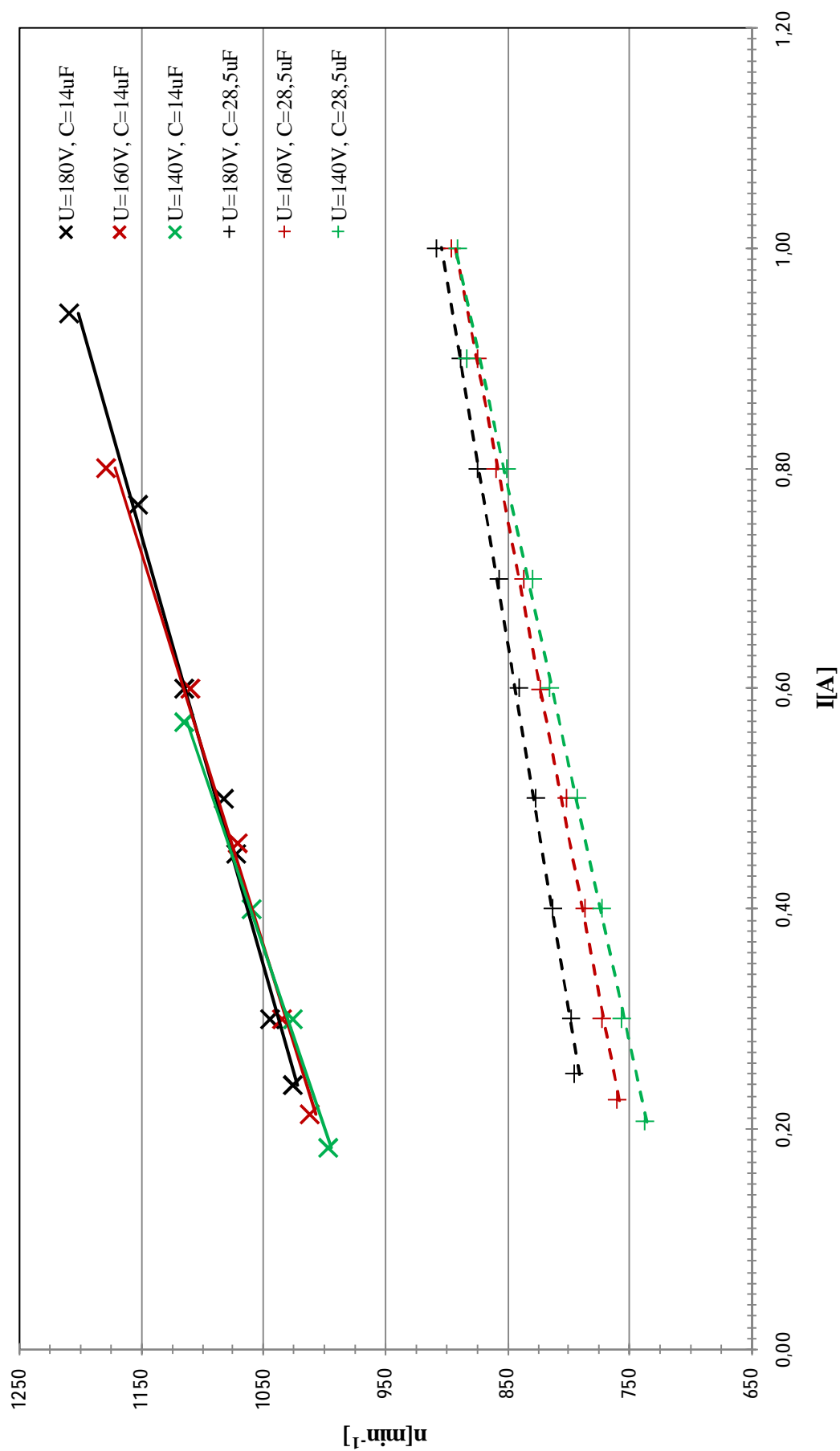
$$X_n = 1426 \text{ min}^{-1} \pm 0,58 \text{ min}^{-1} \quad (5.36)$$

6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

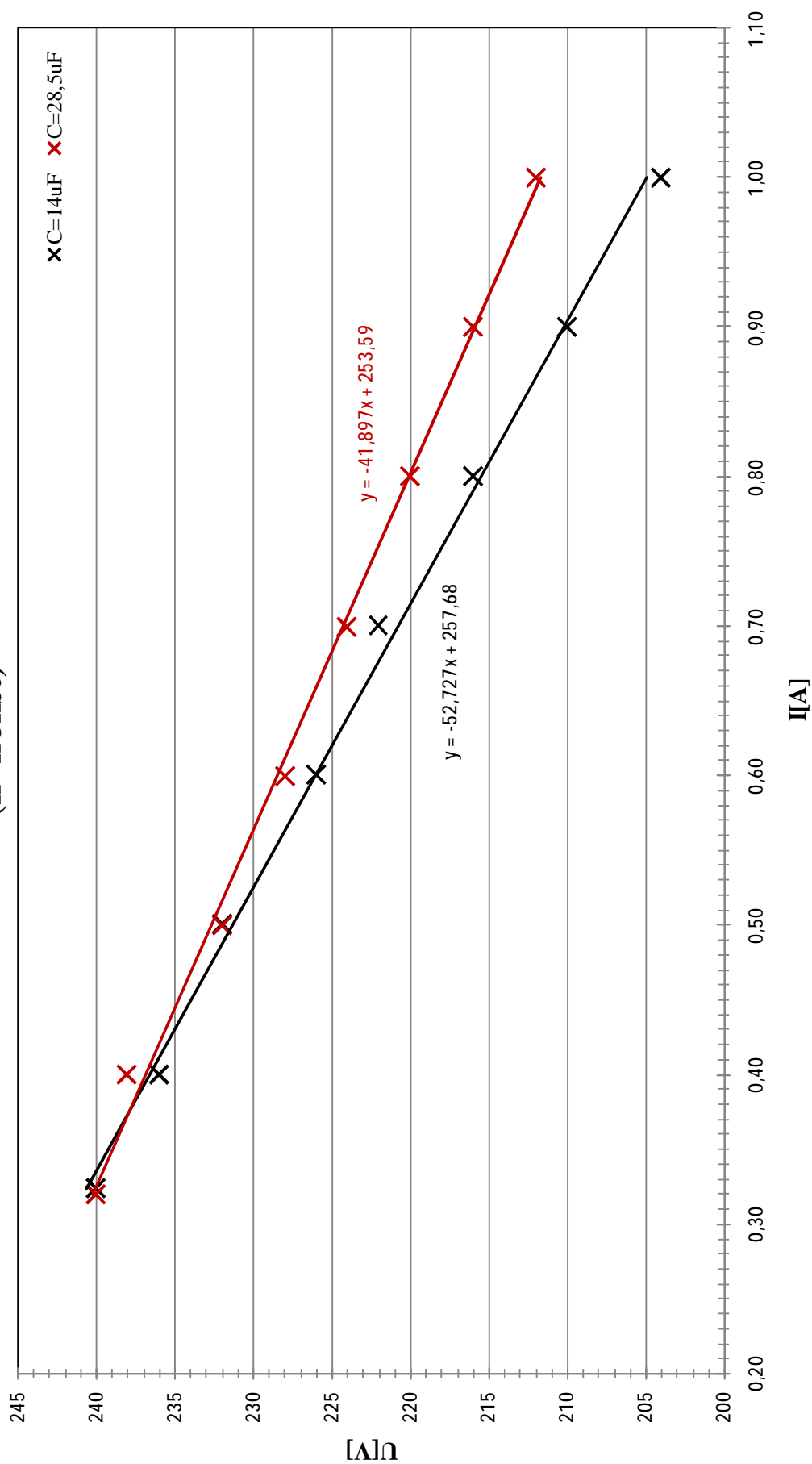




Zapojení D Porovnání vlivu budící kapacity na tvrdost asynchronního generátoru

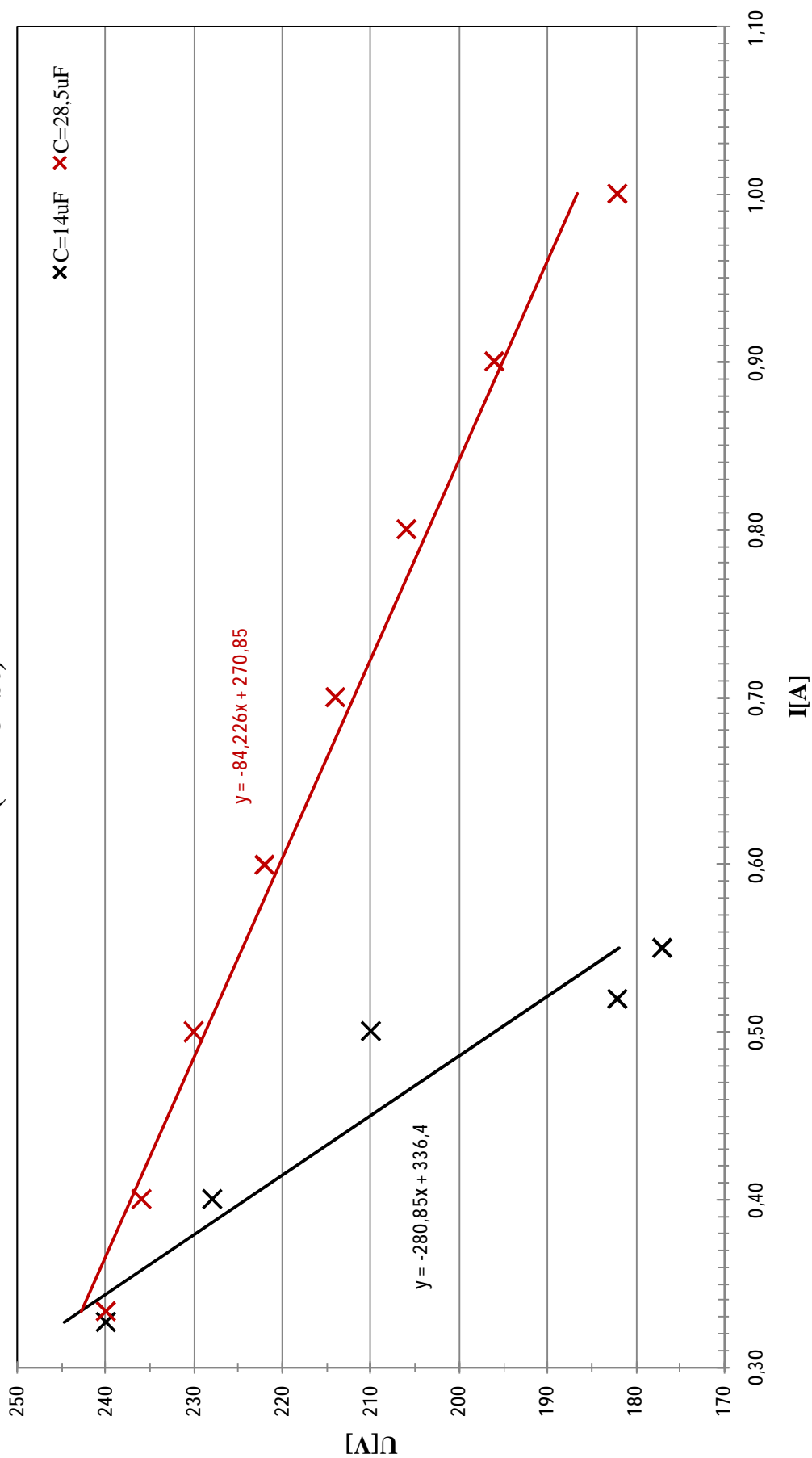


Zapojení YY
Porovnání VA charakteristik AG pro různé velikosti budící kapacity
(n=konst)



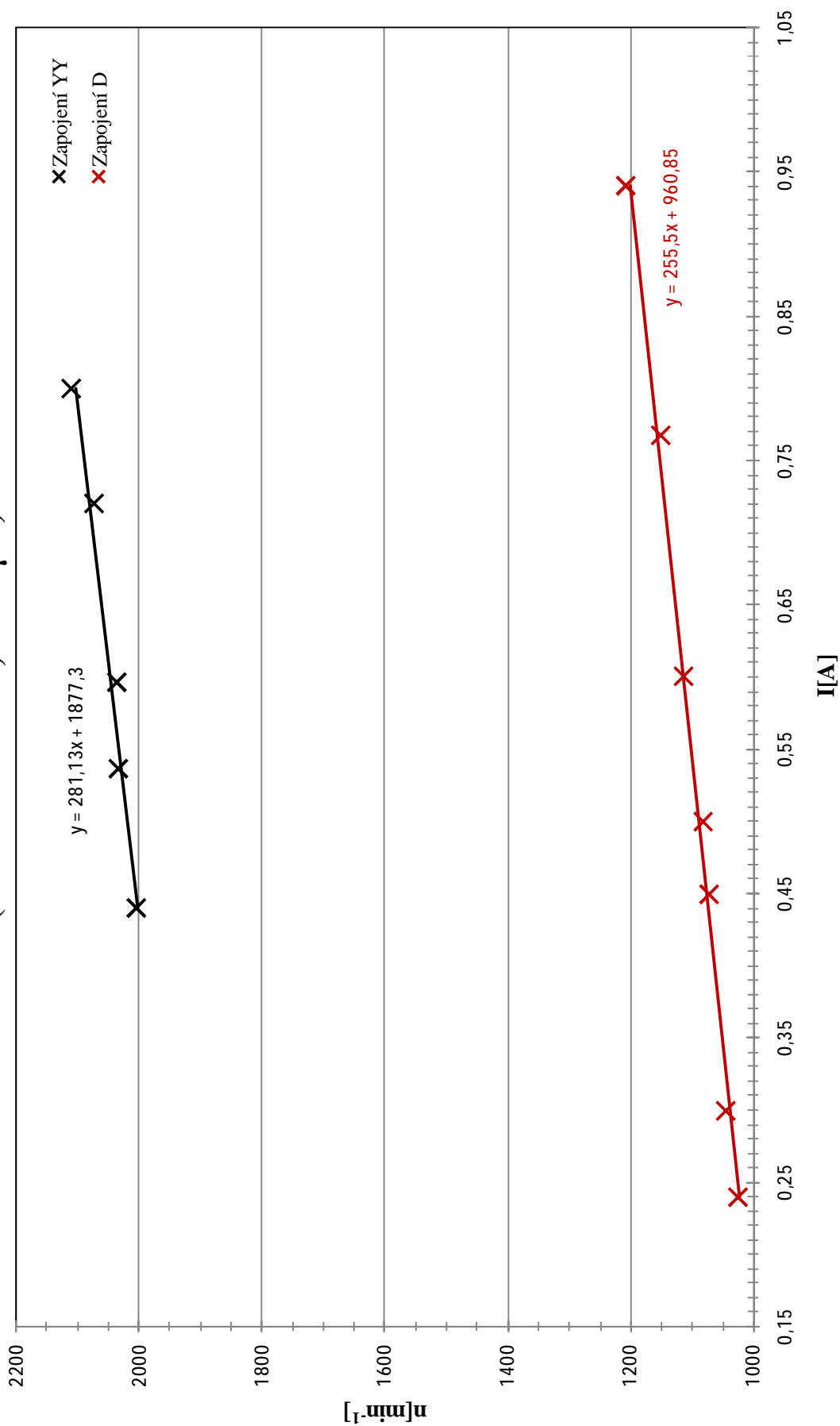
Zapojení D

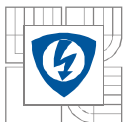
Porovnání VA charakteristik AG pro různé velikosti budící kapacity (n=konst)



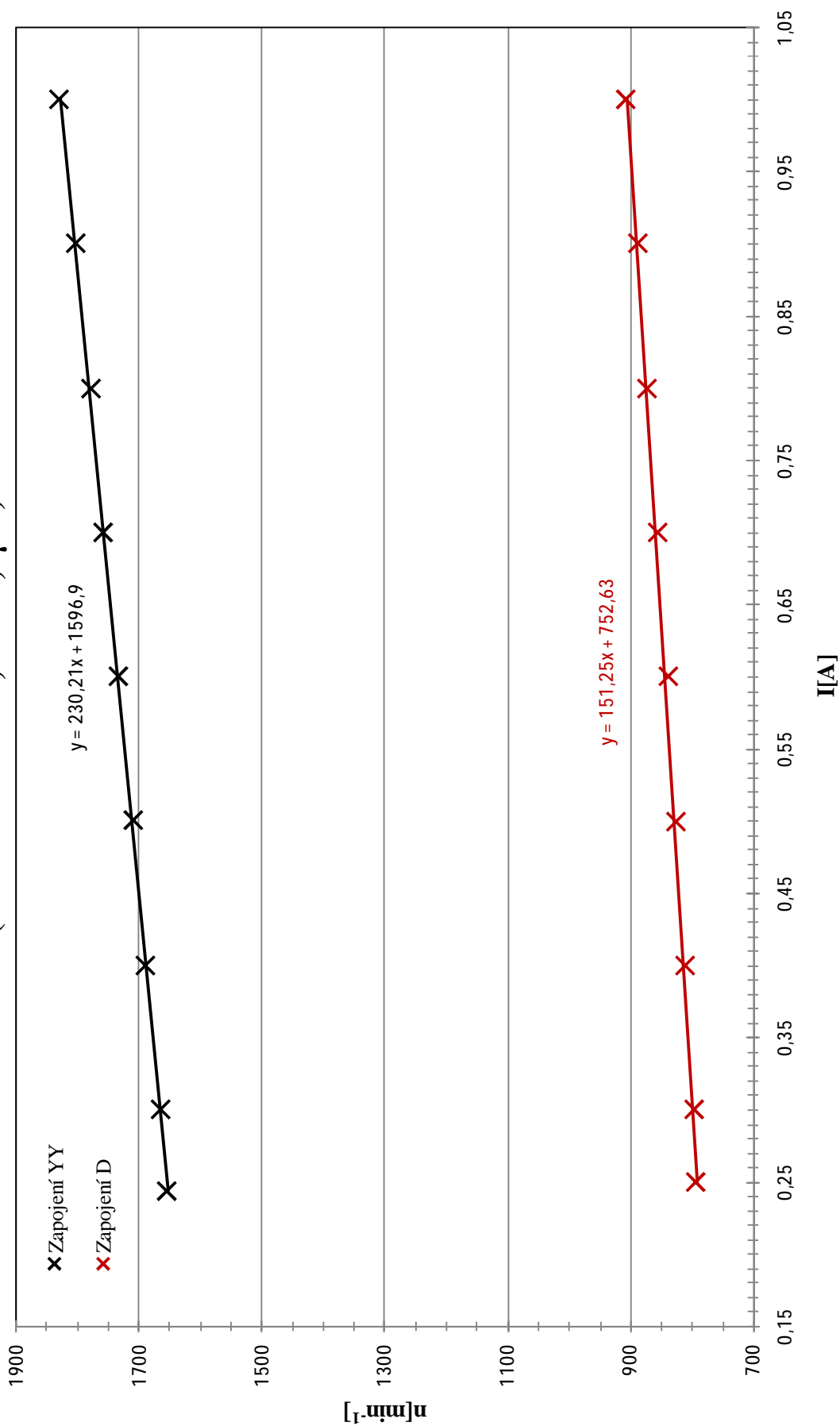


Porovnání vlastností AG při různém připojení svorkovnice k zátěži ($U=180V=\text{konst.}$, $C=14\mu F$)

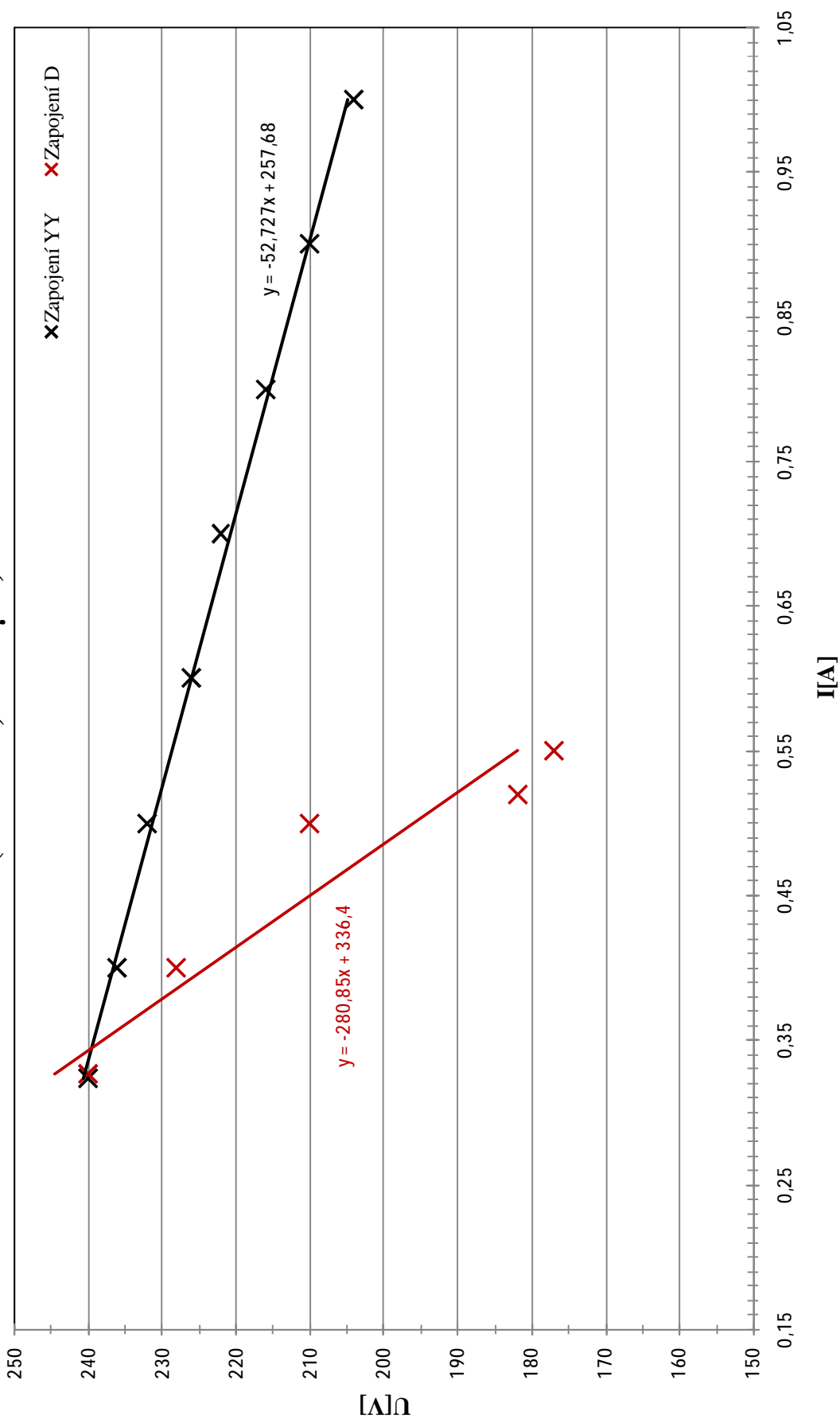




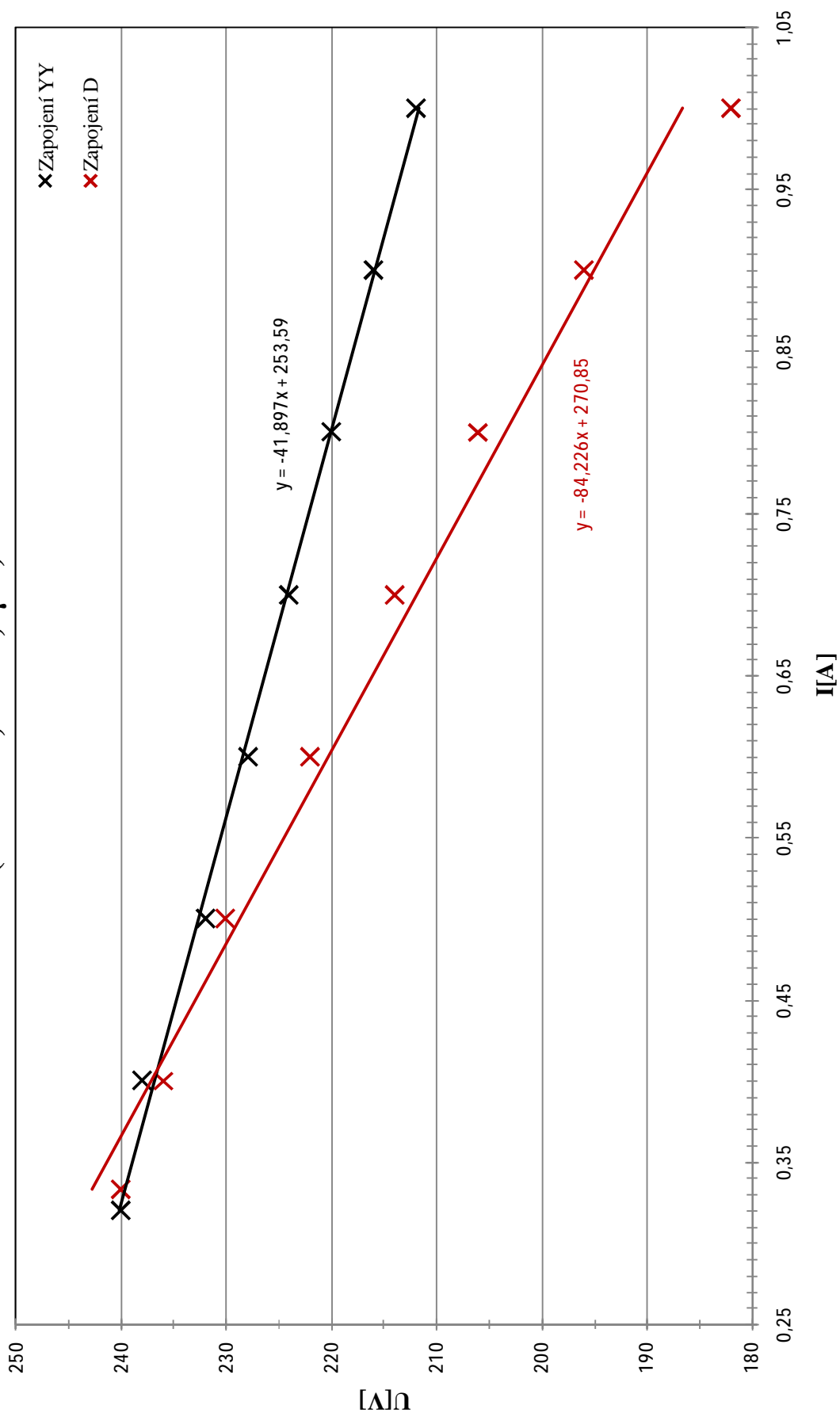
Porovnání vlastností AG při různém připojení svorkovnice k zátěži ($U=180V=\text{konst.}$, $C=28,5\mu\text{F}$)

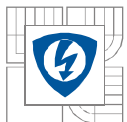


Porovnání VA charakteristik AG pro různé připojení svorkovnice k zátěži ($n = \text{konst}$, $C = 14 \mu\text{F}$)



Porovnání VA charakteristik AG pro různé připojení svorkovnice k zátěži ($n = \text{konst}$, $C = 28,5 \mu\text{F}$)





7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zhodnotit použití speciálního asynchronního stroje jako generátoru elektrické energie. Výsledkem provedené rešerše je fakt, že asynchronní stroje se jako generátory používají především v malých vodních elektrárnách a to z důvodů bezproblémové údržby, jednoduché konstrukce, nízkých pořizovacích nákladů a především pro jednoduchost provedení, z čehož vyplývá možnost jednoduché a úplné automatizace provozu.

Výhodou měřeného stroje je vlastnost, že změnou připojení svorek k zátěži se změní počet pólových dvojic stroje, což má za následek změnu jmenovitých otáček stroje. Tato skutečnost se právě u malých vodních elektráren velice hodí, jelikož není zaručen stále stejný průtok. Při změně průtoku zde není potřeba mechanického převodu, ale pouhým přepnutím motoru do požadovaného zapojení je dosaženo toho, že generátor bude vždy pracovat při optimálních otáčkách vzhledem k použitému zapojení.

Cílem bakalářské práce bylo proměřit speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie, což bylo splněno v daném rozsahu splněno. Měření na zkoušeném stroji bylo prováděno pro maximální napětí 250V, což odpovídá maximálnímu napětí použitých kondenzátorů. Velikost zatěžovacího proudu byla volena dle proudového zatížení použitých rezistorů. Výsledky měření jsou zpracovány v přílohách. Porovnáním těchto výsledků se ukázalo, jaký vliv na výstupní veličiny má změna budící kapacity nebo změna zapojení stroje.

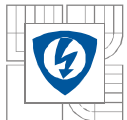
Zapojení	Velikost budící kapacity	Otáčky	Přípustné zatížení	Maximální zatížení
YY	14 μ F	2272 min ⁻¹	0,95A	3A
YY	28,5 μ F	1990 min ⁻¹	1,05A	3,7A
D	14 μ F	913 min ⁻¹	0,46A	0,85A
D	28,5 μ F	1094 min ⁻¹	0,75A	2,05A

kde přípustné zatížení je takové zatížení, při kterém poklesne napětí při daných otáčkách o 10%. Maximální zatížení je zatížení, po jehož překročení by se asynchronní generátor odbudil. Jako nejvýhodnější zapojení lze považovat zapojení statorového vinutí do YY s větší kapacitou, než je minimální vypočtená velikost, neboť v tomto případě je možno dosáhnout největšího proudového zatížení asynchronního generátoru pro dané napětí a pro zvolené konfigurace zapojení statorového vinutí.

Při zapojení stroje YY dostaneme kvalitnější generátor elektrické energie, ovšem za cenu potřeby vyšších otáček a při stejném zapojení svorkovnice stroje a použití různých velikostí budící kapacity vychází lépe použití větší kapacity.

Z grafu porovnání voltampérových charakteristik asynchronního generátoru pro různé připojení svorkovnice stroje k zátěži vyplývá, že generátor má lepší vlastnosti při zapojení YY. Je ovšem třeba uvážit potřeba vyšších otáček generátoru, než které by byly potřeba při zapojení D.

Obecně lze tedy říci, že měřený speciální asynchronní motor je vhodné používat jako zdroj elektrické energie při zapojení YY, pokud bude možno zajistit požadované otáčky. Pokud by z nějakého důvodu nebylo možné požadovaných otáček dosáhnout, je možné přepnutí na zapojení D. Zhoršenou kvalitu takto zapojeného generátoru lze částečně kompenzovat zvětšením budící kapacity.



LITERATURA

- [1] LÁNÍČEK, Tomáš. *Asynchronní generátor v izolované (ostrovní) síti*. Brno, 2004. 80s. Diplomová práce.
- [2] TKOTZ, Klaus, et al. *Příručka pro elektrotechnika*. Jíří Handlíř. 2. přeprac. vyd. Praha : Europa Sobotáles , 2006. 623 s. ISBN 80-86706-13-3.
- [3] CHAN, T.F.; LAI, L.L.: Capacitance Requirements of a Three-Phase Induction Generator Self-Excited with a Single Capacitance and Supplying a Single-Phase Load. *Energy Conversion, IEEE Transaction on* Vol. 17, Issue 1, Mar 2002, Page(s): 90–94, Digital Object Identifier 10.1109/60.986443.
- [4] *Asynchronní (indukční) stroje (rotory)* [online]. 2004 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://fei1.vsb.cz/kat448/Studium/Materialy/VS/kap23.pdf>>.
- [5] LAIKA, Viktor. *Asynchronní generátor* [online]. 2.října 2004 [cit. 2008-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://mve.energetika.cz/sikovneruce/asynchronni-generator.htm>>.
- [6] Technická univerzita v Liberci, fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií. *Střídavé motory* [online]. 3.říjen 2006 [cit. 2007-12-14]. Dostupný z WWW: <http://www.mti.tul.cz/files/evc/EI_Str2_h.pdf>.
- [7] KOČMAN, Karel, et al. *TC Encyklopedie : Asynchronní stroj s kotvou na krátko* [online]. 30. října 2007 [cit. 2008-03-12]. Dostupný z WWW: <www.techcorp.cz/0021/000008.html>.
- [8] *Elektrické stroje* [online]. 2004 [cit. 2007-10-19]. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/fiserl/docs/ZE_Elektricke_stroje.pdf>.
- [9] *INDUCTION MOTOR* [online]. 30. srpen 2002 [cit. 2008-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.geocities.com/vijayakumar777/inductionmotor/inductionmotor.html>>.
- [10] *Asynchronní motor* [online]. 22.duben 2008 [cit. 2007-09-12]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD_motor>



PŘÍLOHY

Příloha č.1

Velikost koeficientu k pro asynchronní stroje s kotvou nakrátko:

p=1

P_n	k
kW	-
do 2,2	0,5
3 až 13	0,4
14 až 75	0,3

p=2

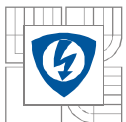
P_n	k
kW	-
do 1,1	0,7
1,5 až 4	0,6
4 až 22	0,5
nad 22	0,3

p=3

P_n	k
kW	-
do 1,1	0,8
1,1 až 7,5	0,6
7,5 až 22	0,4
nad 22	0,3

p=4

P_n	k
kW	-
do 0,75	1
0,8 až 3	0,6
3 až 13	0,6
nad 13	0,4



Příloha č.2: Zapojení YY, C=14μF

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, C=14μF, U=180V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
90	240/120	180	36	1/100	0,36	38	1/100	0,38	58	1/100	0,58
			46		0,46	45		0,45	70		0,7
			50		0,5	50		0,5	79		0,79
			61		0,61	62		0,62	93		0,93
			70		0,7	70		0,7	100		1

Tabulka 2: Pokračování tabulky č.1

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
10	120*5/120	50	19	120*5/120	95	2004	0,44	145
12		60	22		110	2033	0,54	170
13		65	25		125	2036	0,60	190
16		80	29		145	2073	0,72	225
20		100	32		160	2110	0,80	260

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, C=14μF, U=160V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
80	240/120	160	33	1/100	0,33	35	1/100	0,35	54	1/100	0,54
			40		0,4	40		0,4	62		0,62
			52		0,52	52		0,52	77		0,77
			62		0,62	62		0,62	88		0,88
			69		0,69	70		0,7	98		0,98

Tabulka 4: Pokračování tabulky č.3

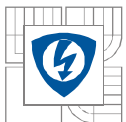
P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
8	120*5/120	40	15	120*5/120	75	1897	0,41	115
9		45	17		85	1907	0,47	130
12		60	21		105	1941	0,60	165
15		75	24		120	1974	0,71	195
17		85	27		135	2004	0,79	220

Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, C=14μF, U=140V=konst

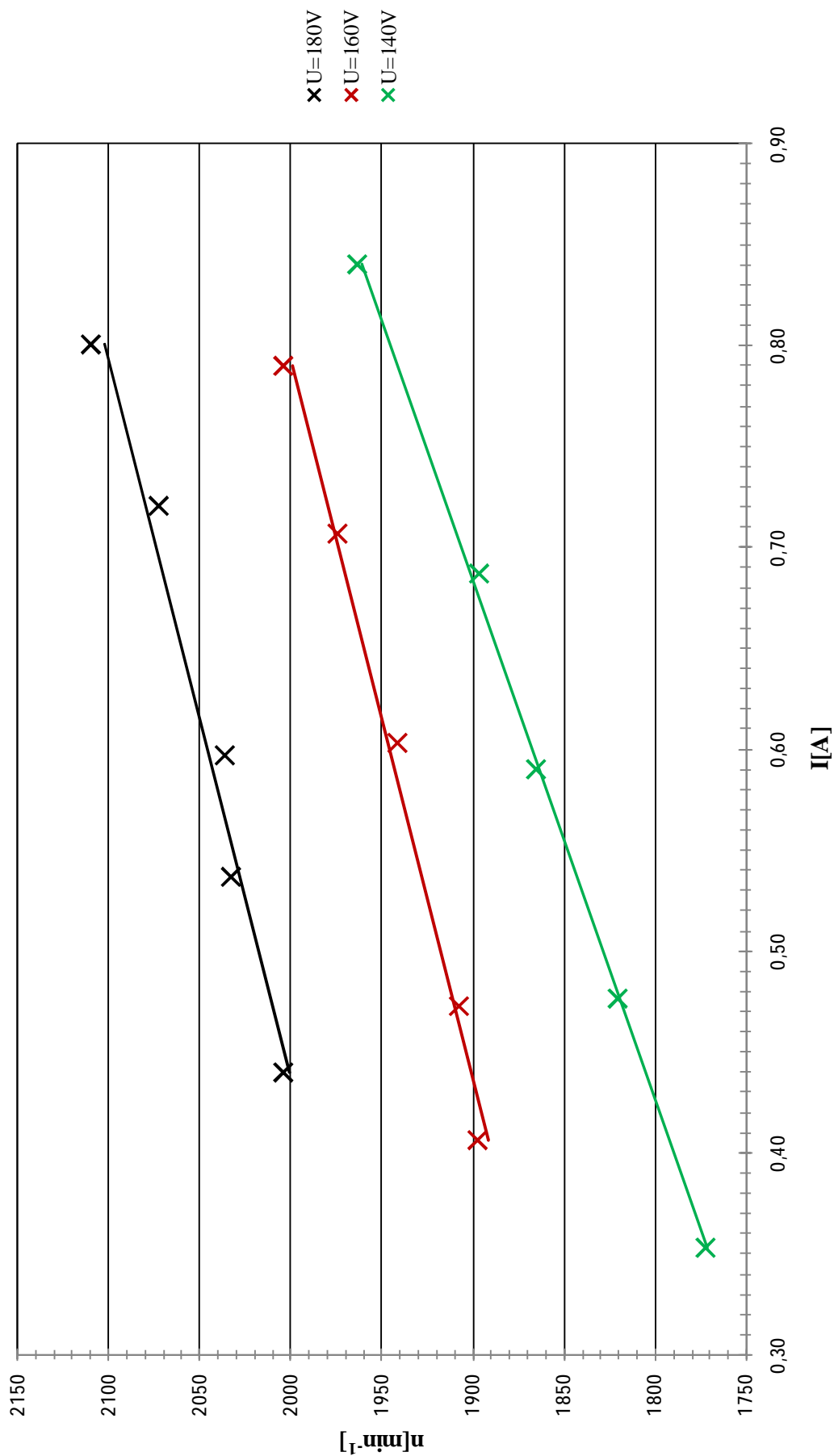
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
70	240/120	140	29	1/100	0,29	30	1/100	0,3	47	1/100	0,47
			41		0,41	40		0,4	62		0,62
			51		0,51	51		0,51	75		0,75
			60		0,6	61		0,61	85		0,85
			76		0,76	76		0,76	100		1

Tabulka 6: Pokračování tabulky č.5

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
6	120*5/120	30	11	120*5/120	55	1772	0,35	85
8		40	15		75	1820	0,48	115
11		55	18		90	1865	0,59	145
14		70	21		105	1896	0,69	175
18		90	25		125	1963	0,84	215



**Zapojení YY, $C=14\mu\text{F}$
Závislost otáček na zatížení, $U=\text{konst}$**



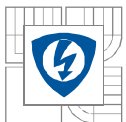


Tabulka 7: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=14\mu F$

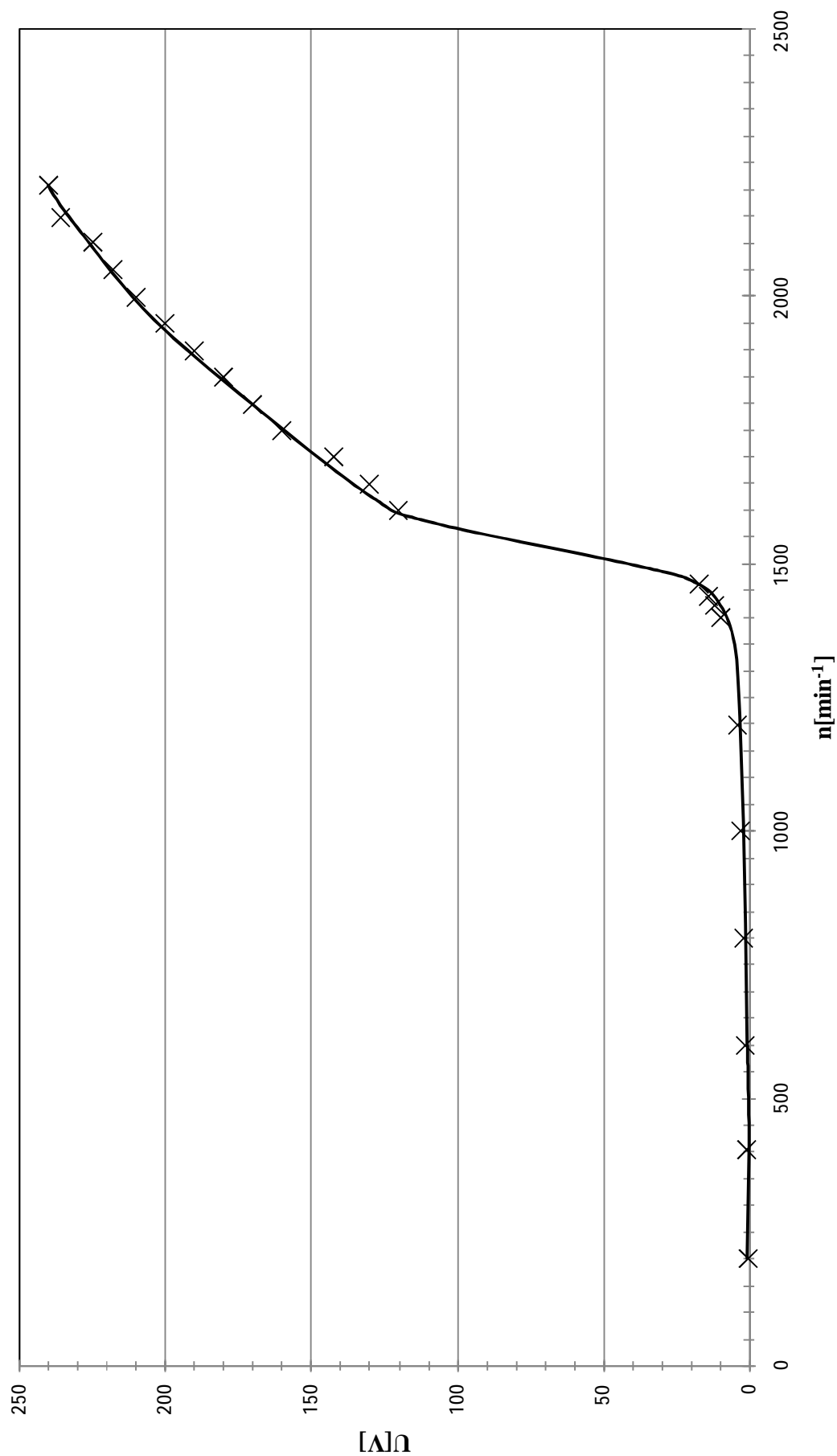
n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
200	19	2,4/120	0,38
405	38		0,76
600	60		1,2
800	89		1,78
1000	56	6/120	2,8
1200	86		4,3
1400	50	24/120	10
1422	60		12
1440	70		14
1462	85		17
1480	87,5		17,5
1500	40		8
1520	44		8,8
1542	50		10
1560	58		11,6
1580	47,5		9,5
1601	55		11
1623	30		6
1644	35		7
1659	38		7,6
1680	40	8	
1700	35	7	
1720	37,5	7,5	

Tabulka 8: Odbuzení asynchronního generátoru, Zapojení YY, $C=14\mu F$

n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
2240	120	240/120	240
2130	110		220
2000	100		200
1902	90		180
1803	80		160
1700	70		140
1600	60		120
1549	105		120/120
1505	93	93	
1480	86	86	
1445	71	24/120	71
1392	20		4
1300	54	6/120	2,7
1200	95	2,4/120	1,9
1100	75		1,5
992	65		1,3
900	45		0,9
799	38		0,76
701	31		0,62
601	25		0,5
500	20		0,4
405	15		0,3
110	0		0

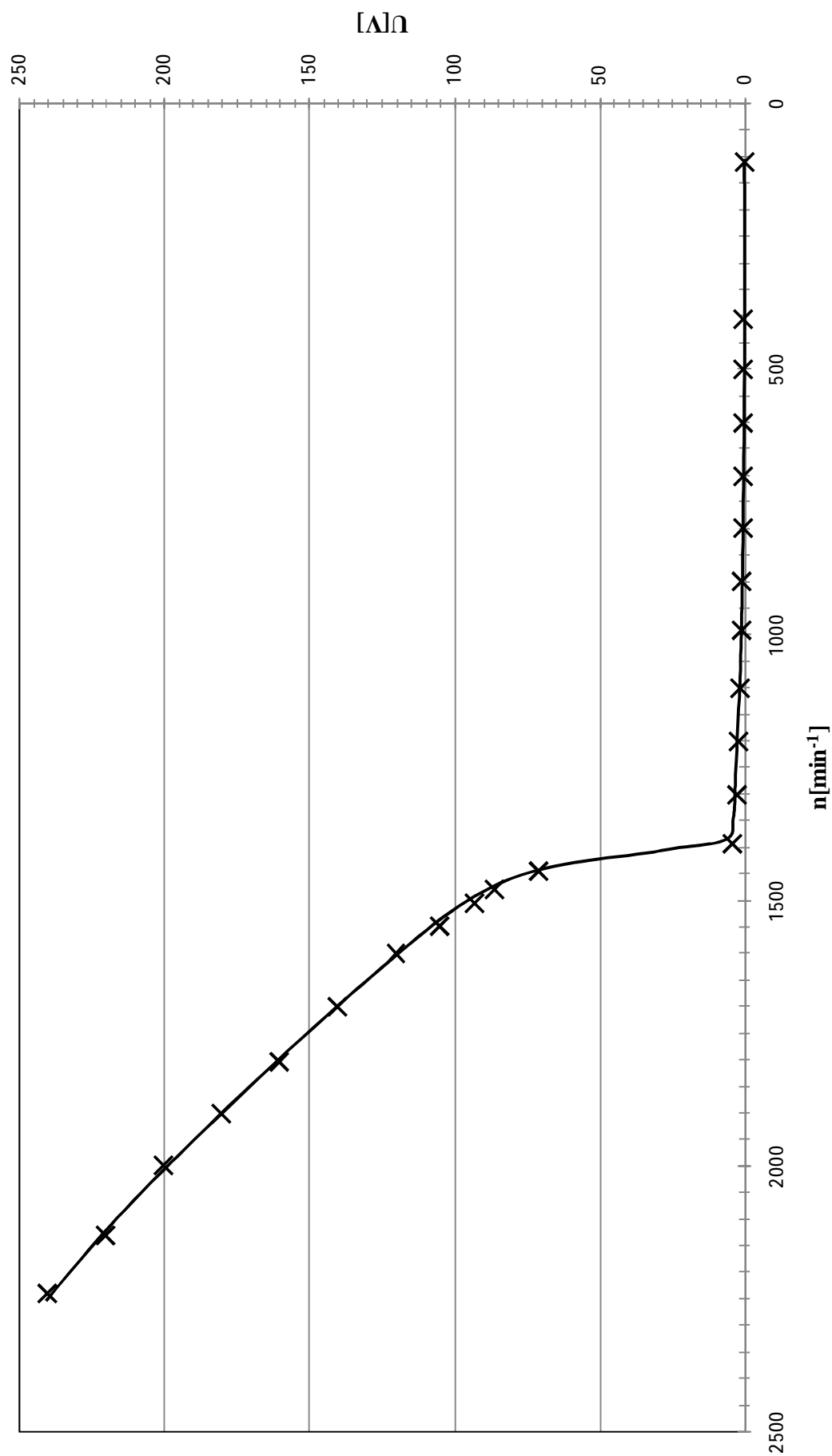


**Zapojení YY, C=14 μ F
Nabuzení asynchronního generátoru**





**Zapojení YY, $C=14\mu\text{F}$
Odbuzení asynchronního generátoru**



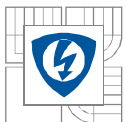


Tabulka 9: Měření při zapojení YY, $C=14\mu F$, $n=konst$

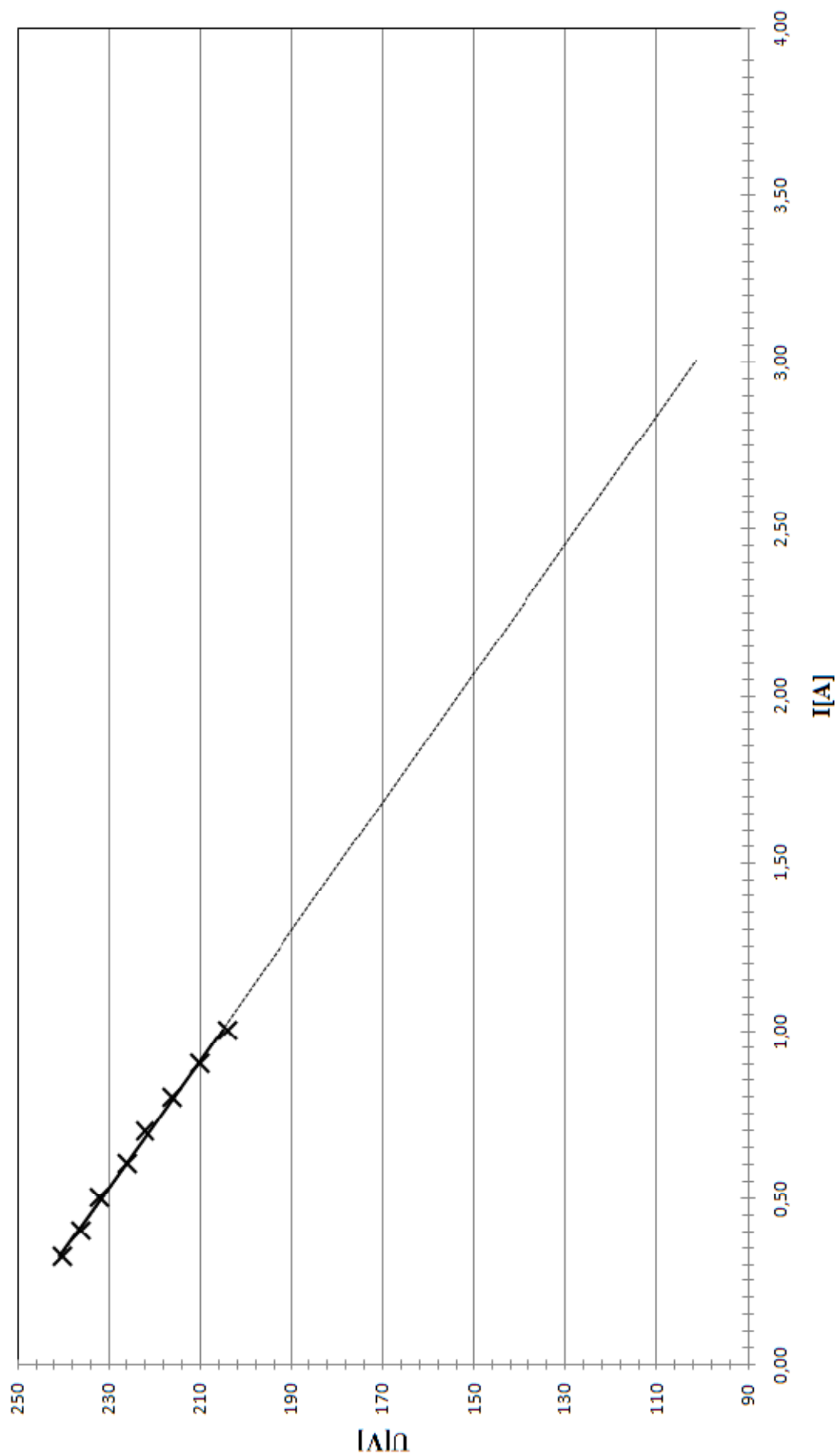
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
120	240/120	240	32	1/100	0,32	34	1/100	0,34	31	1/100	0,31
118		236	40		0,4	40		0,4	40		0,4
116		232	50		0,5	50		0,5	50		0,5
113		226	60		0,6	60		0,6	60		0,6
111		222	70		0,7	70		0,7	70		0,7
108		216	80		0,8	80		0,8	80		0,8
105		210	90		0,9	90		0,9	90		0,9
102		204	100		1	100		1	100		1

Tabulka 10: Pokračování tabulky č.9

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
15	120*5/120	75	14	120*5/120	70	1990	0,32	145
18		90	18		90		0,40	180
21		105	21		105		0,50	210
25		125	24		120		0,60	245
28		140	27		135		0,70	275
31		155	31		155		0,80	310
34		170	34		170		0,90	340
36		180	37		185		1,00	365



Zapojení YY, $C=14\mu\text{F}$, $n=2272 \text{ min}^{-1}=\text{konst}$
VA charakteristika AG





Příloha č.3: Zapojení YY, C=28,5μF

Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, C=28,5μF, U=180V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
90	240/120	180	25	1/100	0,25	25	1/100	0,25	23	1/100	0,23
			30		0,3	30		0,3	30		0,3
			40		0,4	40		0,4	40		0,4
			50		0,5	50		0,5	50		0,5
			60		0,6	60		0,6	60		0,6
			70		0,7	70		0,7	70		0,7
			80		0,8	80		0,8	80		0,8
			90		0,9	90		0,9	90		0,9
			100		1	100		1	100		1

Tabulka 12: Pokračování tabulky č.11

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
9	120*5/120	45	8	120*5/120	40	1656	0,24	85
11		55	10		50	1665	0,30	105
14		70	13		65	1690	0,40	135
17		85	16		80	1709	0,50	165
20		100	19		95	1734	0,60	195
23		115	22		110	1758	0,70	225
26		130	25		125	1779	0,80	255
29		145	28		140	1804	0,90	285
32		160	31		155	1830	1,00	315

Tabulka 13: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, C=28,5μF, U=160V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
80	240/120	160	21	1/100	0,21	22	1/100	0,22	23	1/100	0,23
			30		0,3	30		0,3	30		0,3
			40		0,4	40		0,4	40		0,4
			50		0,5	50		0,5	50		0,5
			60		0,6	60		0,6	60		0,6
			70		0,7	70		0,7	70		0,7
			80		0,8	80		0,8	80		0,8
			90		0,9	90		0,9	90		0,9
			100		1	100		1	100		1

Tabulka 14: Pokračování tabulky č.13

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
6	120*5/120	30	5	120*5/120	25	1542	0,22	55
9		45	8		40	1559	0,30	85
12		60	11		55	1585	0,40	115
15		75	14		70	1604	0,50	145
18		90	17		85	1633	0,60	175
21		105	20		100	1654	0,70	205
23		115	22		110	1685	0,80	225
26		130	25		125	1705	0,90	255
29		145	28		140	1734	1,00	285

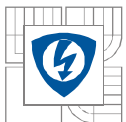


Tabulka 15: Naměřené hodnoty pro zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $U=140V=konst$

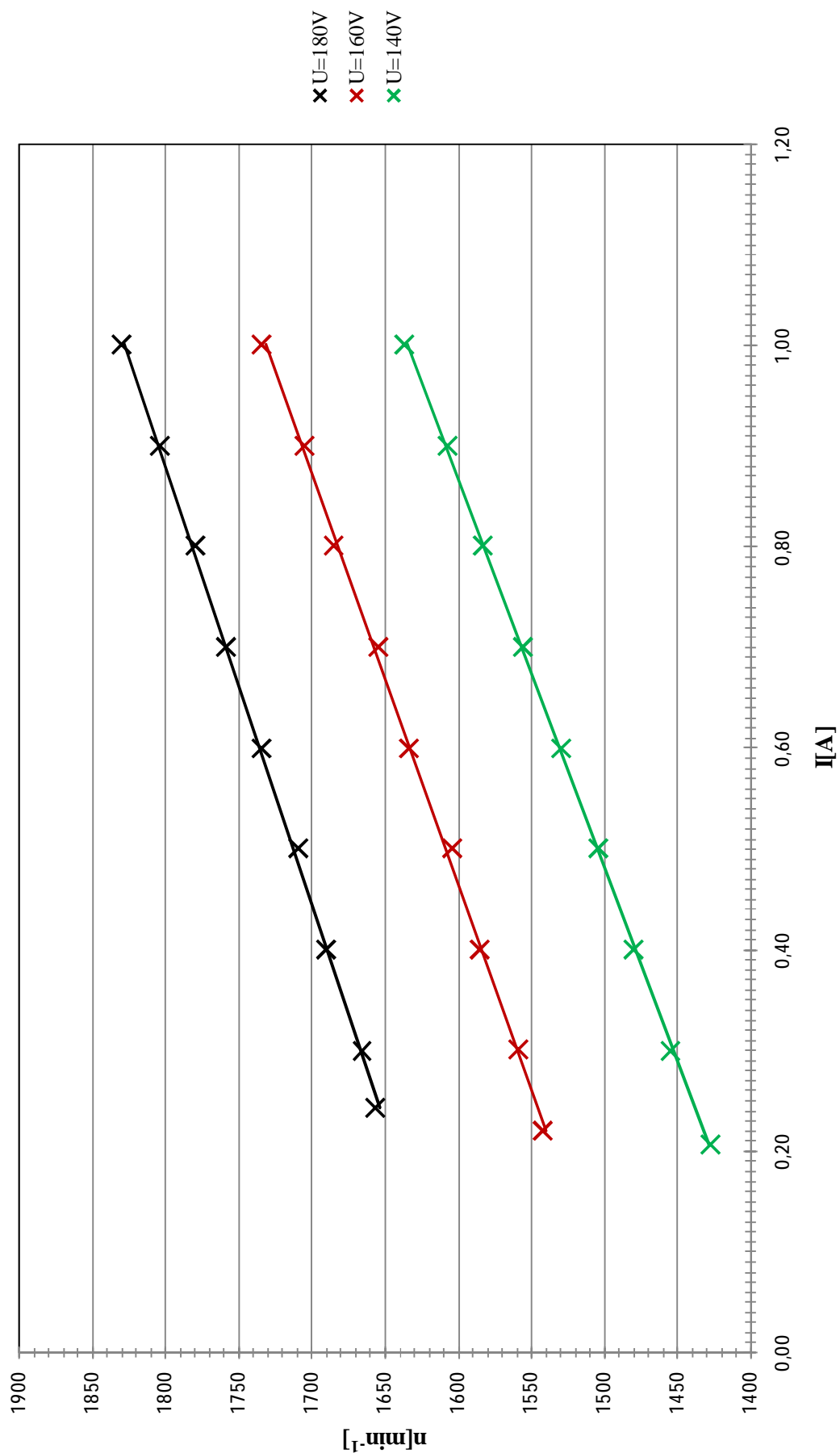
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
70	240/120	140	22	1/100	0,22	22	1/100	0,22	18	1/100	0,18
			30		0,3	30		0,3			
			40		0,4	40		0,4			
			50		0,5	50		0,5			
			60		0,6	60		0,6			
			70		0,7	70		0,7			
			80		0,8	80		0,8			
			90		0,9	90		0,9			
			100		1	100		1			

Tabulka 16: Pokračování tabulky č.15

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
6	120*5/120	30	5	120*5/120	25	1427	0,21	55
8		7	35		1454	0,30	75	
11		10	50		1480	0,40	105	
13		12	65		1504	0,50	125	
16		15	80		1529	0,60	155	
18		17,5	90		1555	0,70	177,5	
21		20	105		1582	0,80	205	
23		22	115		1607	0,90	225	
25		25	125		1636	1,00	250	



**Zapojení YY, $C=28,5\mu\text{F}$
Závislost otáček na zatížení, $U=\text{konst}$**



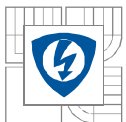


Tabulka 17: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=28,5\mu F$

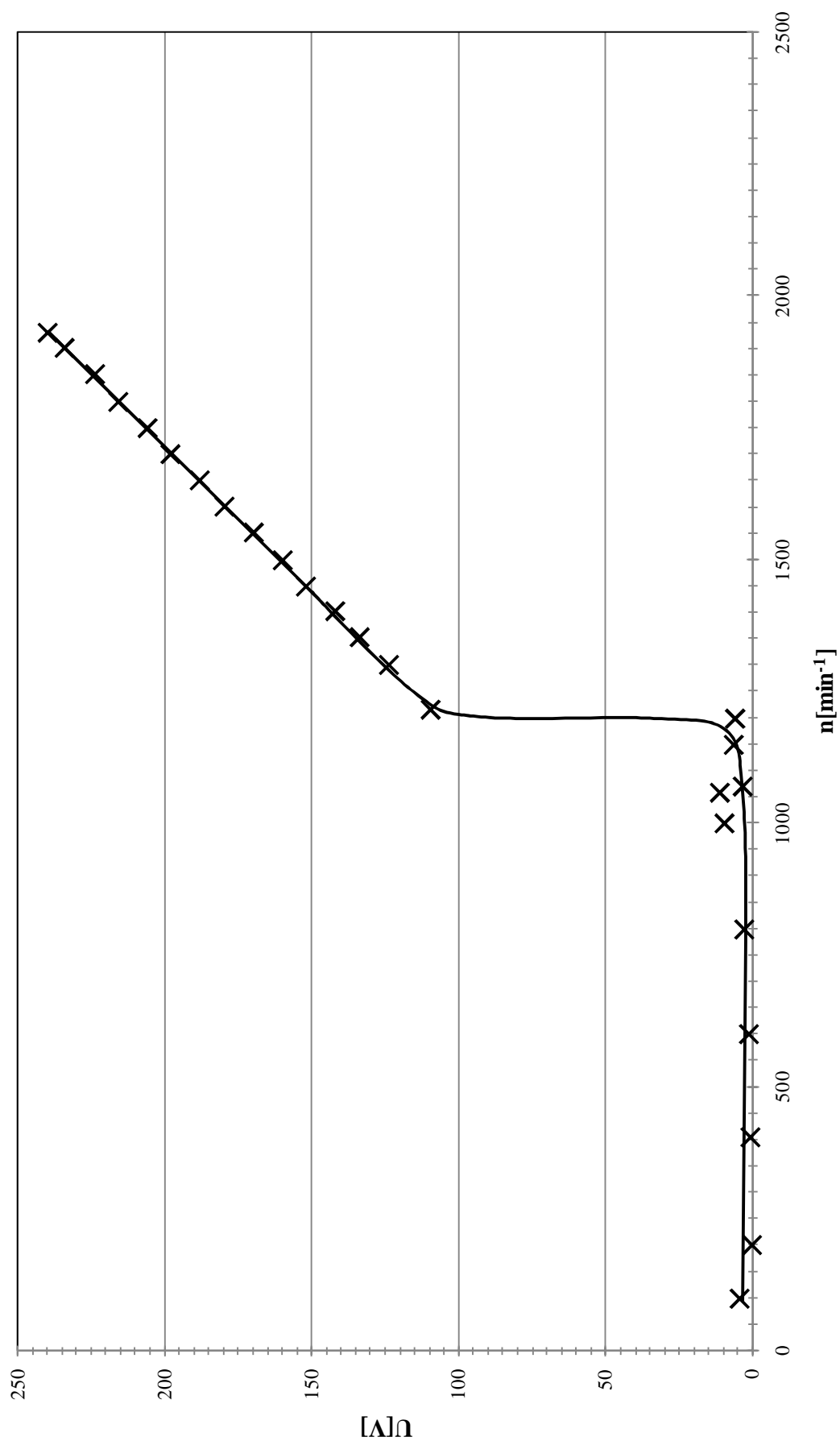
n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
202	21	2,4/120	0,42
405	46		0,92
602	80		1,6
800	60	6/120	3
1001	49	24/120	9,8
1059	57		11,4
1070	68	6/120	3,4
100	88		4,4
1150	34	24/120	6,8
1200	30		6
1215	110	120/120	110
1300	62	240/120	124
1352	67		134
1404	71		142
1450	76		152
1499	80		160
1550	85		170
1600	90		180
1650	94		188
1700	99		198
1750	103		206
1800	108		216
1850	112		224
1900	117		234
1930	120		240

Tabulka 18: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení YY, $C=28,5\mu F$

n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
1930	120	240/120	240
1879	115		230
1824	110		220
1771	105		210
1716	100		200
1609	90		180
1500	80		160
1380	70		140
1269	60		120
1174	100		120/120
1090	80	80	
1027	60	60	
990	36	6/120	36
957	64		3,2
900	46	2,3	
798	70	2,4/120	1,4
700	50		1
603	39		0,78
50	29		0,58
303	15		0,3
113	0	0	

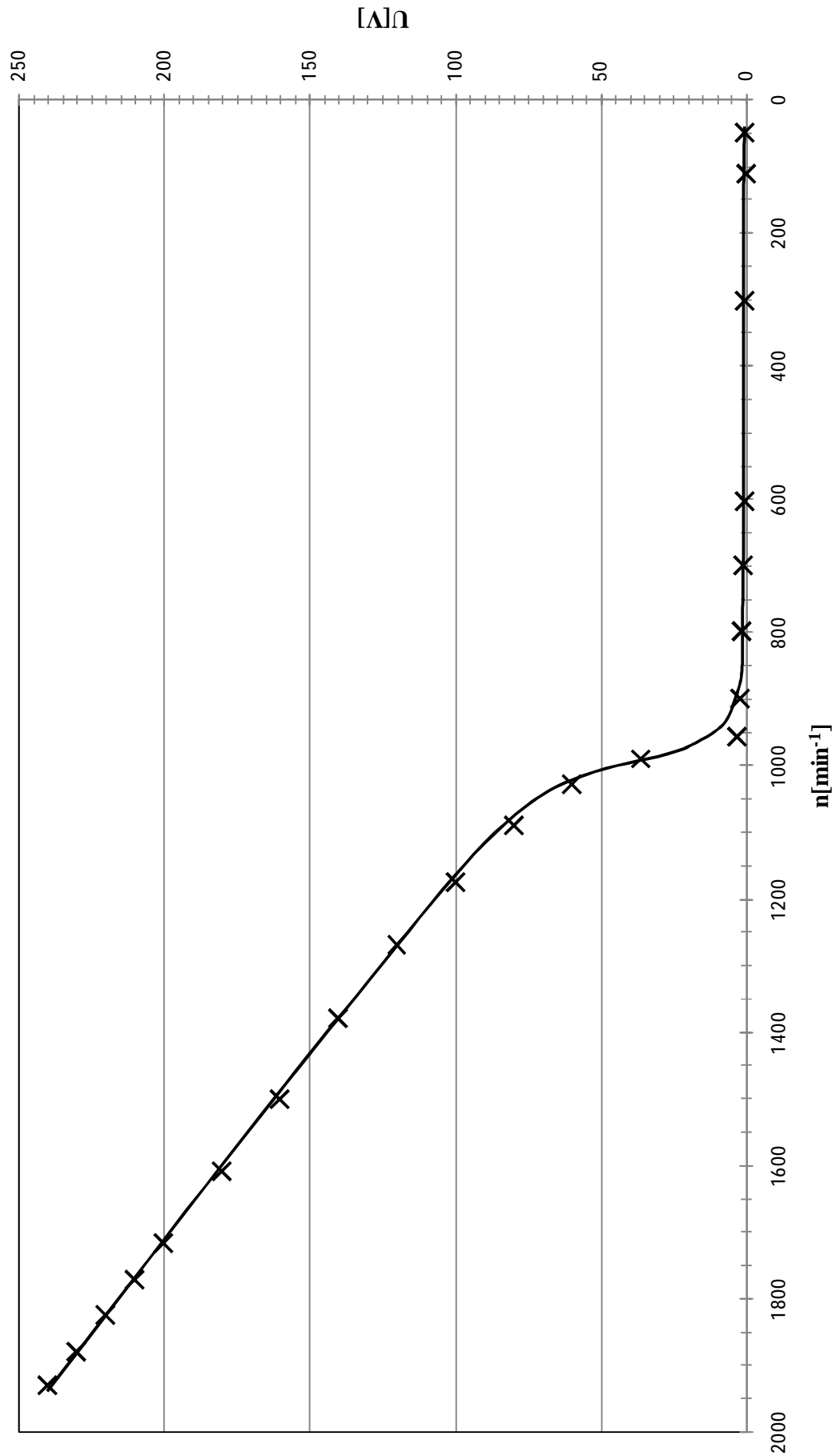


**Zapojení YY, C=28,5 μ F
Nabuzení asynchronního generátoru**





**Zapojení YY, $C=28,5\mu\text{F}$
Odbuzení asynchronního generátoru**



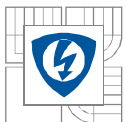


Tabulka 19: Měření při zapojení YY, $C=28,5\mu F$, $n=konst$

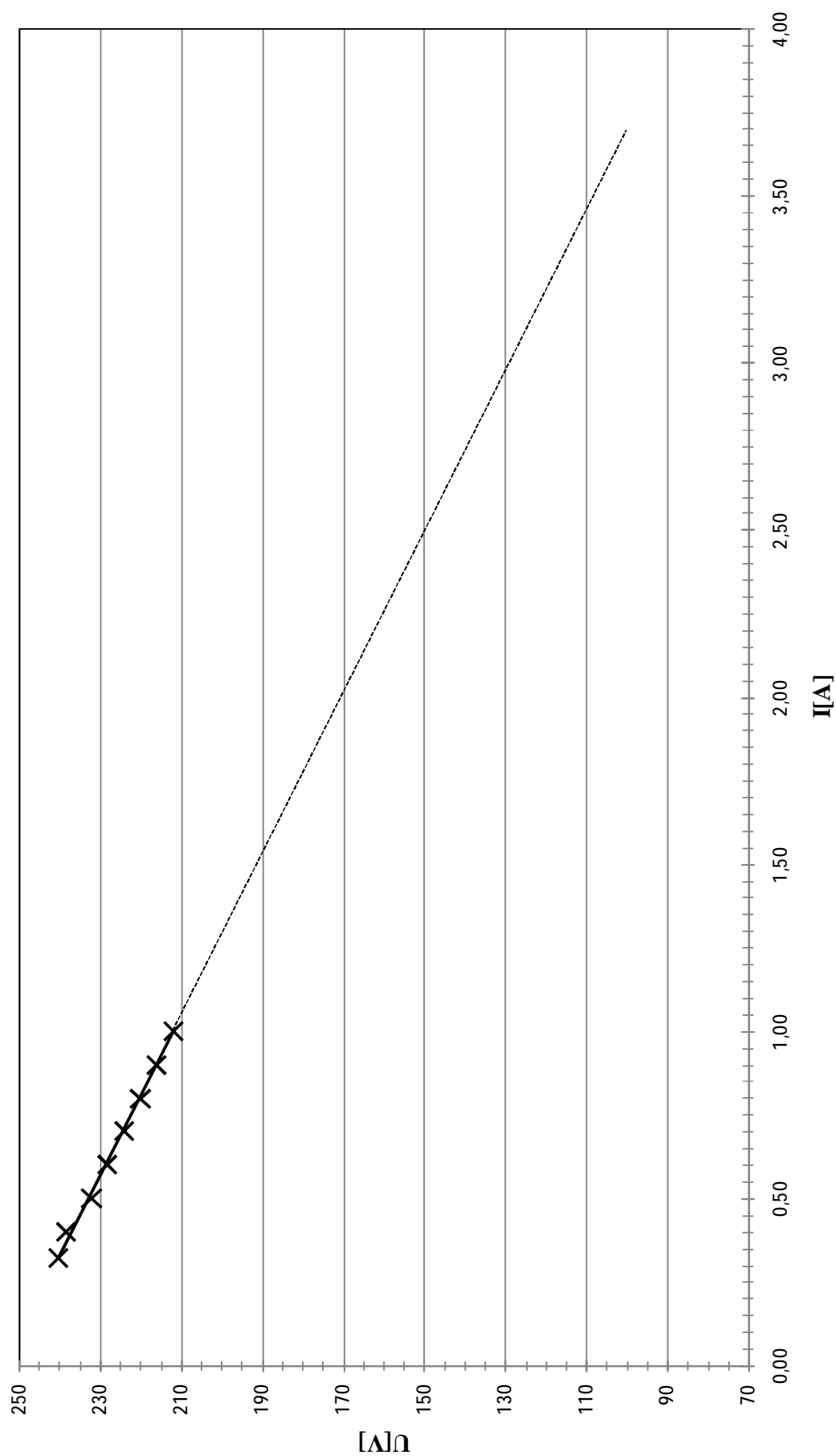
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
120	240/120	240	32	1/100	0,32	33	1/100	0,33	31	1/100	0,31
119		238	40		0,4	40		0,4	40		0,4
116		232	50		0,5	50		0,5	50		0,5
114		228	60		0,6	60		0,6	60		0,6
112		224	70		0,7	70		0,7	70		0,7
110		220	80		0,8	80		0,8	80		0,8
108		216	90		0,9	90		0,9	90		0,9
106		212	100		1	100		1	100		1

Tabulka 20: Pokračování tabulky č.19

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
15	120*5/120	75	14	120*5/120	70	1990	0,32	145
18		90	17		85		0,40	175
22		110	21		105		0,50	215
26		130	25		125		0,60	255
29		145	28		140		0,70	285
32		160	31		155		0,80	315
35		175	34		170		0,90	345
37		185	37		185		1,00	370



**Zapojení YY, $C=28,5\mu\text{F}$, $n=1990 \text{ min}^{-1}=\text{konst}$
VA charakteristika AG**





Příloha č.4: Zapojení D, C=14μF

Tabulka 21: Naměřené hodnoty pro zapojení D, C=14μF, U=180V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
90	240/120	180	25	1/100	0,25	25	1/100	0,25	22	1/100	0,22
			30		0,3	30		0,3	30		0,3
			45		0,45	45		0,45	45		0,45
			50		0,5	50		0,5	50		0,5
			60		0,6	60		0,6	60		0,6
			75		0,75	77		0,77	78		0,78
			94		0,94	94		0,94	94		0,94

Tabulka 22: Pokračování tabulky č.21

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
8	120*5/120	40	8	120*5/120	40	1025	0,24	80
11		55	10		50	1044	0,30	105
15		75	15		75	1071	0,45	150
17		85	17		85	1082	0,50	170
20		100	20		100	1114	0,60	200
24		120	25		125	1152	0,77	245
30		150	31		155	1208	0,94	305

Tabulka 23: Naměřené hodnoty pro zapojení D, C=14μF, U=160V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
80	1/100	160	21	1/100	0,21	23	1/100	0,23	20	1/100	0,2
			30		0,3	30		0,3	30		0,3
			46		0,46	46		0,46	46		0,46
			60		0,6	60		0,6	60		0,6
			80		0,8	80		0,8	80		0,8

Tabulka 24: Pokračování tabulky č.23

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
7	120*5/120	35	7	120*5/120	45	1011	0,21	80
9		45	9		65	1033	0,30	110
14		70	13		90	1070	0,46	160
18		90	18		115	1109	0,60	205
23		115	23		115	1178	0,80	230

Tabulka 25: Naměřené hodnoty pro zapojení D, C=14μF, U=140V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
70	1/100	140	22	1/100	0,22	15	1/100	0,15	18	1/100	0,18
			30		0,3	30		0,3	30		0,3
			40		0,4	40		0,4	40		0,4
			57		0,57	57		0,57	57		0,57

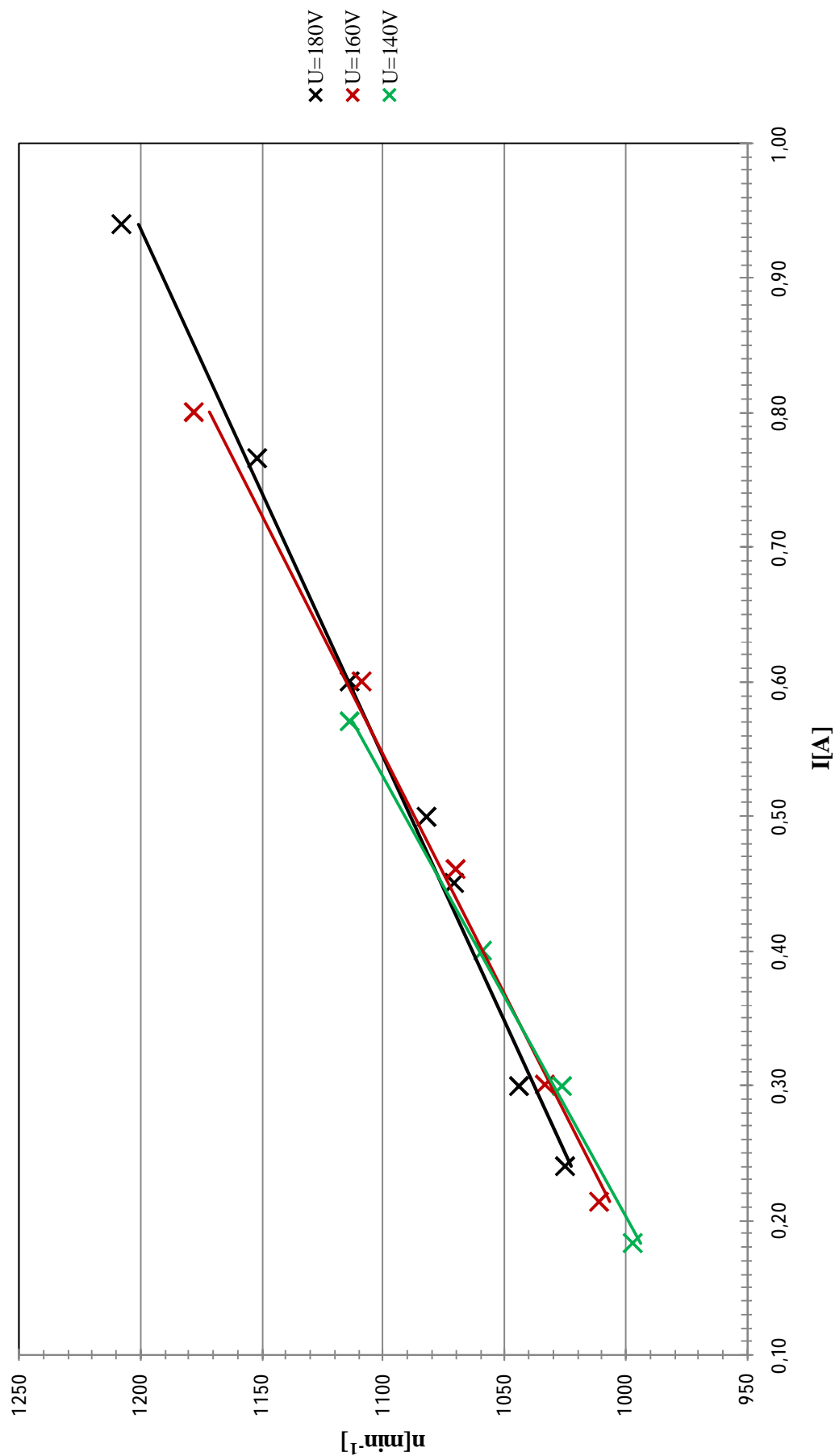


Tabulka 26: Pokračování tabulky č.25

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
5	120*5/120	25	5	120*5/120	25	997	0,18	50
8		40	8		40	1026	0,30	80
10		50	11		55	1059	0,40	105
15		75	15		75	1114	0,57	150



**Zapojení D, C=14 μ F
Závislost otáček na zatížení, U=konst**





Tabulka 27: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=14\mu F$

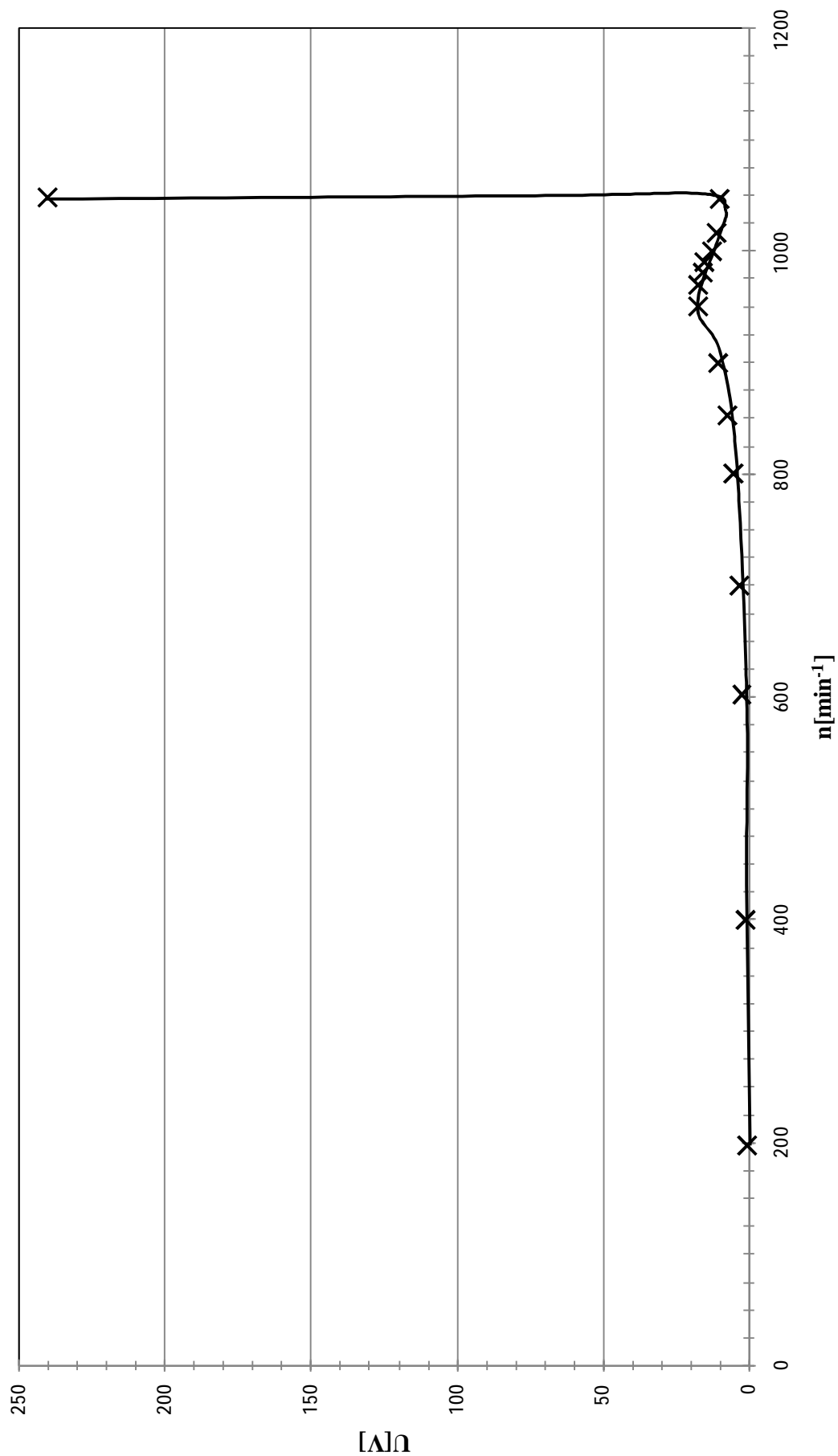
n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
198	19	2,4/120	0,38
400	54		1,08
602	111		2,22
700	64	6/120	3,2
800	100		5
853	35	24/120	7
900	52		10,4
950	85		17
970	85		17
980	77		15,4
990	75		15
1000	63		12,6
1016	54		10,8
1046	48		9,6
1048	120	240/120	240

Tabulka 28: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=14\mu F$

n [min ⁻¹]	Us		
	α	k	[V]
1048	120	240/120	240
1021	110		220
1000	100		200
983	90		180
967	80		160
954	70		140
941	60		120
933	100	120/120	100
920	115	6/120	5,75
850	63		3,15
790	108	2,4/120	2,16
600	46		0,92
500	30		0,6
400	19		0,38
200	0		0

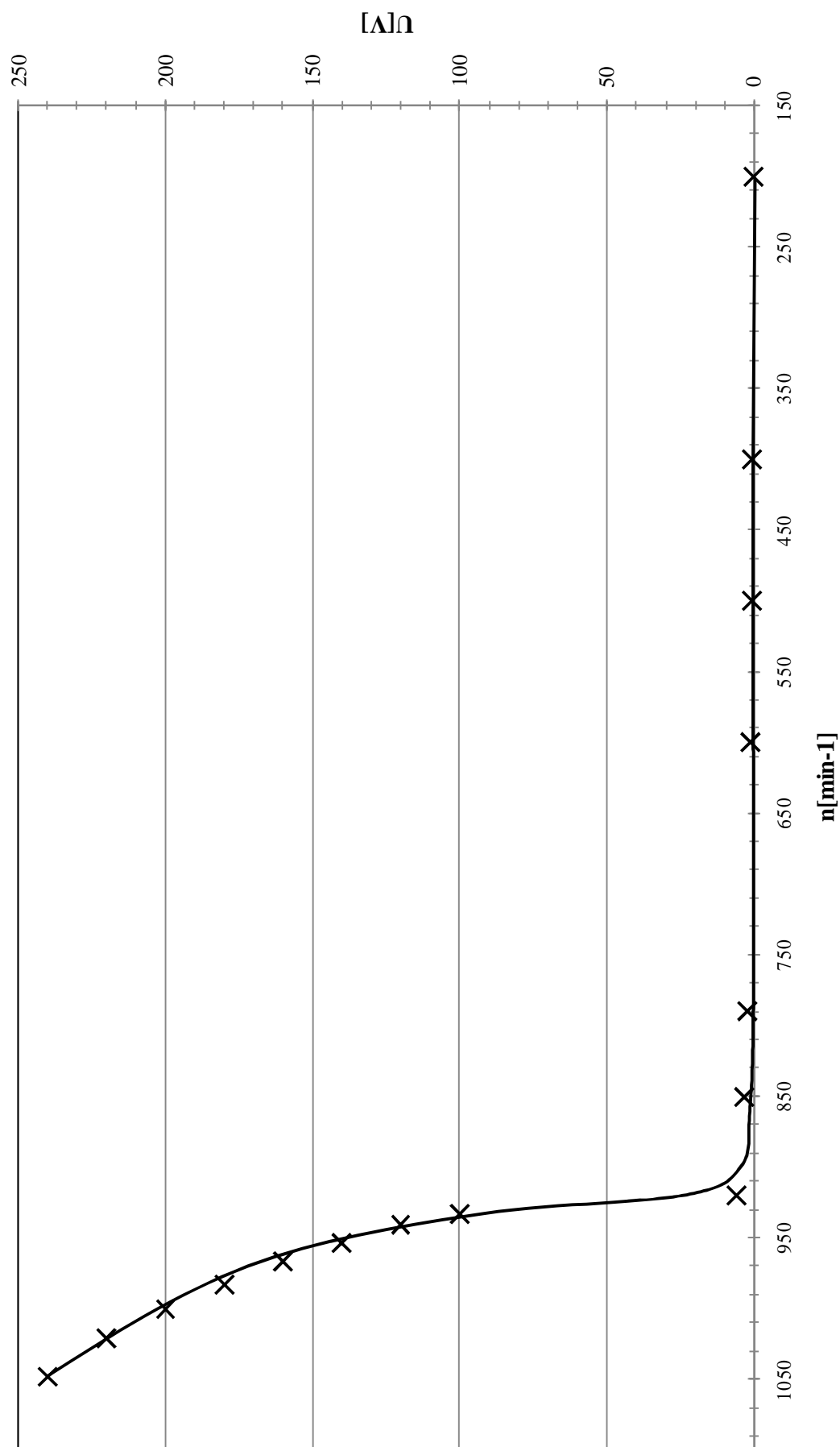


**Zapojení D, C=14 μ F
Nabuzení asynchronního generátoru**





**Zapojení D, C=14 μ F
Odbuzení asynchronního generátoru**





Tabulka 29: Měření při zapojení D, $C=14\mu F$, $n=konst$

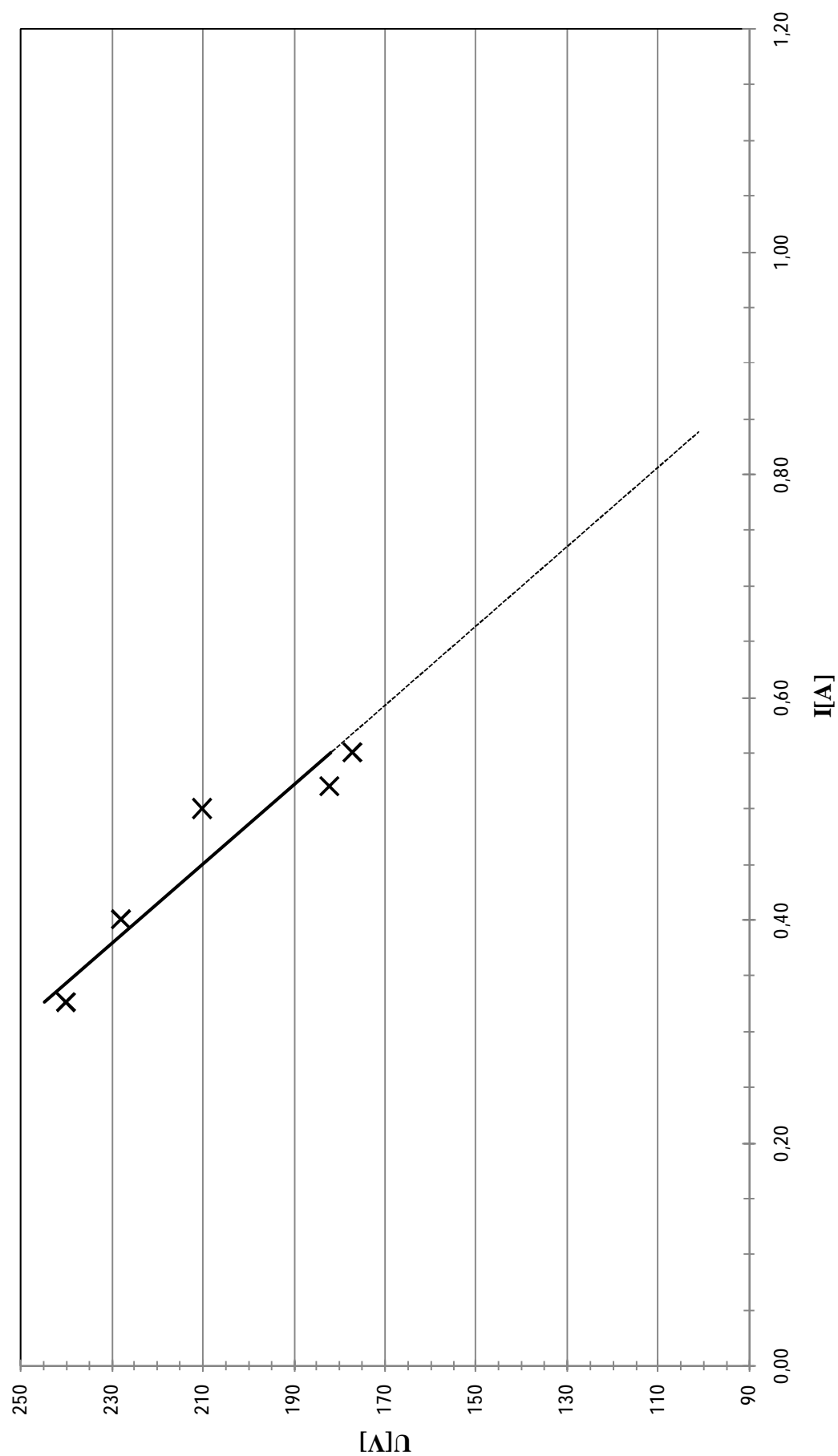
U _s			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
120	240/120	240	32	1/100	0,32	32	1/100	0,32	34	1/100	0,34
114		228	40		0,4	40		0,4	40		
105		210	50		0,5	50		0,5	50		
91		182	52		0,52	52		0,52	52		
88,5		177	55		0,55	55		0,55	55		

Tabulka 30: Pokračování tabulky č.29

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
15	120*5/120	75	13	120*5/120	65	1094	0,33	140
16		80	17		85		0,40	165
19		95	19		95		0,50	190
18		90	18		90		0,52	180
18		90	18		90		0,55	180



**Zapojení D, $C=14\mu\text{F}$, $n=1094\text{min}^{-1}=\text{konst}$
VA charakteristika AG**





Příloha č.5: Zapojení D, C=28,5μF

Tabulka 31: Naměřené hodnoty pro zapojení D, C=28,5μF, U=180V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
90	240/120	180	25	1/100	0,25	25	1/100	0,25	25	1/100	0,25
			30		0,3	30		0,3	30		
			40		0,4	40		0,4	40		
			50		0,5	50		0,5	50		
			60		0,6	60		0,6	60		
			70		0,7	70		0,7	70		
			80		0,8	80		0,8	80		
			90		0,9	90		0,9	90		
			100		1	100		1	100		

Tabulka 32: Pokračování tabulky č.31

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
9	120*5/120	45	8	120*5/120	40	795	0,25	85
11		55	10		50	798	0,30	105
14		70	13		65	812	0,40	135
17		85	16		80	827	0,50	165
19		95	19		95	840	0,60	190
23		115	23		115	856	0,70	230
26		130	26		130	874	0,80	260
28		140	28		140	888	0,90	280
31		155	33		165	908	1,00	320

Tabulka 33: Naměřené hodnoty pro zapojení D, C=28,5μF, U=160V=konst

Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
80	240/120	160	23	1/100	0,23	23	1/100	0,23	22	1/100	0,22
			30		0,3	30		0,3	30		
			40		0,4	40		0,4	40		
			50		0,5	50		0,5	50		
			60		0,6	60		0,6	60		
			70		0,7	70		0,7	70		
			80		0,8	80		0,8	80		
			90		0,9	90		0,9	90		
			100		1	100		1	100		

Tabulka 34: Pokračování tabulky č.33

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
7	120*5/120	35	6	120*5/120	45	760	0,23	80
9		45	9		55	773	0,30	100
12		60	11		70	787	0,40	130
15		75	14		85	802	0,50	160
18		90	17		100	823	0,60	190
20		100	20		115	837	0,70	215
23		115	23		130	860	0,80	245
25		125	26		130	874	0,90	255
28		140	29		145	896	1,00	285



Tabulka 35: Naměřené hodnoty pro zapojení D, $C=28,5\mu F$, $U=140V=konst$

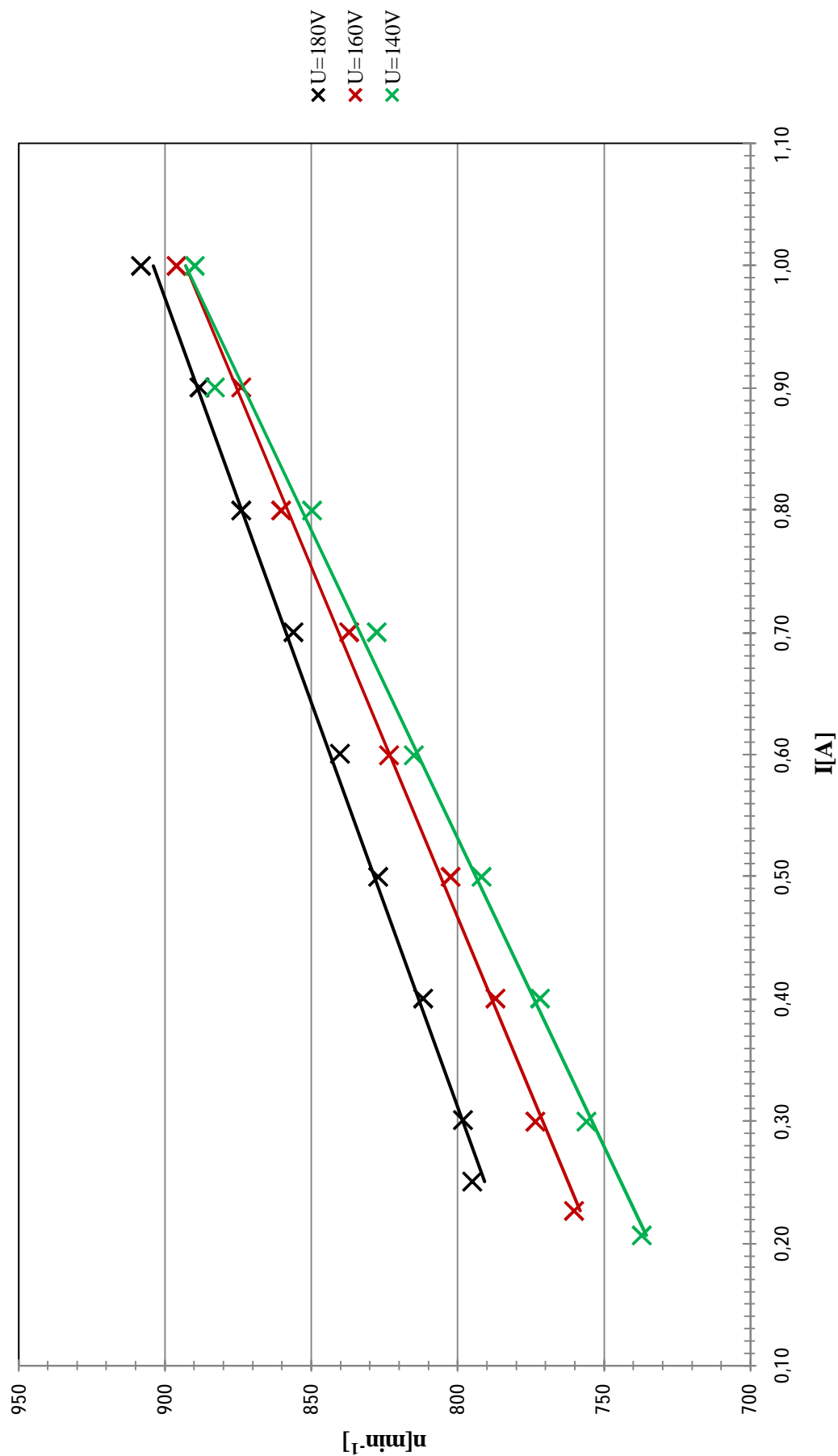
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
70	240/120	140	22	1/100	0,22	22	1/100	0,22	18	1/100	0,18
			30		0,3	30		0,3	0,3		
			40		0,4	40		0,4	0,4		
			50		0,5	50		0,5	0,5		
			60		0,6	60		0,6	0,6		
			70		0,7	70		0,7	0,7		
			80		0,8	80		0,8	0,8		
			90		0,9	90		0,9	0,9		
			100		1	100		1	1		

Tabulka 36: Pokračování tabulky č.35

P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
5	120*5/120	25	5	120*5/120	25	737	0,21	50
8		40	8		40	756	0,30	80
10		50	10		50	772	0,40	100
13		65	13		65	792	0,50	130
16		80	16		80	815	0,60	160
18		90	18		90	828	0,70	180
19		95	19		95	850	0,80	190
23		115	23		115	883	0,90	230
26		130	26		130	890	1,00	260



**Zapojení D, C=28,5 μ F
Závislost otáček na zatížení, U=konst**



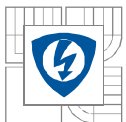


Tabulka 37: Nabuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=28,5\mu F$

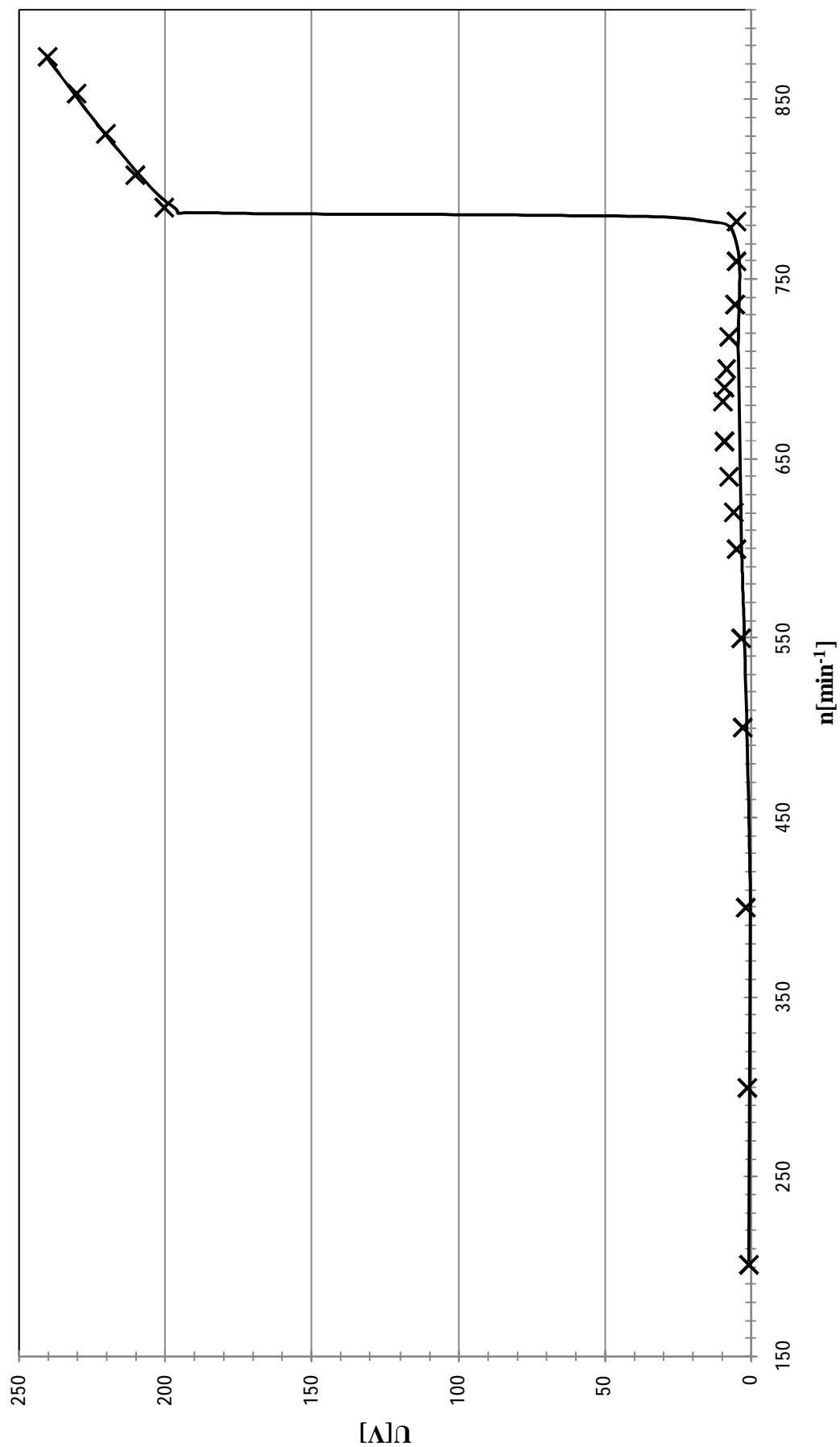
n [min ⁻¹]	U		
	α	k	[V]
201	19	2,4/120	0,38
300	36		0,72
400	62		1,24
500	117		2,34
550	60	6/120	3
600	89		4,45
620	28	24/120	5,6
640	35		7
660	45		9
682	47		9,4
690	43		8,6
700	40		8
718	35		7
736	25		5
760	23		4,6
782	22		4,4
790	100	240/120	200
808	105		210
831	110		220
853	115		230
874	120		240

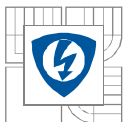
Tabulka 38: Odbuzení asynchronního generátoru, zapojení D, $C=28,5\mu F$

n [min ⁻¹]	U		
	α	k	[V]
874	120	240/120	240
859	115		230
834	110		220
790	100		200
757	90		180
729	80		160
705	70		140
688	60		120
672	50		100
662	40		80
644	59	120/120	2,95
600	37		1,85
500	41	2,4/120	0,82
400	22		0,44
300	11		0,22

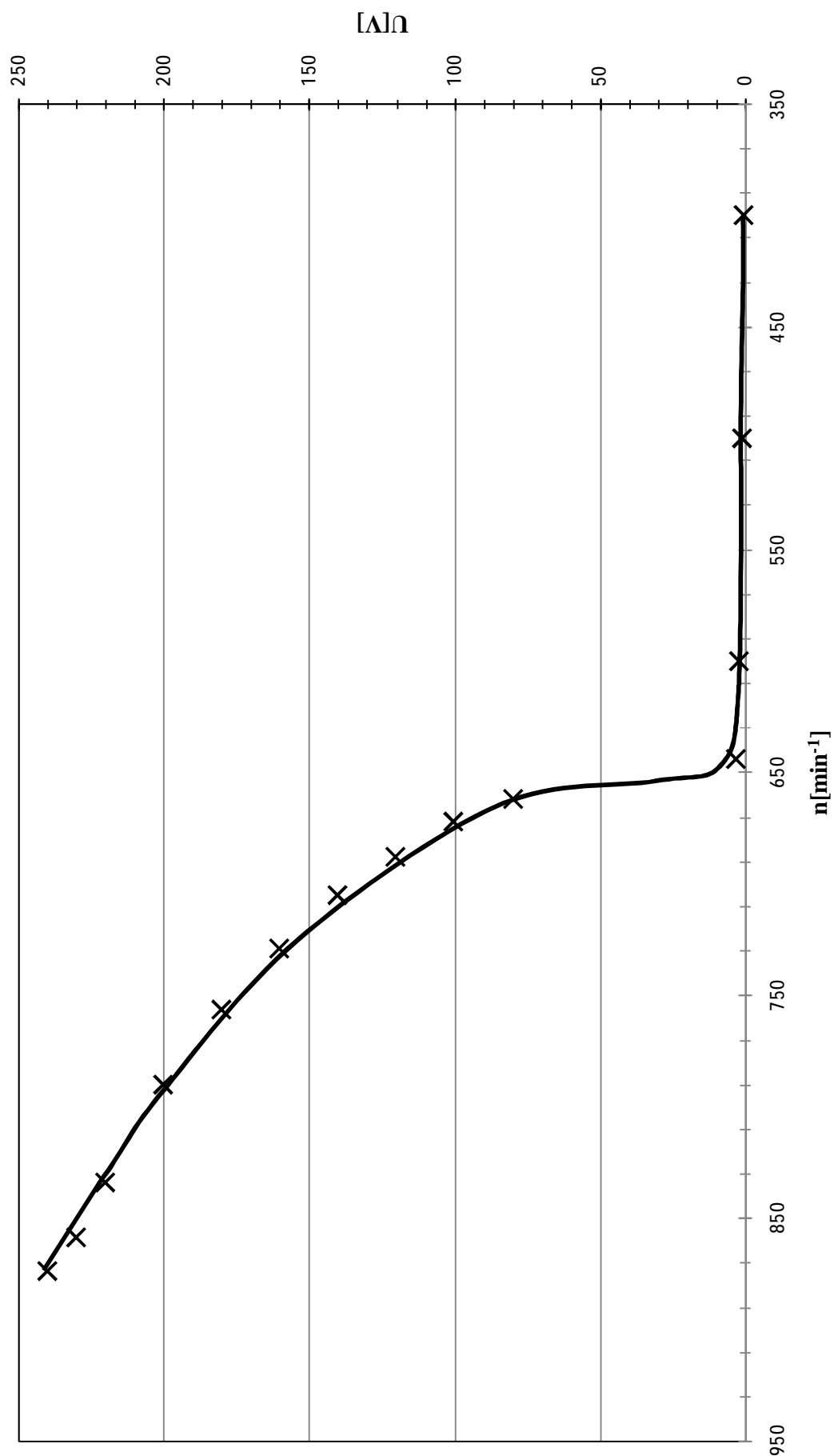


**Zapojení D, C=28,5 μ F
Nabuzení asynchronního generátoru**





**Zapojení D, C=28,5 μ F
Odbuzení asynchronního generátoru**



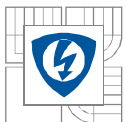


Tabulka 39: Měření při zapojení D, $C=28,5\mu F$, $n=konst$

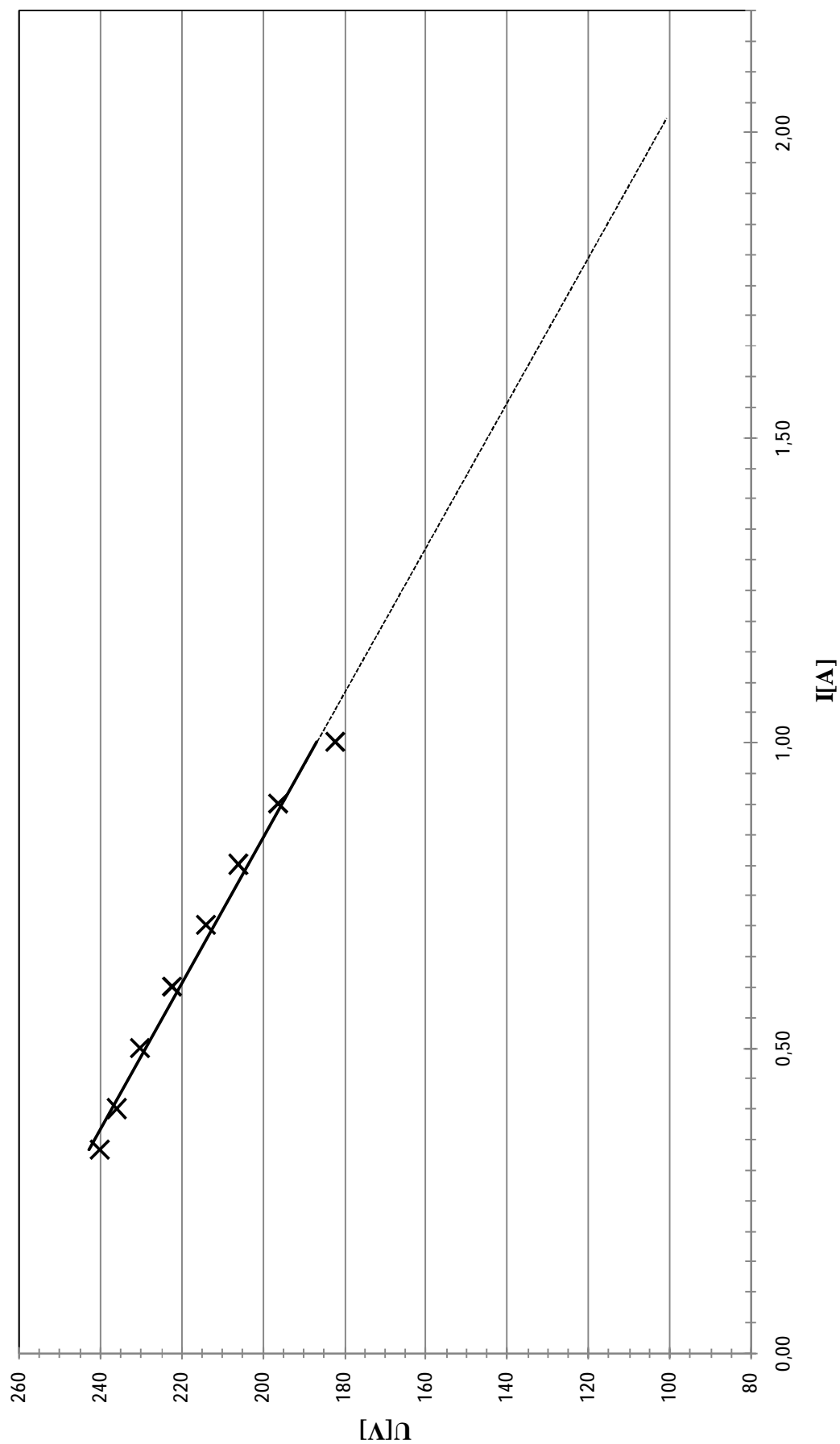
Us			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	α	k	[A]
120	240/120	240	34	1/100	0,34	34	1/100	0,34	32	1/100	0,32
118		236	40		0,4	40		0,4	40		
115		230	50		0,5	50		0,5	50		
111		222	60		0,6	60		0,6	60		
107		214	70		0,7	70		0,7	70		
103		206	80		0,8	80		0,8	80		
98		196	90		0,9	90		0,9	90		
91		182	100		1	100		1	100		

Tabulka 40: Pokračování tabulky č.39

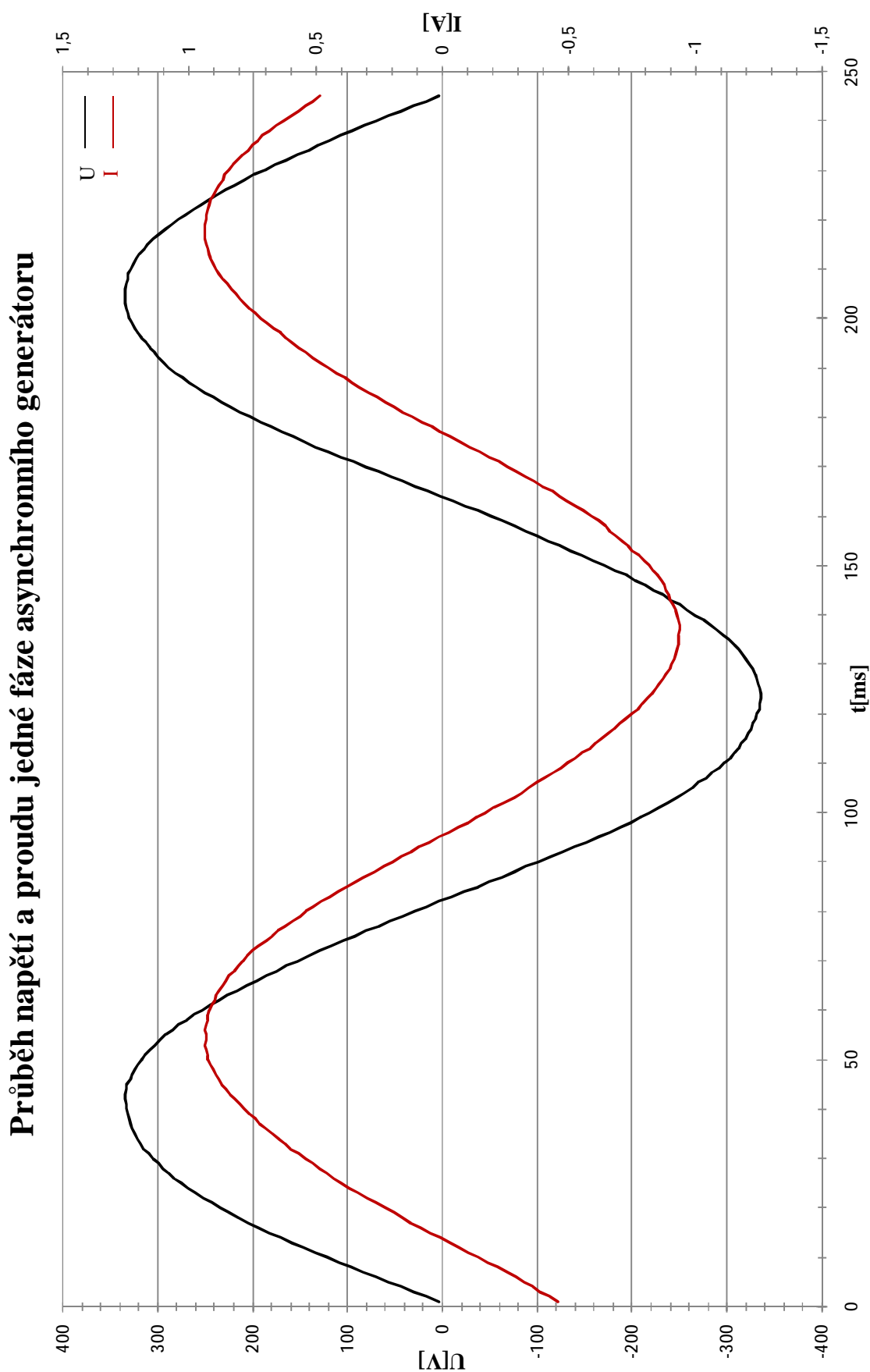
P ₁			P ₂			n	I	P
α	k	[W]	α	k	[W]	[min ⁻¹]	[A]	[W]
15	120*5/120	75	15	120*5/120	75	913	0,33	150
17		85	17		85		0,40	170
21		105	21		105		0,50	210
24		120	24		120		0,60	240
26		130	26		130		0,70	260
29		145	29		145		0,80	290
31		155	32		160		0,90	315
32		160	32		160		1,00	320



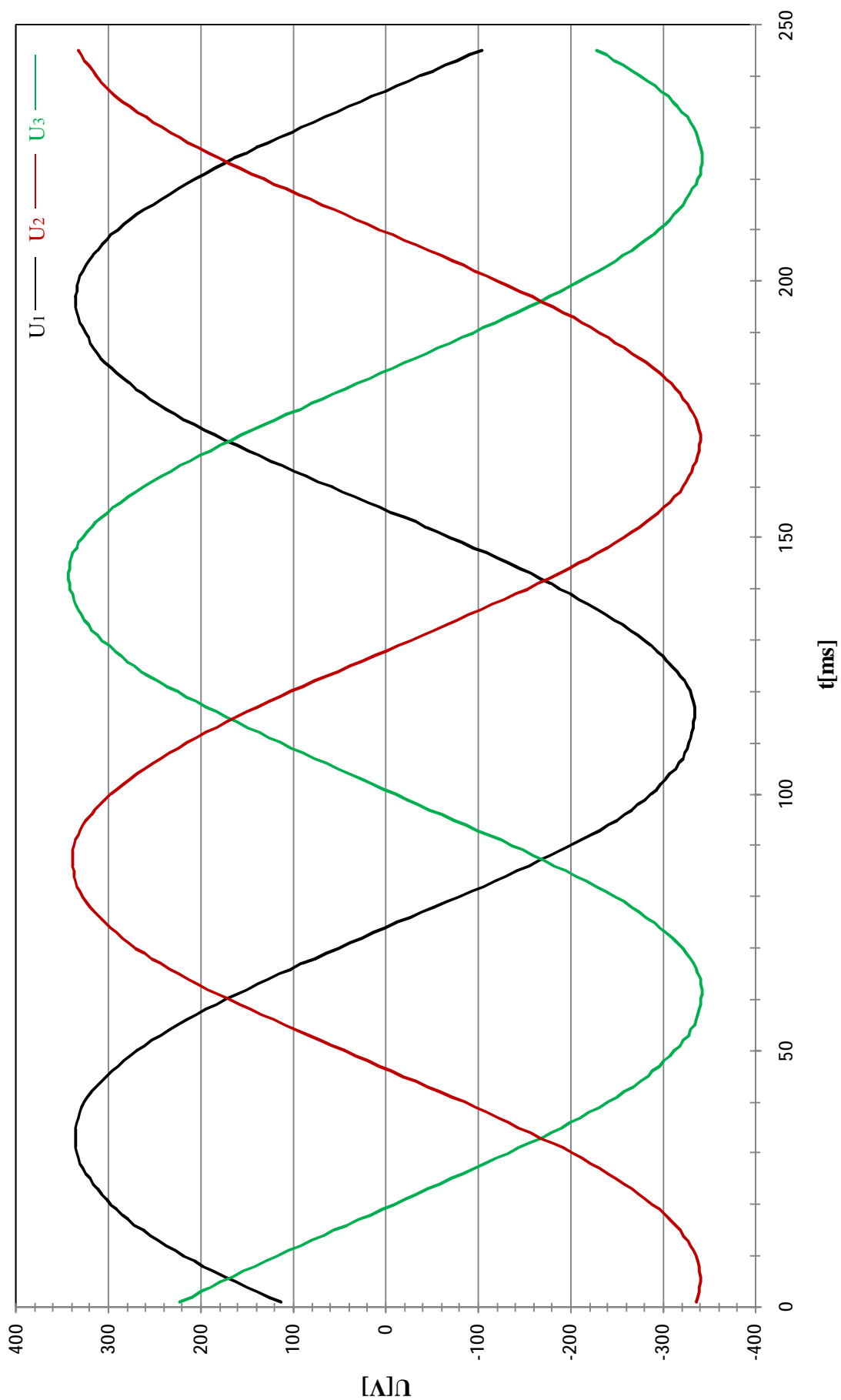
**Zapojení D, $C=28\mu\text{F}$, $n=913\text{min}^{-1}=\text{konst}$
VA charakteristika AG**

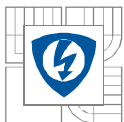


Příloha č.6: Grafy generovaných veličin AG



3f. průběh napětí asynchronního generátoru





3f. průběh proudu asynchronního generátoru

