

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

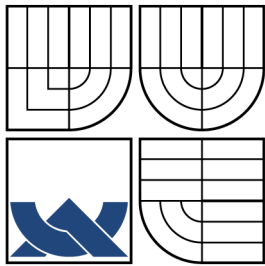
MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO VÝZKUMNÉ
A LABORATORNÍ VYUŽITÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

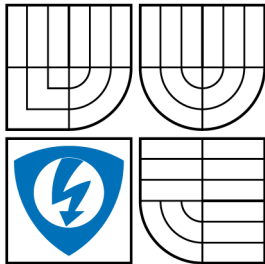
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ ŠTEVČEK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO VÝZKUMNÉ
A LABORATORNÍ VYUŽITÍ
WIND TURBINE MODEL FOR RESEARCH AND LABORATORY APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

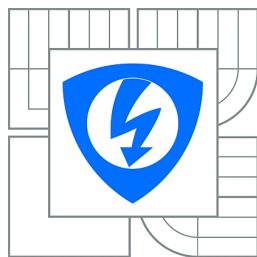
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ ŠTEVČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR MASTNÝ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Tomáš Števíček

ID: 134634

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Model větrné elektrárny pro výzkumné a laboratorní využití

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Fyzikálně-matematický popis funkce vybraného větrného motoru.
2. Sestavení základního matematického modelu VtE.
3. Ověření funkčnosti sestaveného modelu na reálné aplikaci.
4. Optimalizace matematického modelu a návrh integrace s dalšími energetickými modely.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Hlavným cieľom tejto práce bolo vytvoriť matematický model veternej turbíny Whisper 200 v prostredí programu Matlab-Simulink. Modelovaná turbína je inštalovaná na Ústave elektroenergetike, FEKT VUT. Model poskytuje možnosť simulácie niekoľkých charakteristík. Ich simuláciou boli získané závislosti výkonovej krivky, otáčok, napätí a prúdov od rýchlosti vetra. Porovnaním týchto charakteristík s nameranými dátami bola dokázaná dostatočná presnosť nastavenia modelu. Napriek tomu model obsahuje určité obmedzenia, ktoré sú precízne dokumentované v tejto práci. Ako prvý krok k odstráneniu týchto nedostatkov boli podrobne rozpracované opatrenia, ktoré môžu výraznou mierou zlepšiť funkčnosť dynamických simulácií modelu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

whisper 200, matematický model veternej turbíny v matlabe-simulinku, spolupráca energetických modelov, veterné turbíny, synchronný generátor s permanentnými magnetmi

ABSTRACT

A major portion of this thesis is devoted to the Whisper 200 wind turbine model in Matlab-Simulink environment. The turbine is installed at the Department of Electrical Power Engineering, FEEC BUT. In the model, several types of simulations can be executed. On that basis, the power curve and mathematical relationships between wind speed and other physical quantities, such as RPM, electric current, and voltage, were obtained. Comparisons of the simulations' results with measurement data illustrate adequate agreement, but limitations of the model remain significant, as is exhaustively documented and commented upon in the thesis. As a partial advancement towards elimination of the model's deficiencies, conditions for substantial performance improvements of the dynamic simulation have been elaborately derived.

KEYWORDS

whisper 200, wind turbine model in matlab-simulink, renewable energy systems cooperation, wind turbines, permanent magnet synchronous generator

ŠTEVČEK, Tomáš *Model větrné elektrárny pro výzkumné a laboratorní využití*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2015. 80 s. Vedúci práce bol doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovou prácu na tému „Model větrné elektrárny pro výzkumné a laboratorní využití“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve a o právach súvisiacich s právom autorským, a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. dielu 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Mastnému, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy na realizáciu práce a Ing. Janovi Morávkovi za odborné konzultácie a pomoc pri meraní. Ďalej by som rád poďakoval Bc. Jakubovi Kompišovi za pomoc pri zostavovaní triediacich algoritmov dát, Bc. Róbertovi Končekovi za cenné rady pri sádzaní práce a mojej rodine za podporu pri štúdiu.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Zoznam obrázkov	viii
Zoznam tabuliek	x
Zoznam veličín	xi
Zoznam skratiek	xiv
Úvod	1
1 Veterné turbíny	3
1.1 Rozdelenie veterných turbín	3
1.1.1 Veterné turbíny s vertikálnou osou	3
1.1.2 Veterné turbíny s horizontálnou osou	5
1.2 Teória veterných turbín	6
1.2.1 Betzova teória hybnosti	6
1.2.2 Vznik vztlaku na liste rotora	11
1.3 Regulácia vrtulových turbín	13
2 Matematický model turbíny	14
2.1 Turbína Whisper 200	14
2.2 Návrh a popis jednotlivých blokov	15
2.2.1 Blok modelu vetra	16
2.2.2 Blok modelu rotora turbíny	19
2.2.3 Blok modelu hriadeľa	21
2.2.4 Blok modelu synchronného generátora s PM	23
2.3 Merania na turbíne	27
2.3.1 Meranie výkonovej charakteristiky	27
2.3.2 Meranie napätovej konštanty	31
2.3.3 Meranie so skratovaným statorom	32
3 Experimenty	34
3.1 Model so statickou krivkou $C_P(\lambda)$	34
3.1.1 Charakteristiky v ustálených stavoch	34
3.1.2 Charakteristiky pri zmene rýchlosti vetra	36
3.1.3 Charakteristiky pri step-up rýchlosti vetra	37
3.2 Charakteristiky modelu s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$	38
3.3 Priebehy napätí a prúdov	41

4	Návrhy na rozšírenie modelu	43
4.1	Návrh postupu pre experimentálne určenie momentu zotrvačnosti . . .	43
4.2	Meranie krivky výkonového koeficientu	46
4.3	Spresnenie meraní	47
4.4	Spolupráca modelu v hybridnom systéme	48
	Záver	49
	Literatúra	50
	Zoznam príloh	52
A	Implementácia knižnice WTB_v3	53
B	Návod na obsluhu modelu	54
C	Masky jednotlivých blokov	55
C.1	Maska filtra	55
C.2	Maska bloku vetra	55
C.3	Maska bloku rotora turbíny	56
C.4	Maska bloku hriadeľa	57
C.5	Maska bloku PMSG so záťažou	58
C.6	Maska bloku PMSG	59
D	Užívateľské prostredie modelu	60
E	Programy a zdrojové kódy	61
E.1	Program na výpočet napätovej konštanty	61
F	Použité prístroje a software	64
F.1	Bloková schéma merania elektrických veličín	64
G	Obsah priloženého CD	65
H	Fotodokumentácia agregátu	66

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Darrieusova turbína	3
1.2	Savoniusova turbína	4
1.3	Turbína H-rotor	4
1.4	Turbíny s horizontálnou osou otáčania	5
1.5	Tok prúdu vzduchu turbínou	7
1.6	Prúdenie vzduchu cez idealizovaný rotor	9
1.7	Reálne hodnoty výkonového koeficientu vrtulových turbín	10
1.8	Rozloženie prúdnic na liste	11
1.9	Závislosť vztlačového koeficientu na nábežnom uhle	12
1.10	Aerodynamická strata vztlaku na turbíne	13
2.1	Turbína Whisper 200	14
2.2	Výkonová charakteristika turbíny Whisper 200	14
2.3	Bloková zostava modelu agregátu	15
2.4	Bloková schéma modelu vetra	16
2.5	Bloková schéma filtra strednej hodnoty	17
2.6	Charakteristiky modelu filtra a vetra	18
2.7	Bloková schéma modelu rotora turbíny	19
2.8	Úprava blokovej schémy motoru rotora	20
2.9	Schéma obmedzovača vstupnej rýchlosti vetra	20
2.10	Dvojhmotný dynamický systém	21
2.11	Matematický model hriadeľa	22
2.12	Pripojenie turbíny s PMSG do siete	23
2.13	Fázorový diagram synchronného generátora	24
2.14	Fázorový diagram pripojenia do siete	24
2.15	Bloková schéma modelu PMSG so záťažou	26
2.16	Závislosť ustáleného výkonu od rýchlosti vetra	28
2.17	Závislosť rýchlobežnosti od rýchlosti vetra	29
2.18	Závislosť výkonového koeficientu na rýchlobežnosti	30
2.19	Odpor záťaže počas merania charakteristík	30
2.20	Závislosť napätia od uhlovej rýchlosti rotora	31
2.21	Schéma a fázorový diagram pri skratovanom statore	32
2.22	Charakteristika generátora v stave nakrátko	33
3.1	Závislosť ustáleného výkonu od rýchlosti vetra	34
3.2	Závislosť ustálených uhlových rýchlostí rotora od rýchlosti vetra	35
3.3	Závislosť efektívnej hodnoty fázového napätia od uhlovej rýchlosti rotora	35
3.4	Závislosť efektívnej hodnoty fázových prúdov od uhlovej rýchlosti rotora	35

3.5	Charakteristiky modelu turbíny pri premenlivej rýchlosti vetra	36
3.6	Charakteristiky modelu turbíny pri step-up rýchlosti vetra	37
3.7	Charakteristika rozbehu modelu s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$ pri konštantnej rýchlosti vetra $v_w = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	38
3.8	Namodelovaná charakteristika výkonovej krivky	39
3.9	Charakteristika závislosti $P_m(\omega_r)$ pri konštantnej rýchlosti vetra . . .	40
3.10	Priebehy napätí a prúdov z modelu PMSG	41
3.11	Zmerané priebehy združených napätí a fázových prúdov	42
4.1	Časová os zápisu dát	47
4.2	Smer fixácie turbíny	47

ZOZNAM TABULIEK

2-1	Parametre turbíny Whisper 200	15
2-2	Vstupné parametre modelu filtra a vetra	17
2-3	Vstupné parametre modelu PMSG	25
2-4	Namerané dáta z turbíny	27
2-5	Vypočítané hodnoty λ a C_P	28
4-1	Výstupné parametre	48

ZOZNAM VELIČÍN

Značka	Veličina	Značka jednotky
A	plocha prúdu vzduchu	m^2
A_1	plocha prúdu vzduchu pred turbínou	m^2
A_2	plocha prúdu vzduchu za turbínou	m^2
A_r	plocha rotora	m^2
C_L	vztlakový koeficient	1
C_P	výkonový koeficient	1
C_q	koeficient momentu rotora turbíny	1
D_k	koeficient viskózneho tlmenia	$N \cdot s \cdot m^{-1}$
D_t	priemer rotora turbíny	m
E	energia	J
E_g	fázová hodnota vnútorného napätia generátora	V
F_w	sila vetra	N
F_L	vztlaková sila	N
F_R	odporová sila	N
I	elektrický prúd	A
I_{DC}	prúd na výstupe z usmerňovača	A
I_{INV}	prúd tečúci z meniča do siete	A
I_g	prúd generátora	A
I_{sc}	efektívna hodnota ustáleného skratového prúdu	A
J_a	moment zotrvačnosti agregátu	$kg \cdot m^2$
J_g	moment zotrvačnosti generátora	$kg \cdot m^2$
J_m	moment zotrvačnosti turbíny	$kg \cdot m^2$
I_t	intenzita turbulencií	1
K_{pm}	napäťová konštanta	$V \cdot s \cdot rad^{-1}$
L_s	indukčnosť statorového vinutia	H
P_0	výkon neporušeného prúdu vzduchu	W
P_e	činný výkon za usmerňovačom	W
P_g	činný výkon generátora	W
P_m	mechanický výkon rotora turbíny	W
P_{max}	maximálny mechanický výkon turbíny	W
P_n	nominálny výkon turbíny	W
P_r	výkon rotora turbíny	W
R_s	odpor statorového vinutia generátora	Ω
R_t	polomer rotora	m

R_z	odpor záťaže	Ω
S	čelná plocha listu	m^2
S_T	perióda prúdu po skrate	s
S_{avg}	perióda filtrovacieho intervalu	s
S_m	perióda zaznamenávania elektrických veličín	s
S_u	perióda napätí	s
S_{vz}	perióda vzorkovania	s
S_w	perióda zaznamenávania rýchlosti vetra	s
T_g	moment generátora	$N \cdot m$
T_m	mechanický moment rotora turbíny	$N \cdot m$
T_{max}	maximálny moment generátora	$N \cdot m$
T_{tr}	moment mechanického trenia	$N \cdot m$
Q_g	jalový výkon generátora	VAr
Q_m	hmotnotný tok	$kg \cdot s^{-1}$
U	napätie	V
U_{DC}	napätie na výstupe z usmerňovača	V
U_{INV}	napätie na výstupe z meniča	V
U_{OUT}	napätie na výstupe z generátora	V
U_S	napätie siete	V
U_g	napätie na svorkách generátora	V
X_d	reaktancia generátora v smere osi d	Ω
Z_1	impedancia vedenia	Ω
a	pomer rýchlostí	1
c	dĺžka listu v profile	m
f	frekvencia	Hz
l	dĺžka listu rotora	m
l_w	rozbehová dráha vetra	m
m	hmotnosť	kg
n	mechanické otáčky turbíny	s^{-1}
n_p	počet pólov generátora	1
p	tlak vzduchu	Pa
p_0	atmosferický tlak vzduchu	Pa
t	čas	s
v_{avg}	priemerná rýchlosť vetra	$m \cdot s^{-1}$
v_{init}	počiatočná rýchlosť vetra	$m \cdot s^{-1}$
v_n	nominálna rýchlosť vetra	$m \cdot s^{-1}$
v_r	rýchlosť prúdu vzduchu pri prechode turbínou	$m \cdot s^{-1}$

v_{res}	výsledná rýchlosť prúdenia	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{rot}	obvodová rýchlosť	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{s}	rozbehová rýchlosť vetra	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{w}	rýchlosť neporušeného prúdu vzduchu	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_1	rýchlosť neporušeného prúdu vzduchu	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_2	rýchlosť prúdu vzduchu za turbínou	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
x	dĺžka telesa vzdušnej hmoty	m
Δp	rozdiel tlakov vzduchu	Pa
α	nábežný uhol	$^\circ$
γ	uhol smeru vetra	$^\circ$
δ	vnútorný uhol generátora	$^\circ$
η_e	celková účinnosť elektrických zariadení	1
η_g	účinnosť generátora	1
η_{rct}	účinnosť usmerňovača	1
ϑ	uhol natočenia listu	$^\circ$
λ	rýchlobežnosť	1
ρ	hustota vzduchu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
φ	účinník	1
ω_g	uhlová frekvencia generátora	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_r	uhlová rýchlosť rotora turbíny	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_{start}	štartovacia uhlová rýchlosť rotora turbíny	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Značenie elektrických veličín

Modul elektrickej veličiny je značený kurzívou, jeho fázor tučným stojatým písmom. Napríklad modul napätia striedača je U_{INV} , jeho fázor je \mathbf{U}_{INV} .

Značenie ostatných fyzikálnych veličín

Skalár fyzikálnej veličiny je značený kurzívou, jej vektor je značený tučným stojatým písmom. Teda veľkosť sily je F , jej vektor je \mathbf{F} .

Značenie konštánt

Konštanty sú značené stojatým písmom, napríklad napäťová konštanta K_{pm} .

ZOZNAM SKRATIEK

MKP	Metóda konečných prvkov
MPPT	Regulátor maximálneho výkonu
PLC	Programovateľný logický regulátor
PM	Permanentný magnet
PMSG	Synchronný generátor s permanentnými magnetmi
TSR	Tip speed ratio - rýchlobežnosť
WTB	Wind Turbine Blockset

ÚVOD

Od čias, kedy na jednej planéte v nejakom odľahlom kúte kozmu trblietavo rozstrekutého do nespočítateľného množstva slnečných systémov vynašli múdre zvieratá poznanie datujeme snahu ľudstva o zvýšenie životného štandardu. Nutnosť zjednodušenia k životu nevyhnutných aktivít viedla k tvorbe výrobných prostriedkov, ktoré si nevyžadujú náročnú manuálnu obsluhu, či ju úplne nahrádzajú.

S rastúcou populáciou nastáva dopyt po zefektívnení poľnohospodárskej a potravinárskej techniky, a človek, tak ako aj dnes, premýšľal ako využiť energiu vetra na pohon vtedajších strojov.

Približne v roku 200 p.n.l. bol vynájdený veterný mlyn s vertikálnou osou na mletie pšenice, za jeho vynálezcov považujeme starých Peržanov. V Európe sa veterné mlyny začínajú objavovať až v 12. storočí n.l. v dodnes zachovanej technológii s horizontálnou osou otáčania rotora. Najznámejšie a dodnes funkčné veterné mlyny sa nachádzajú v Holandsku. Rad za sebou usporiadaných mlynov prečerpávajúcich vodu z vysušovaných oblastí, označovaný ako tzv. *molengang*, je dnes veľmi vyhľadávanou technickou pamiatkou.

Neskôr, približne v polovici 19. storočia sa v Amerike na čerpanie vody začalo využívať tzv. *Americké koleso*.

S príchodom elektrických generátorov sa začínajú používať prvé turbíny na výrobu elektrickej energie malých výkonov v Dánsku a následne v Spojených štátoch. Turbíny väčších výkonov (od 100 kW) boli inštalované neskôr napríklad vo vtedajšom Sovietskom zväze (r. 1931) a USA (r. 1941).

Zjednotenie elektrizačnej sústavy, zavedenie štandardu konštantnej elektrickej frekvencie, nutnosť výstavby veľkých blokov elektrární a na vtedajšie pomery pomerne náročná výroba spojená s nedokonalým riadiacim systémom a malými výkonmi turbín zatlačila veternú energetiku do ústrania.

Po vypuknutí ropnej krízy v roku 1973 a akceptácii faktu globálneho otepľovania nastala otázka jeho riešenia. Od tejto významnej udalosti sa začína datovať rozmach veternej energetiky.

V dnešných dňoch sa opäť objavuje možnosť použitia ostrovných sietí založených na báze hybridného spojenia viacerých zdrojov. Aj keď túto variantu môžeme v našich končinách s prístupným pripojením do elektrizačnej sústavy označiť ako prežitok, využitie môže nájsť práve v rozvojových krajinách s nedostatočnou, alebo nevybudovanou infraštruktúrou. Už v porevolučných rokoch, v prvom kvartáli 20. storočia, bolo totiž zrejmé, že len: „reorganizácia priemyslu modernými technológiami a jeho elektrifikácia bude viesť k zmazaniu rozdielov medzi mestskou a vidieckou krajinou, čo zdvihne vzdelanosť a kultúru na vidieku, a aj v tých najodľahlejších častiach krajiny prekoná zaostalosť, nevedomosť, chudobu, choroby a barbarizmus.“

Cenová politika výrobcov však použitiu týchto zariadení v rozvojových krajinách príliš nepraje. Dopyt po energii však stále stúpa a aj preto sú v nich na vzostupe, tak ako v 20tom storočí v Európe, fosílna palivá. Avšak vzhľadom k otázkam 21. storočia, globálnemu otepľovaniu, rastu populácie, imigrácie, znečistenia zdrojov pitnej vody, spotreby potravín a neobnoviteľných zdrojov musíme hľadať riešenia. Javí sa to ako naša povinnosť pomocou intelektu, ktorý máme odhaľovať čoraz viac a viac a vytváraním nových technológií takto pracovať pre dobro spoločnosti, či ideálne celého ľudstva.

Táto práca má byť prínosom k skúmaniu vlastností agregátu malej veternej turbíny s typovým označením WHISPER 200. Má nadväzovať na v súčasnosti pripravovaný blok spolupráce energetických modelov. Z dôvodu vyhotovenia týchto modelov v prostredí programového vybavenia MATLAB-SIMULINK rámci konzultácií s vedúcim diplomovej práce vznikla požiadavka použiť tento program na realizáciu modelu veternej turbíny. Výsledným produktom tejto práce je teda matematický model, ktorý by mal byť v budúcnosti použitý na výskumné a laboratórne účely.

Práca je rozdelená na štyri kapitoly, z ktorých je prvá kapitola venovaná teórii veterných turbín vrátane matematicko-fyzikálneho popisu funkcie rotora.

Druhá kapitola je venovaná samotnému matematickému modelu a teda špecifikácii modelovanej turbíny, návrhom jednotlivých blokov modelu a meraniam na turbíne, podľa ktorých bol matematický model optimalizovaný.

Tretia kapitola popisuje vykonané experimenty na modeli a ich porovnanie s name-
ranými charakteristikami.

V štvrtej kapitole sú diskutované návrhy na rozšírenie modelu, spresnenie meraní a návrh spolupráce s pripravovanými matematickými modelmi.

1 VETERNÉ TURBÍNY

1.1 Rozdelenie veterných turbín

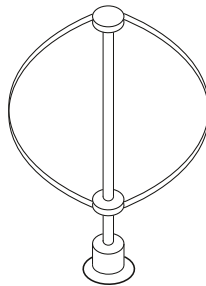
Veterná turbína je stroj, ktorý premieňa kinetickú energiu vetra na mechanickú energiu dostupnú na jej hriadeli. Na hriadeľ pripojený generátor, obvykle cez prevodovku, produkuje elektrickú energiu. V tejto kapitole je uvedený stručný popis dnes využívaných typov veterných motorov.

1.1.1 Veterné turbíny s vertikálnou osou

Darrieusova turbína

Darrieusova turbína pracuje na princípe vztlakovej sily. Turbína má dva, alebo tri listy, ktoré sú za účelom zníženia ohybového namáhania zaoblené do elipsovitého tvaru (Obr. 1.1), avšak sú zaťažené pomerne veľkou odstredivou silou.

Medzi výhody Darrieusovej turbíny patrí bezpochyby schopnosť pracovať vo vysokých otáčkach a výkonový súčiniteľ dosahuje hodnôt podobných ako u turbín s horizontálnou osou, $C_P < 0,55$. Strojovňa je umiestnená na zemi, čím odpadajú náklady na pomerne drahú gondolu. Nevýhodou však je, že Darrieusova turbína nie je schopná samostatného rozbehu a preto potrebuje rozbehový motor [1],[2].



Obr. 1.1: Darrieusova turbína [3]

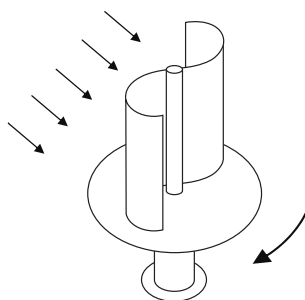
Savoniusova turbína

Savoniusova veterná turbína patrí medzi turbíny s vertikálnou osou otáčania. Skladá sa z dvoch lopatiek v tvare kruhových alebo eliptických polovic usporiadaných do tvaru písmena „S“, zobr. na Obr. 1.2.

Konvexná strana jednej polovice a konkávna strana druhej tvoria odporovú prekážku prúdiacemu vzduchu. Vďaka vyššiemu odporovému koeficientu vytvára konkávna časť väčšiu prekážku smeru prúdenia vzduchu, ako konvexná, a tým vytvára unášavú silu, ktorá otáča rotor.

Riešenie s jedným Savoniovým rotorom má nevýhody v pomerne kolísavom priebehu mechanického momentu na hriadeli. Preto bývajú obvykle na hriadeli rotora umiestnené dve turbíny navzájom pootočené o 90° .

Vzhľadom k tomu, že sa jedná o odporový¹ veterný motor, dosahuje pomerne malý výkonový koeficient, $C_P < 0,35$; [4],[5].

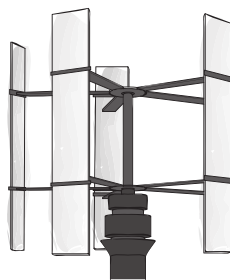


Obr. 1.2: Savoniusova turbína [5]

Turbína H-rotor

Turbína s vertikálnym rotorom pripomínajúcim písmeno H pracuje na podobnom princípe ako Darrieusova turbína. Rotor turbíny pozostáva z rovných listov v tvare krídla pripevnených na hriadeľ. Ten sa pri vhodnej rýchlosti vetra pôsobením vzlaku roztočí. Zdokonalená verzia tejto turbíny, ktorú skonštruoval prof. MUSSGROVE, má možnosť sklápania listov, ktorými je možné turbínu regulovať.

Dosahuje výkonový koeficient až $C_P < 0,50$. Kvôli vysokým výrobným nákladom sa však často nepoužíva [2],[4].



Obr. 1.3: Turbína H-rotor [6]

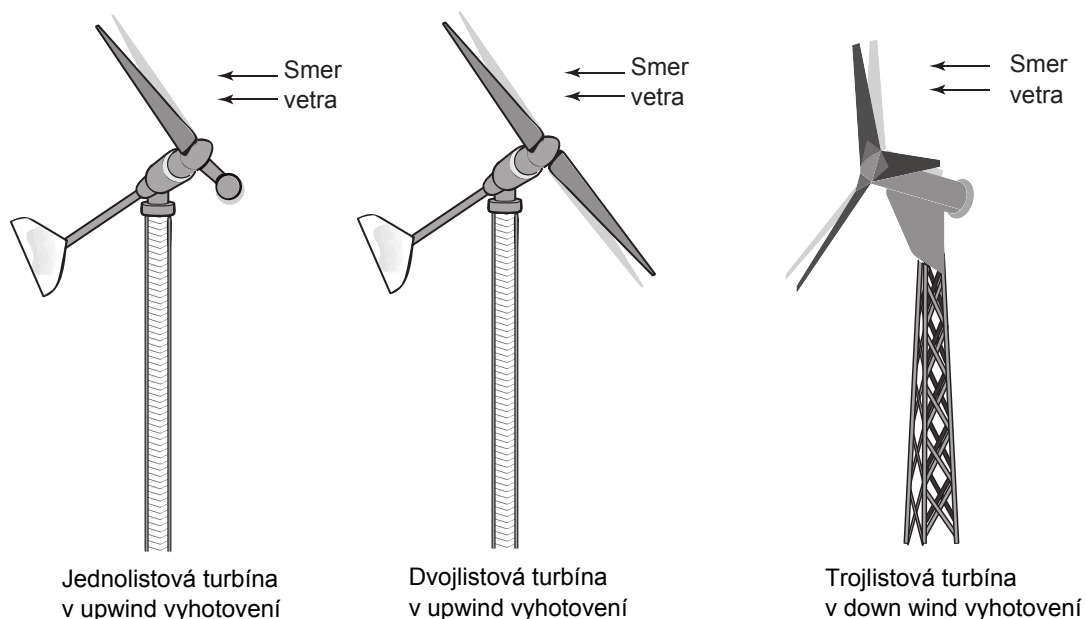
¹ Čiastočne prispieva aj vzlaková zložka sily, avšak odporová pôsobí majoritne [5].

1.1.2 Veterné turbíny s horizontálnou osou

Veterné turbíny s horizontálnou osou otáčania sú v súčasnosti najviac využívané, preto sa nimi budeme podrobnejšie zaoberať. Vrtuľové turbíny fungujú na princípe vztlaku. Najznámejšie konštrukčné riešenie je dvoj a trojlistové (Obr. 1.4). Menej používané, napriek nižším prvotným investičným nákladom, je jednolistové vyhotovenie s protizávažím najmä kvôli problematickému vyvažovaniu protizávažia a taktiež kvôli pomerne rušivému vzhľadu.

Medzi ich hlavné prednosti patrí relatívne vysoká hodnota výkonového koeficientu, $C_P < 0,59$, a pomerne jednoduchá montáž. Turbíny veľkých výkonov majú strojovňu umiestnenú v gondole. Táto zvyšuje počiatočné náklady na výstavbu a je hlavnou nevýhodou turbín tohto typu.

Veterné turbíny s horizontálnou osou otáčania sa vyznačujú dobrou možnosťou regulácie, ktorá sa vykonáva pomocou natáčania listov okolo ich pozdĺžnej osi. Tým je taktiež možné turbínu chrániť proti pretočeniu pri veľmi veľkých rýchlostiach vetra [2],[4]. Viac o regulácii je v časti 1.3.



Obr. 1.4: Turbíny s horizontálnou osou otáčania [6]

Podľa vyhotovenia rozdeľujeme turbíny na postavené proti vetru, tzv. „upwind“ a po vetre, tzv. „down wind“. Turbíny postavené priamo proti vetru nemajú problémy s tienením od veže, avšak potrebujú aktívny natácaací mechanizmus pre gondolu. Down wind prevedenie obvykle využíva pasívne natáčanie, avšak stožiar turbíny vytvára závetrie, ktoré má za následok nerovnomerné mechanické namáhanie počas prechodu listov poza stožiar [4].

1.2 Teória veterných turbín

Táto kapitola sa venuje fyzikálnemu popisu vrtulových turbín. Pre ne vo všeobecnosti platí, že čím väčší počet listov turbína má, tým väčší mechanický moment dokáže pri svojom štarte vyvinúť. Táto vlastnosť horizontálnej turbíny bola vo forme Amerického kola využívaná na pohon čerpadiel. Dve turbíny s rovnakým priemerom rotora D_t a ľubovoľným počtom listov by mali teoreticky dosahovať rovnaký výkon. Kvôli vzniku aerodynamických strát prechodom vzduchu cez rotor však dosahujú vyšší výkon turbíny s menším počtom listov [4].

1.2.1 Betzova teória hybnosti²

Kinetickú energiu vzdušnej hmoty o hmotnosti m pohybujúcu sa rýchlosťou v môžeme vyjadriť ako:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho A x v^2, \quad (1.1)$$

kde ρ je hustota prúdiacej hmoty vzduchu a x je dĺžka telesa vzdušnej hmoty.

Energia hmotnostného toku prechádzajúcho plochou A určuje **výkon neporušeného prúdu vzduchu**. Po derivácii rov. (1.1) dostaneme:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho A \frac{dx}{dt} v^2 = \frac{1}{2}\rho A v^3. \quad (1.2)$$

Premenou kinetickej energie prúdu vzduchu, v rotore turbíny, na mechanickú energiu dostupnú na hriadeli turbíny dochádza k spomaleniu rýchlosti prúdenia z **rýchlosti neporušeného prúdu vzduchu pred turbínou** v_1 na **rýchlosť prúdu vzduchu za turbínou** v_2 . Pri prechode hmoty vzduchu turbínou pre **hmotnostný tok** podľa rovnice kontinuity platí

$$Q_{m1} = Q_{mr} = Q_{m2}, \quad (1.3)$$

po vyjadrení hmotnostných tokov:

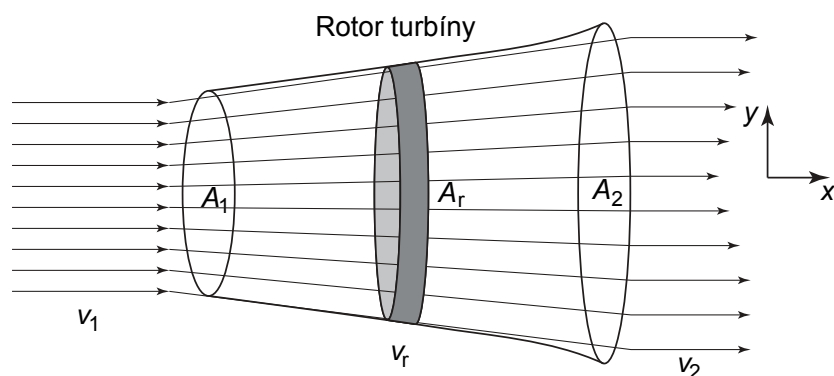
$$\rho A_1 v_1 = \rho A_r v_r = \rho A_2 v_2, \quad (1.4)$$

z čoho vyplýva, že pri spomalení rýchlosti prúdenia vzduchu sa zväčší **prierez plochy prúdu vzduchu za turbínou** A_2 , ako je zrejmé aj z Obr. 1.5.

Mechanická energia, ktorú je možné získať premenou kinetickej energie toku vzduchu zodpovedá rozdielu výkonov prúdu vzduchu pred a za turbínou,

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2}\rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3), \quad (1.5)$$

² Podľa [2],[7],[8].



Obr. 1.5: Tok prúdu vzduchu turbínou [7]

po vyjadrení A_2 z rov. (1.4) a dosadení do rovnice (1.5) dostaneme:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2), \quad (1.6)$$

pri uvažovaní konštantného hmotnostného toku $Q_m = \rho v_1 A_1$ môžeme potom predchádzajúcu rovnicu zjednodušiť:

$$P = \frac{1}{2} Q_m (v_1^2 - v_2^2). \quad (1.7)$$

Zo zápisu tejto rovnice je vyplýva, že pri rešpektovaní rovnice kontinuity je možné **maximálny mechanický výkon** dosiahnuť len pri určitom pomere rýchlostí v_2/v_1 . Zistenie tohto pomeru si vyžaduje nasledovný postup.

Rešpektovaním zákona zachovania hybnosti platí pre silu, ktorou pôsobí prúdiaci vzduch na rotor turbíny:

$$F_w = Q_m (v_1 - v_2). \quad (1.8)$$

Podľa zákona akcie a reakcie pôsobí súčasne s touto silou (ťahom) aj sila rovnakej veľkosti a opačného smeru, ktorou pôsobí rotor na prúd vzduchu. Ťah rotora tlačí vzdušnú hmotu **rýchlosťou toku vzduchu rotorom** v_r , v rovine toku vzduchu **plochou rotora** A_r vymedzenou jeho **polomerom** R_t . Pre toto je potrebný mechanický výkon,

$$P = F_w v_r = Q_m (v_1 - v_2) v_r. \quad (1.9)$$

Mechanický výkon rotora môžeme teda vyjadriť z rozdielov výkonov prúdu vzduchu pred a za rotorom podľa vzťahu (1.6), alebo pomocou ťahovej sily rotora a prietokovej rýchlosti rotorom, rov. (1.9). Z rovnosti týchto dvoch vyjadrení mechanického výkonu získame nasledovný vzťah:

$$\frac{1}{2} Q_m (v_1^2 - v_2^2) = Q_m (v_1 - v_2) v_r. \quad (1.10)$$

Z ktorého po matematických úpravách vyplýva, že rýchlosť toku vzduchu rotorom v_r je rovná aritmetickému priemeru rýchlostí pred a za turbínou,

$$v_r = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (1.11)$$

Pre hmotnostný tok potom s prihliadnutím k predchádzajúcej rovnici môžeme písať:

$$Q_m = \rho A_r v_r = \frac{1}{2} \rho A_r (v_1 + v_2). \quad (1.12)$$

Mechanický výkon rotora turbíny môžeme následne dosadením tejto rovnice do rov. (1.6) vyjadriť ako:

$$P_r = \frac{1}{4} \rho A_r (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2). \quad (1.13)$$

Za účelom zistenia maximálnej účinnosti premeny kinetickej energie neporušeného prúdu vzduchu na mechanickú energiu turbíny musíme mechanický výkon rotora z rov. (1.13) porovnať v pomere k výkonu neporušeného prúdu vzduchu tečúceho rovnako veľkou plochou, akou je plocha, vymedzená polomerom rotora, A_r . Tento pomer sa nazýva **výkonový koeficient turbíny** C_P , platí:

$$C_P = \frac{P_r}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A_r (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A_r v_1^3}. \quad (1.14)$$

Po matematických úpravách predchádzajúceho vzťahu získame:

$$C_P = \frac{P_r}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right]. \quad (1.15)$$

Následne pre pomer rýchlostí zavedieme substitúciu

$$a = \frac{v_2}{v_1}, \quad (1.16)$$

po dosadení do rov. (1.15) dostaneme:

$$C_P(a) = \frac{1}{2} (1 - a^2) (1 + a). \quad (1.17)$$

Roznásobením zátvoriek v rov. (1.17) a následnou deriváciou dostaneme:

$$\frac{dC_P(a)}{da} = \frac{1}{2} (1 - 2a - 3a^2). \quad (1.18)$$

Potom postavením pravej strany tejto rovnice rovnej nule dostaneme:

$$0 = 1 - 2a - 3a^2. \quad (1.19)$$

Konečne, riešením tejto kvadratickej rovnice získame dva korene, $a_1 = -1$ a $a_2 = \frac{1}{3}$ pričom za smerodajný považujeme koreň $a_2 = \frac{1}{3}$.

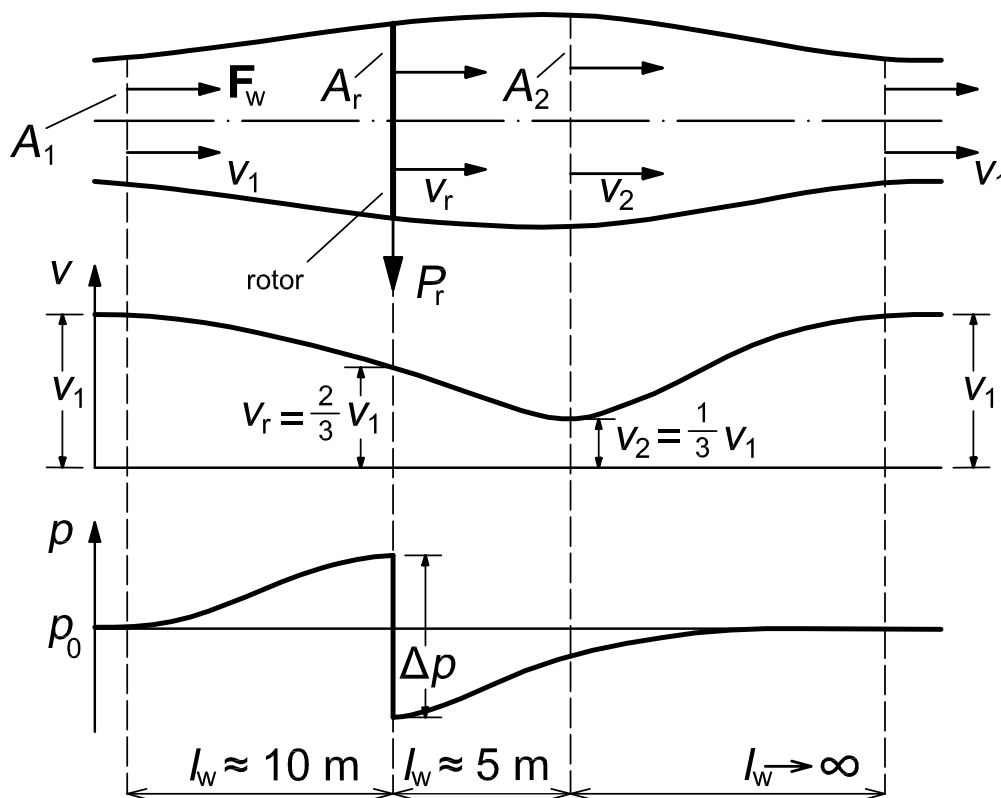
Dosadením tohto koreňa do rov (1.17) získame **maximálnu hodnotu výkonového koeficientu** $C_{P_{\max}} = 0,593$. Táto hodnota, nazývaná aj BETZOV koeficient, vyjadruje najvyššiu možnú účinnosť premeny kinetickej energie prúdu vetra na mechanickú energiu rotora, akú môže veterný motor dosiahnuť.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že rotor turbíny dosiahne najvyšší výkon pri pomere rýchlostí $a = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$. Dosadením tohto pomeru do rovnice (1.11) určíme vzťah pre ideálnu rýchlosť toku cez rotor:

$$v_r = \frac{2}{3}v_1, \quad (1.20)$$

a rýchlosť toku vzduchu za rotorom,

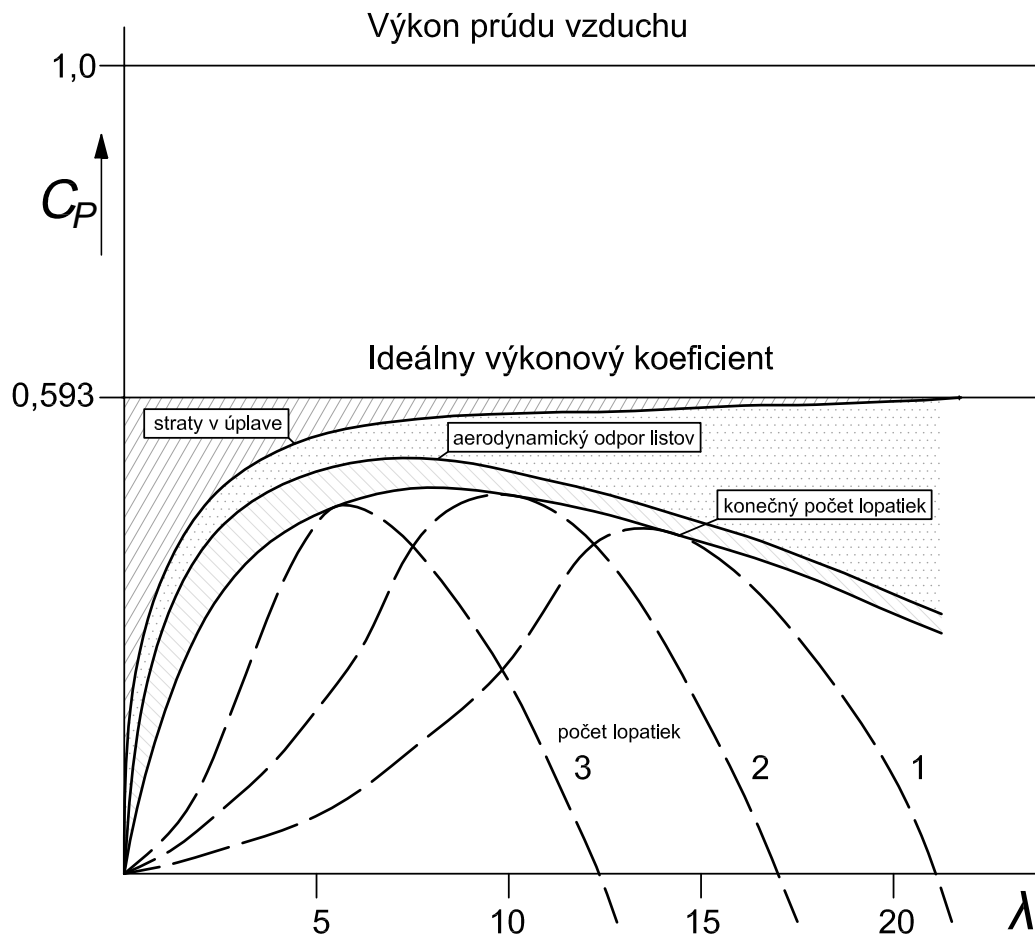
$$v_2 = \frac{1}{3}v_1. \quad (1.21)$$



Obr. 1.6: Prúdenie vzduchu cez idealizovaný rotor [2]

Prúdenie vzduchu cez ideálny rotor v ideálnom bezstratovom prostredí, s uvažovaním maximálnej premeny energie prúdiaceho vzduchu na mechanickú je zobrazené na Obr. 1.6. Je zrejmé, približujúci sa prúd vzduchu k turbíne vyvolá nárast statického tlaku, ktorý následne pri prechode turbínou prudko klesne a zmení sa na tlak

okolía za turbínou. Tento rozdiel tlakov vytvára silu, ktorá poháňa rotor. V reálnom prostredí je však tento priebeh ovplyvnený výkonovými koeficientami turbín, ktoré sa líšia od BETZOVHO koeficientu. Ich funkcie sú obrazené sú na Obr. 1.7.



Obr. 1.7: Reálne hodnoty výkonového koeficientu vrtulových turbín [2]

Pomer obvodovej rýchlosti špičky listu rotora k rýchlosti neporušeného prúdu vzduchu pred turbínou, $v_w = v_1$ sa nazýva **rýchlobežnosť turbíny**,

$$\lambda = \frac{\omega_r R_t}{v_w}. \quad (1.22)$$

Z reálnej hodnoty výkonového koeficientu $C_P(\lambda)$ môžeme vyjadriť koeficient momentu rotora turbíny, pre ktorý platí:

$$C_q(\lambda) = \frac{C_P(\lambda)}{\lambda}. \quad (1.23)$$

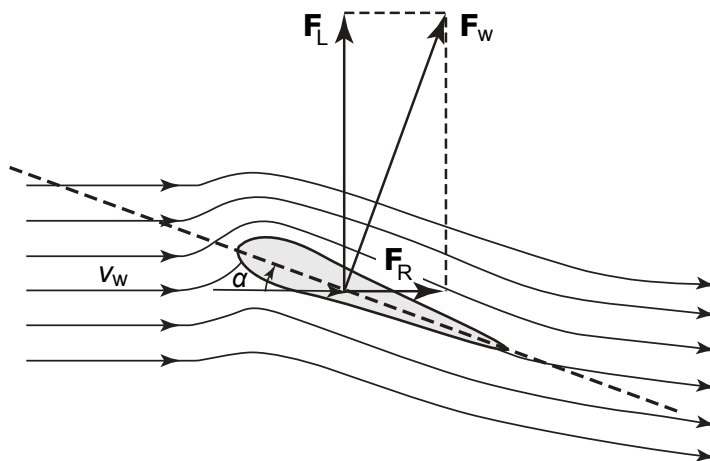
Následne pomocou vzťahov (1.2), (1.14), (1.22) a (1.23) vyjadríme vzťah pre výpočet mechanického momentu rotora turbíny,

$$T_m = \frac{P_r}{\omega_r} = \frac{1}{2} \frac{\rho C_P v_w^3 A_r}{\omega_r} = \frac{1}{2} \rho v_w^2 A_r C_q R_t. \quad (1.24)$$

1.2.2 Vznik vztlaku na liste rotora³

Vzduch prúdiaci okolo nehybného profilu listu rotora⁴ vytvára dve sily, **vztlakovú**, kolmú na smer prúdenia vzduchu a silu **odporovú**, rovnobežnú s prúdením vzduchu. Tá vzniká pôsobením čelného odporu listu proti prúdeniu vzduchu (Obr. 1.8). Odporová sila je považovaná za príčinu vzniku aerodynamických strát a preto je nutné ju vhodným návrhom listov minimalizovať.

Vztlaková sila vzniká pri laminárnom prúdení vzduchu okolo listu rotora. Prúd vzduchu nad listom sa pohybuje rýchlejšie kvôli dlhšej dráhe, ktorú musí prekonať (vrchná časť prierezu lista je dlhšia, ako spodná). Toto zvýšenie prietokovej rýchlosti zapríčiní pokles tlaku nad hornou časťou lopatky. Rozdiel tlakov medzi vrchnou a spodnou časťou lopatky vytvára vztlakovú silu.



Obr. 1.8: Rozloženie prúdnic na liste [7]

V súlade s touto teóriou predpokladáme, že tok vzduchu, ktorý tečie okolo profilu listu rotora je zložený z dvoch zložiek, z pozdĺžneho toku, ktorý obteká list a z toku, ktorý cirkuluje okolo listu. Táto zložka toku vytvára vztlak.

Vztlaková sila vyjadrená na jednotku dĺžky listu je rovná:

$$F_L = \rho v_w^2 \pi c \sin \alpha, \quad (1.25)$$

kde v_w je rýchlosť prúdu vzduchu, c je dĺžka listu v profile, a α je uhol nábehu, viď Obr. 1.8. Vztlaková sila rastie so štvorcom rýchlosti⁵, preto platí:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho S v_w^2 C_L, \quad (1.26)$$

³ Podľa [5],[7],[9].

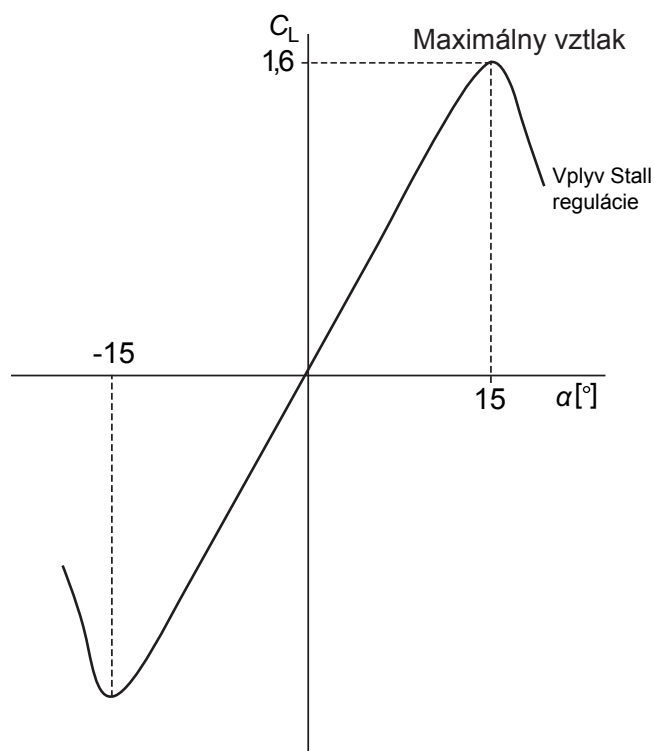
⁴ Uvažujeme zastavenú turbínu.

⁵ Tento poznatok odvodili v 17. storočí HUYGENS a MARIOTTE, [9].

kde S je veľkosť čelnej plochy⁶ telesa a C_L je vztlakový koeficient, ktorý môžeme dosadením rov. (1.25) do predchádzajúcej rovnice a následných úpravách vyjadriť ako:

$$C_L = \frac{\rho v_w^2 \pi c \sin \alpha}{\frac{1}{2} \rho S v_w^2} = 2\pi \sin \alpha. \quad (1.27)$$

Tento vzťah opisuje teoretickú závislosť vztlakového koeficientu C_L na nábežnom uhle α . Pre hodnoty $\alpha \in \langle -15^\circ; 15^\circ \rangle$ je táto závislosť lineárna. Vo všeobecnosti platí, že so zvyšujúcim sa nábežným uhlom listov klesá vztlak a rotor sa spomaľuje⁷.



Obr. 1.9: Závislosť vztlakového koeficientu na nábežnom uhle [7]

⁶ $S = l \cdot c$ pri uvažovaní rovnakej dĺžky c na začiatku a konci listu turbíny.

⁷ Toto je princípom Pitch a Stall regulácie, viď podkapitolu 1.3.

1.3 Regulácia vrtuľových turbín

Pitch regulácia

Táto možnosť regulácie, ako je z jej názvu zrejmé, využíva možnosť natáčania listov turbíny. Keď prúdi vietor s vyššou rýchlosťou, ako je konštrukčná rýchlosť turbíny, natáčací mechanizmus zmení uhol natočenia listu oproti smeru prúdenia. V dôsledku toho sa taktiež zmení uhol nábehu prúdu vzduchu na list a poklesne vztlak.

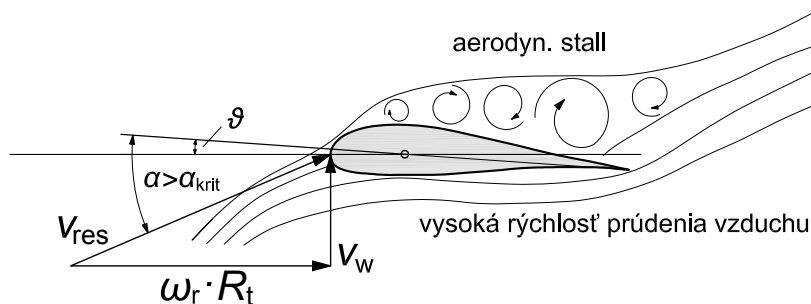
Pokles vztlakovej sily má za následok pokles momentu na hriadeli turbíny. Takto regulovanou turbínou je možné dodávať konštantný výkon aj pri vyššej rýchlosti prúdenia vzduchu [8].

Stall regulácia⁸

Turbíny využívajúce Stall reguláciu majú listy rotora pevne pripojené na hriadeli bez použitia natáčacieho mechanizmu. To znamená, že nemajú možnosť meniť uhol natočenia listov proti prúdu vzduchu, ktorý je pevne stanovený.

Listy rotora sú navrhnuté tak, aby pri vyšších rýchlostiach, ako je návrhová rýchlosť turbíny spôsobovali väčší čelný odpor prúdiacemu vzduchu. Ohyb listov rotora pri vyšších rýchlostiach prúdenia zvýši nábehový uhol prúdu vzduchu na list, čo má za následok zníženie vztlakovej a zvýšenie odporovej sily, čo vedie k spomaleniu rotora. Pri veľmi vysokej rýchlosti prúdenia vzduchu a kritickom nábehovom uhle, obvykle $\alpha > 16^\circ$, sa od lopatky odtrhne prúd vzduchu, ktorý následne prispieva k vzniku turbulentného prúdenia v úplave turbíny a zníženiu cirkulácie vzduchu okolo profilu lista, ktorá je nevyhnutná na udržaniu vztlaku⁹.

Nevýhodou turbín vyšších výkonov využívajúcich Stall reguláciu je vyššia hmotnosť listov a nemožnosť samostatného rozbehu. Preto sa väčšinou používa rozbehový motor, alebo v prípade asynchrónneho generátora jeho motorický chod [5],[8].



Obr. 1.10: Aerodynamická strata vztlaku na turbíne [2]

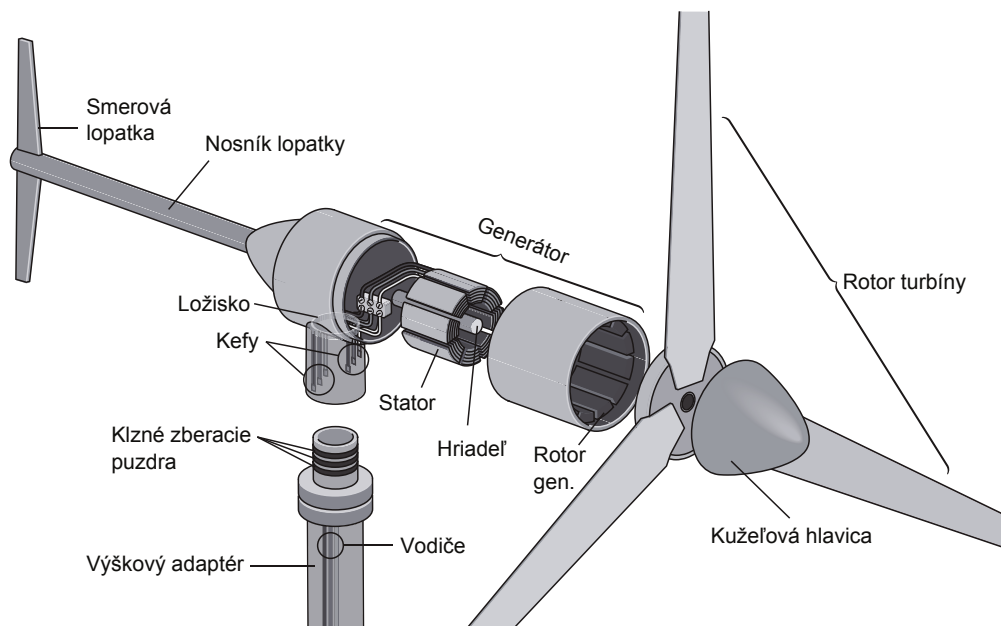
⁸ Uvažujeme pri točiacom sa rotore.

⁹ Pozri podkapitolu 1.2.2.

2 MATEMATICKÝ MODEL TURBÍNY

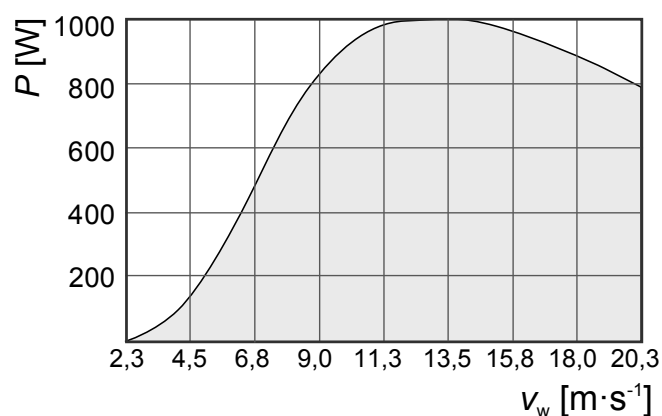
2.1 Turbína Whisper 200

Modelovaná turbína s typovým označením WHISPER 200 od výrobcu SOUTHWEST WINDPOWER, INC. je trojlistová vrtulová turbína s horizontálnou osou otáčania. Na hriadeľi je umiestnený rotor synchronného generátora s permanentnými magnetmi.



Obr. 2.1: Turbína Whisper 200 [6]

Výkonová charakteristika turbíny, prevzatá z datasheetu turbíny, je zobrazená na Obr. 2.2. Parametre turbíny a generátora sú uvedené v Tab. 2-1.



Obr. 2.2: Výkonová charakteristika turbíny Whisper 200 [11]

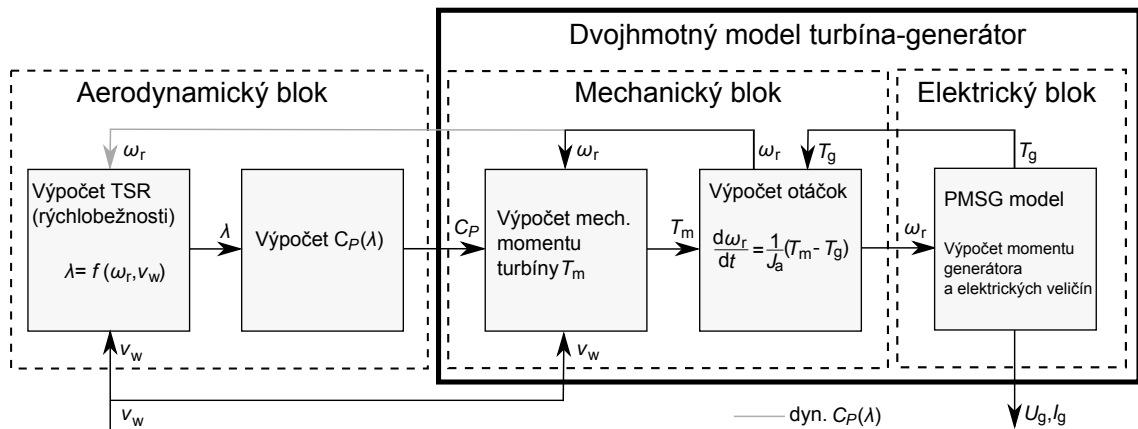
Tab. 2-1: Parametre turbíny Whisper 200 [11]

Nominálna rýchlosť vetra	$v_n = 11,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rozbehová rýchlosť vetra	$v_s = 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Minimálna rýchlosť vetra pre prevádzku	$v_{\min} = 2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Maximálna rýchlosť vetra pre prevádzku	$v_{\max} = 20,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Výkon turbíny pri v_n	$P = 1000 \text{ W}$
Priemer rotora turbíny	$D_t = 2,7 \text{ m}$
Počet pólov SG	$n_p = 10$
Výstupné napätie	$U_{\text{OUT}} = 24/36/48 \text{ V}$

2.2 Návrh a popis jednotlivých blokov

Model agregátu je vytvorený v prostredí programu MATLAB-SIMULINK. Pre zostavenie matematického modelu je potrebné vytvoriť vzájomne spolupracujúce a ovplyvňujúce sa bloky.

Návrh a zloženie týchto blokov, z ktorých je model turbíny zložený, je podrobne popísané v nasledujúcich podkapitolách. Tie na seba nadväzujú v smere premeny energie vetra. Konceptné riešenie modelu je zobrazené na blokovej schéme na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Blokova zostava modelu agregátu

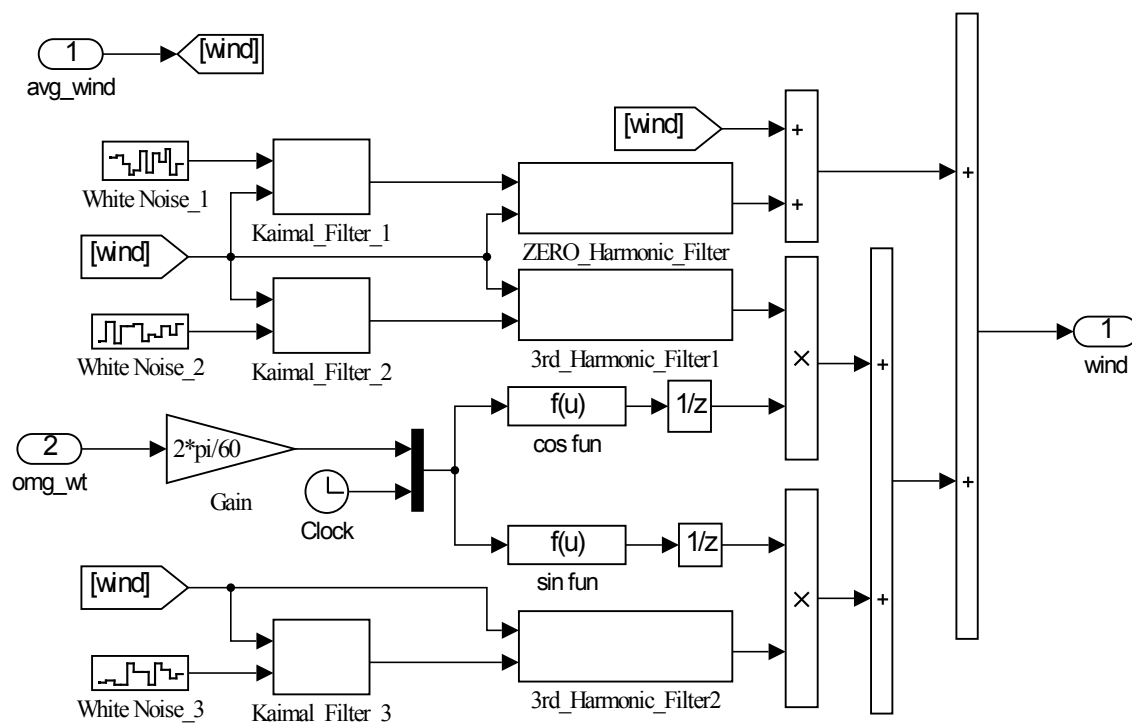
Vstupom do modelu je rýchlosť vetra v_w . Jeho kinetická energia sa následne premieňa v rotore turbíny na mechanickú. Generátor priamo spojený s hriadelom turbíny zabezpečuje jej premenu na energiu elektrickú. Napätia a prúdy dostupné z jeho svoriek sú výstupnými produktmi z modelu agregátu.

2.2.1 Blok modelu vetra

Na simuláciu správania vetra bude použitý model¹⁰, ktorý bol vyvinutý výskumným ústavom RISØ DENMARK, [17].

Tento model zohľadňuje dve hlavné vlastnosti správania sa vetra a to jeho stochastický charakter, zapríčinený turbulentným prúdením, a jeho deterministické správanie sa podmienené najmä vznikom tzv. **shadow efektu** v okolí veternej turbíny. Ten zapríčiňuje kolísanie výkonov pri prechode listov popred pilier turbíny. Frekvencia kolísania výkonov trojlístej turbíny je teda tri krát vyššia ako frekvencia otáčania rotora.

Model je založený na Kaimalovom spektre, ktoré uvažuje tri priestorové zložky vetra, pozdĺžnu v osi x , priečnu (y) a zvislú (z). Tieto zložky sú tvorené generátorom bieleho šumu, ktorý vytvára stochastickú charakteristiku vetra, kaimalovým filtrom a harmonickým filtrom, ako je zrejmé z Obr. 2.4. Vplyv shadow efektu je simulovaný zavedením uhlovej rýchlosti rotora do modelu. Tú je nutné pred vstupom do modelu prepočítať na otáčky v $[\text{min}^{-1}]$, pretože model, ako je zrejmé z Obr. 2.4, prepočítava otáčky opäť na uhlovú rýchlosť rotora pomocou bloku Gain. Maska modelu je zobrazená v prílohe C.2.

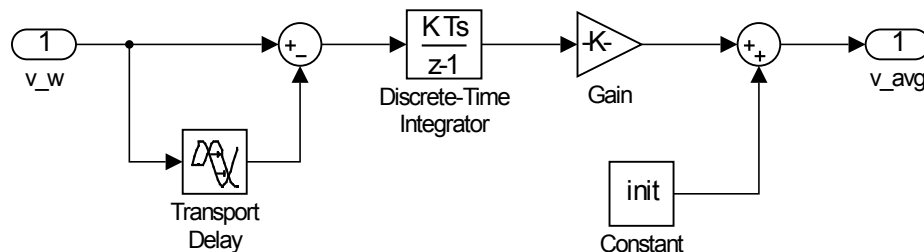


Obr. 2.4: Bloková schéma modelu vetra [17]

¹⁰ Pre správnu funkciu tohto modelu je nutné implementovať knižnicu WTB_v3 podľa návodu uvedeného v prílohe A.

Jednou z funkcií modelu veternej turbíny je simulácia jej charakteristiky pri premennej rýchlosti vetra podľa nameraných dát. Výstupné hodnoty z anemometra je však možné získať len pri pomerne veľkej frekvencii vzorkovania (10 s).

Keďže rýchlosť vetra sa nemení skokovo je preto použitý filter na výpočet strednej hodnoty. Tento filter vytvára zošikmenie charakteristiky a približuje správanie sa vetra k reálnym podmienkam. Je zapojený pred modelom vetra. Maska tohto bloku je zobrazená v prílohe C.1.



Obr. 2.5: Bloková schéma filtra strednej hodnoty [17]

Vstupné parametre modelu filtra a vetra sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2-2: Vstupné parametre modelu filtra a vetra

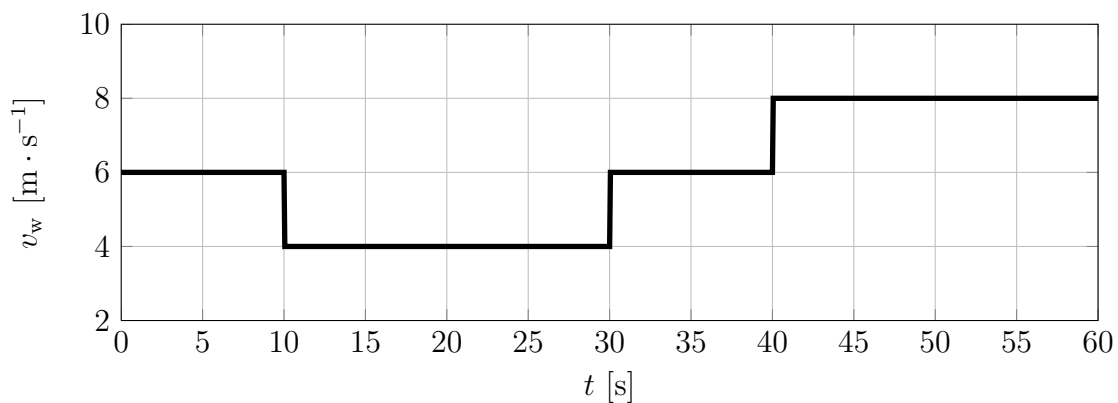
Filter strednej hodnoty		
S_{avg}	[s]	Filtrovací interval
v_{init}	$[m \cdot s^{-1}]$	Počiatočná rýchlosť vetra
Model vetra		
D_t	[m]	Priemer rotora turbíny
l_w	[m]	Rozbehová dráha vetra
I_t	[%]	Intenzita turbulencií
S_{vz}	[s]	Vzorkovací interval

Charakteristiky filtra a modelu vetra sú zobrazené na Obr. 2.6. Porovnaním Obr. 2.6a a Obr. 2.6b je viditeľné, že filter strednej hodnoty pracuje s oneskorením v dĺžke jedného filtrovacieho intervalu, v tomto prípade $S_{avg} = 10$ s.

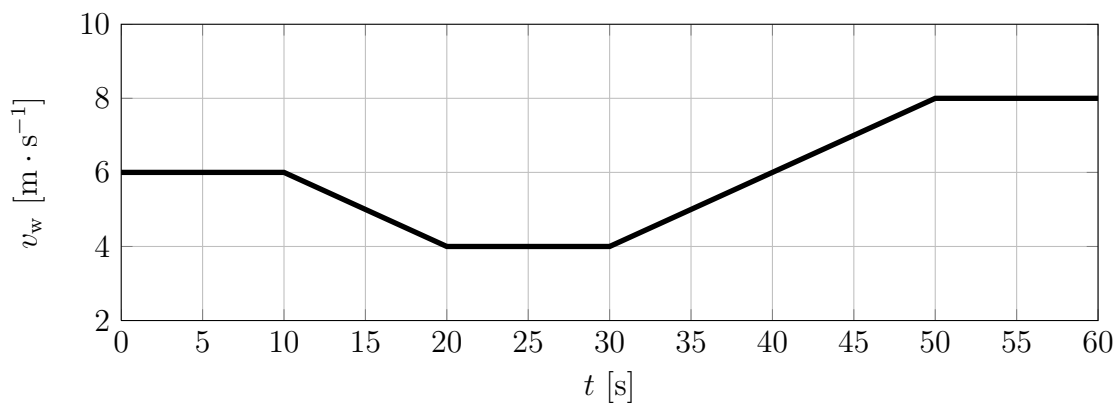
Toto oneskorenie vytvára blok **Transport Delay**. Takto nastavený filter však môžeme považovať za dostačujúci z hľadiska simulácie správania sa turbíny a jej odozvy na zmenu rýchlosti vetra. Pri dlhších simuláciách, napríklad pri celodenných výpočtoch výkonu by bol tento sklz zanedbateľný. V podstate sa jedná len o posunutie časovej základne zmeny rýchlosti vetra.

Zmena rýchlosti vetra je aproximovaná priamkami so strmou úmernou rozdielu počiatočnej a konečnej hodnoty rýchlosti vetra v danom intervale. Na Obr. 2.6c je

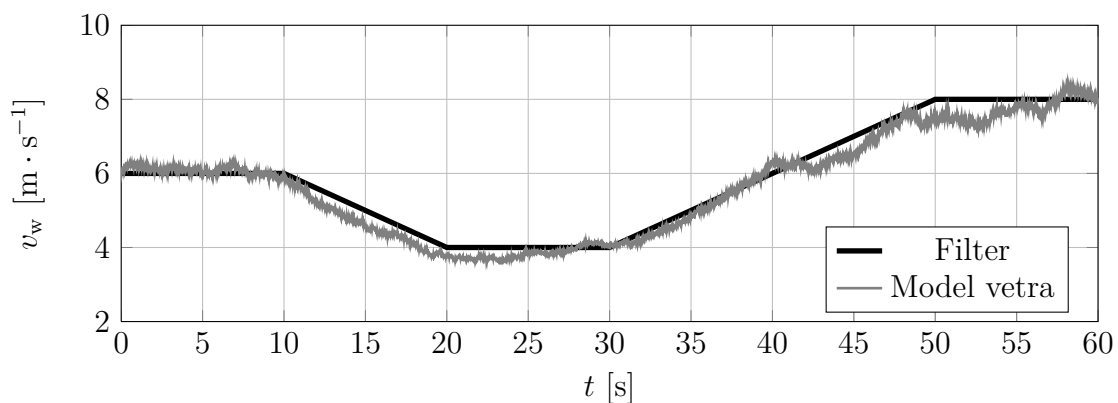
znázornený výstup z modelu vetra, ktorý približne kopíruje charakteristiku zmeny rýchlosti vetra na výstupe z filtra strednej hodnoty.



(a) Vstupné rýchlosti vetra



(b) Filtrovaná charakteristika rýchlosti vetra

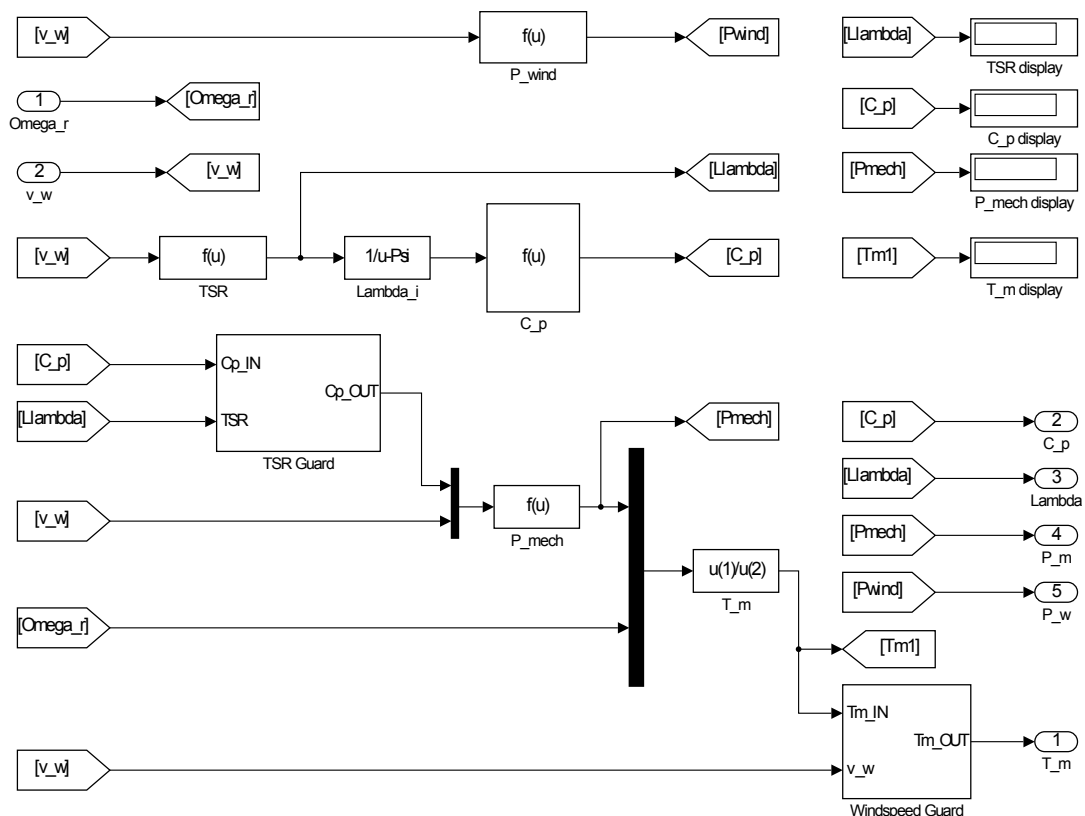


(c) Aproximácia modelom vetra

Obr. 2.6: Charakteristiky modelu filtra a vetra

2.2.2 Blok modelu rotora turbíny

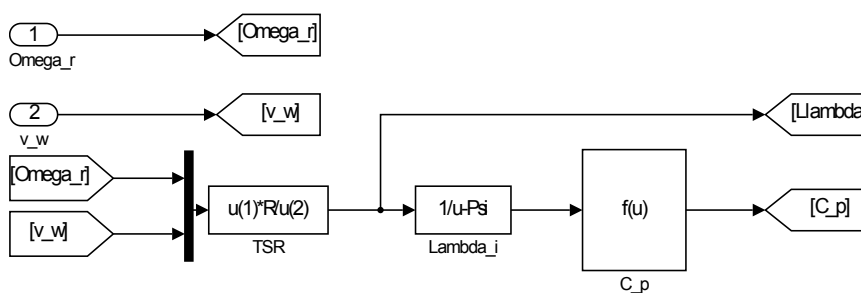
Blok modelu rotora turbíny spracováva vstupné rýchlosti vetra a mechanickej uhlovej rýchlosti ω_r . Bloková schéma modelu je zobrazená na Obr. 2.9. Z vstupnej rýchlosti vetra v_w je v bloku TSR podľa rovnice regresie charakteristiky $\lambda(v_w)$ z Obr. 2.17 vypočítaná rýchlobežnosť λ . Následne je podľa vzťahu (2.18) prepočítaný koeficient, ktorý vystupuje v rov. (2.19), ktorou je aproximovaná závislosť $C_P(\lambda)$. V maske modelu (príloha C.3) je možné nastavenie tejto závislosti meniť pomocou zmeny koeficientov. Nastavenie kriviek $\lambda(v_w)$ a $C_P(\lambda)$ je diskutované v časti 2.3.1.



Obr. 2.7: Bloková schéma modelu rotora turbíny

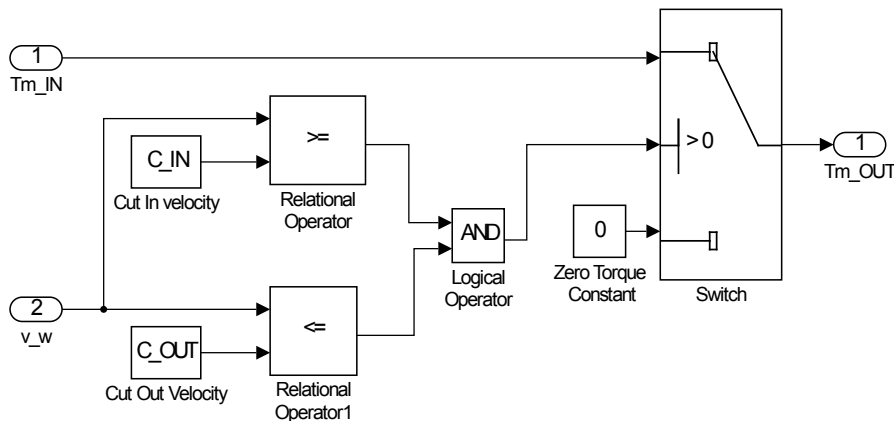
Tento model rotora turbíny, zobrazený na Obr. 2.7, pracuje s krivkou ustálených hodnôt $C_P(\lambda)$ pre danú rýchlosť vetra. Blok funkcie P_{mech} počíta pomocou známeho vzťahu maximálny ustálený mechanický výkon pri danej rýchlosti vetra a následne blok T_m prepočítava tento výkon podľa rov. (1.24) na mechanický moment, ktorý je zavedený do modelu hriadela. Pretože hodnota výkonového koeficienta nezávisí od aktuálnej uhlovej rýchlosti, ale od uhlovej rýchlosti v ustálenom stave pri danej rýchlosti vetra, je táto varianta modelu pomenovaná ako: **model so statickou výkonovou krivkou**. Tento model je možné využívať na predbežné posúdenie, aký výkon turbíny môžeme očakávať pri danej rýchlosti vetra. Nezohľadňuje však dynamické javy pri zmenách rýchlosti vetra.

Ak by sme chceli zohľadniť **dynamickú závislosť** rozbehu turbíny na ustálený mechanický výkon $P_m(\omega_r, v_w)$ je nutné poznať dynamickú krivku $C_P(\lambda)$ počas prechodového javu - rozbehu turbíny. Jej experimentálne určenie nebolo počas vypracovania tejto práce možné vykonať z nedostatočného prístrojového vybavenia laboratória. Návrhy na jej určenie sú však podrobne popísané v časti 4.2. Experimenty a využitie tejto úpravy modelu, v ktorom bola pre tieto účely nastavená všeobecne platná krivka pre vrtulové turbíny, sú popísané v časti 3.2. Úprava modelu pre určenie dynamickú krivku spočíva vo výpočte rýchlobežnosti λ v súlade so vzťahom (1.22), v bloku **TSR**, zobrazenou na Obr. 2.8. Koeficienty dynamickej krivky $C_P(\lambda)$ je možné bez ďalších úprav modelu zadať do masky bloku rotora (Obr. C.3).



Obr. 2.8: Úprava blokovej schémy modelu rotora

Pomocou bloku **TSR Guard** sa v modeli rotora (Obr. 2.7) nastavuje rozsah rýchlobežností turbíny. V bloku **Windspeed Guard** sa nastavuje rozsah vstupných rýchlostí v ktorých model pracuje a pre ktoré je nastavená krivka $C_P(\lambda)$. Tieto dva bloky pracujú na rovnakom princípe, a teda, pri prekročení nastaveného rozsahu hodnôt zastavia simuláciu nastavením výstupného koeficientu $C_P = 0$, alebo momentu $T_m = 0$. Bloková schéma jedného z týchto blokov je na Obr. 2.9.

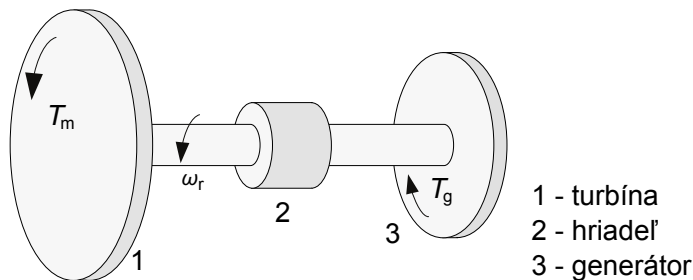


Obr. 2.9: Schéma obmedzovača vstupnej rýchlosti vetra

2.2.3 Blok modelu hriadeľa

Pri uvažovaní momentu zotrvačnosti turbíny a momentu zotrvačnosti generátora, ako dvoch hmotnostne majoritných a zároveň rotujúcich prvkov agregátu, je nutné zostrojiť model hriadeľa, ktorý bude moment zotrvačnosti týchto prvkov zahŕňať.

Vzhľadom na typ a vyhotovenie turbíny popísané v podkapitole 2.1 budeme používať pri zostavovaní matematického modelu hriadeľa dvojhmotný dynamický systém zobrazený na Obr. 2.10.



Obr. 2.10: Dvojhmotný dynamický systém [12]

Podľa podmienky rovnováhy momentov platí pre dvojhmotný dynamický systém

$$T_m = T_g + J_a \frac{d\omega_r}{dt} + T_{tr}, \quad (2.1)$$

kde T_m je krútiaci moment turbíny vyvolaný pôsobením vetra na jej listy; T_g je brzdiaci moment generátora so záťažou pôsobiaci proti mechanickému momentu turbíny a J_a je moment zotrvačnosti agregátu. Moment mechanického trenia T_{tr} budeme pri ďalších výpočtoch zanedbávať z dôvodu malej hmotnosti agregátu a guľíčkových ložísk použitých v turbíne. Za predpokladu tohto zjednodušenia môžeme rovnicu (2.1) upraviť na nasledujúci tvar:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_a} (T_m - T_g). \quad (2.2)$$

Následne dosadením rovnice momentu rotora turbíny (1.24) do predchádzajúcej rovnice dostaneme:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_a} \left(\frac{1}{2} \frac{\rho C_P v_w^3 A_r}{\omega_r} - T_g \right), \quad (2.3)$$

kde moment generátora T_g je určený vzťahom (2.14).

Určenie momentu zotrvačnosti výpočtom si vyžaduje demontáž agregátu, dôsledné určenie materiálového zloženia jednotlivých komponentov a presné určenie ich geometrických rozmerov, a následné namodelovanie agregátu. Potom je možné

simuláciou pomocou metódy konečných prvkov v niektorom z rozsiahlej palety programov určiť jeho hodnotu. S takto zistenou hodnotou je možné experimentom popísaným v časti 4.2 určiť dynamickú výkonovú krivku $C_P(\lambda)$. Jeho hodnotu je možné následne spresniť pomocou navrhnutého experimentu na určenie momentu zotrvačnosti celého agregátu, (pozri časť 4.1).

Návrh určenia momentu zotrvačnosti agregátu a popis potrebného prístrojového vybavenia k zdarnému uskutočneniu experimentu je uvedený v časti 4.1. Hodnotu momentu zotrvačnosti rotora turbíny je možné určiť zjednodušeným výpočtom pomocou empirického vzťahu podľa [14], v ktorom je zahrnutý aj moment zotrvačnosti hriadeľa, platí:

$$J_m = \frac{14\,500}{9} P_n^{1,2} R_t^2, \quad [\text{MW}; \text{m}] \quad (2.4)$$

po dosadení veličín do predchádzajúcej rovnice je moment zotrvačnosti turbíny

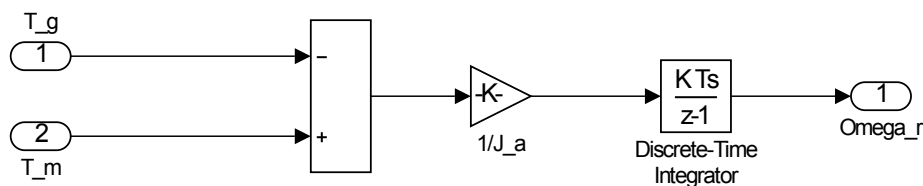
$$J_m = \frac{14\,500}{9} (1 \cdot 10^{-3} \text{ MW})^{1,2} (1,35 \text{ m})^2 = 0,738 \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (2.5)$$

Moment zotrvačnosti generátora budeme uvažovať podľa obdobného generátora ako $J_g = 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; [15].

Celkový moment zotrvačnosti agregátu nastavený v modeli je potom rovný

$$J_a = J_m + J_g = 0,738 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0,748 \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (2.6)$$

Matematický model reflektuje vzťah (2.2). Bloková schéma modelu je zobrazená na Obr. 2.11. Vstupy modelu sú moment na hriadeľ turbíny T_m a elektromagnetický moment generátora T_g . Výstupom z modelu je uhlová rýchlosť rotora turbíny ω_r . Maska modelu je zobrazená v prílohe C.4. V nej sa nastavuje moment zotrvačnosti agregátu J_a a počiatočná rozbehová rýchlosť nutná pre štart modelu ω_{start} .

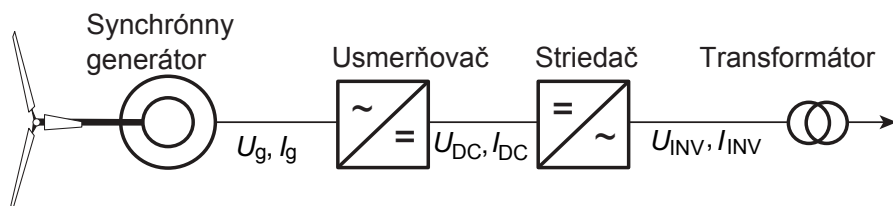


Obr. 2.11: Matematický model hriadeľa

2.2.4 Blok modelu synchrónneho generátora s PM¹¹

Teória synchrónneho generátora s PM

Synchrónny generátor s permanentými magnetmi pripojený priamo na hriadel¹² rotora turbíny vytvára výstupné napätie, ktorého frekvencia závisí od rýchlosti prúdenia vetra a teda od otáčok hriadeľa. Do siete je preto vždy pripojený cez usmerňovač a striedač (Obr. 2.12).



Obr. 2.12: Pripojenie turbíny s PMSG do siete [7]

Permanentné magnety v rotore svojou rotáciou okolo statora v ňom indukujú vnútorné napätie generátora, pre ktoré platí:

$$E_g = K_{pm} \frac{\omega_r n_p}{2}, \quad (2.7)$$

kde K_{pm} je konštanta, ktorá vyjadruje silu magnetického poľa permanentných magnetov generátora, n_p je počet pólov generátora a ω_r je uhlová rýchlosť rotora.

Pre činný výkon generátora platí:

$$P_g = 3 \frac{E_g U_g}{X_d} \sin \delta. \quad (2.8)$$

Pre vnútorný jalový výkon jednej fázy generátora platí:

$$Q_g = \frac{E_g^2 - E_g U_g \cos \delta}{X_d}, \quad (2.9)$$

kde U_g je napätie na svorkách generátora, δ je uhol medzi napätím E_g a U_g , a X_d je reaktancia generátora v smere osi d. Pri uvažovaní vnútorného účinníku generátora $\varphi = 1$ platí pre vnútorné napätie generátora podľa fázorového diagramu na Obr. 2.13

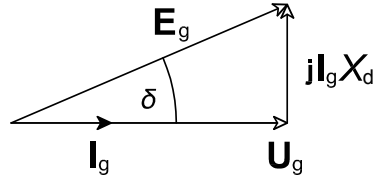
$$\mathbf{E}_g = \mathbf{U}_g + jX_d \mathbf{I}_g. \quad (2.10)$$

Z Obr. 2.13 taktiež vyplýva:

$$\mathbf{U}_g = \mathbf{E}_g \cos \delta. \quad (2.11)$$

¹¹ Podľa [7],[10].

¹² Pozri Obr. 2.1.



Obr. 2.13: Fázorový diagram synchronného generátora [10]

Dosadením rovnice (2.11) do rov. (2.8) dostaneme vzťah

$$P_g = \frac{3 E_g^2}{2 X_d} \sin 2\delta = \frac{3}{8 X_d} (K_{pm} \omega_r n_p)^2 \sin 2\delta = \frac{3 I_g^2 X_d}{\tan \delta}. \quad (2.12)$$

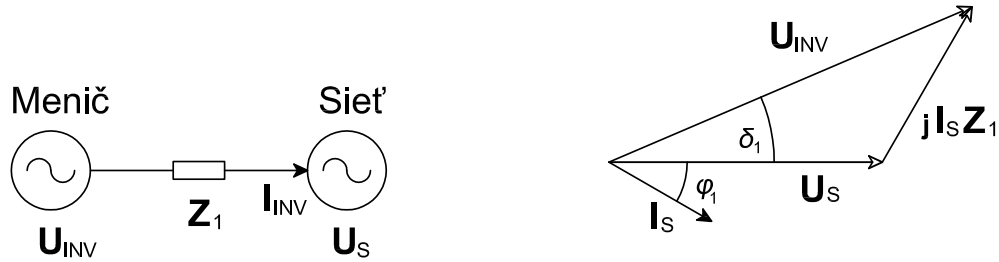
Moment generátora môžeme vyjadriť ako:

$$T_g = \frac{P_g}{\omega_r} = \frac{1}{\omega_r} \cdot \frac{3}{8 X_d} (K_{pm} \omega_r n_p)^2 \sin 2\delta = \frac{3}{4 L_s} K_{pm}^2 p \sin 2\delta = T_{max} \sin 2\delta, \quad (2.13)$$

kde $X_d = \omega_g L_s$ je reaktancia statora. Pre uhlovú frekvenciu prúdu generátora platí $\omega_g = n_p \omega_r / 2$, kde ω_r je mechanická uhlová rýchlosť rotora. Úpravou predchádzajúcej rovnice dostaneme:

$$T_g = \frac{3 I_g^2 X_d}{\omega_r \tan \delta} = \frac{3 I_g^2 L_s n_p}{2 \tan \delta}. \quad (2.14)$$

Vyvedenie výkonu z PMSG do siete cez usmerňovač a menič vytvára spojenie dvoch synchronných zdrojov - generátora a siete. Pre túto časť (od striedača po sieť) platí nasledovný fázorový diagram.



Obr. 2.14: Fázorový diagram pripojenia do siete [7]

Podľa fázorového diagramu môžeme odvodiť pre činný a jalový výkon dodávaný do siete nasledovné rovnice:

$$P = \frac{3 U_{INV} U_S \sin \delta_1}{Z_1}, \quad (2.15)$$

$$Q = \frac{3 U_{INV} U_S \cos \delta_1}{Z_1} - \frac{3 U_S^2}{Z_1}. \quad (2.16)$$

Činný výkon a jalový výkon môžeme teda meniť pomocou výstupného napätia meniča a jeho uhla natočenia δ_1 oproti sieti.

Blok modelu PMSG so záťažou

Blok modelu PMSG so záťažou obsahuje zapojenie celej elektrickej časti modelu.

Kľúčovou časťou bloku modelu PMSG so záťažou je matematický model synchronného generátora s permanentnými magnetmi, ktorý je pre účely tejto práce prevzatý z knižnice SIMPOWERSYSTEMS dostupnej v bežnej edícii programového vybavenia MATLAB-SIMULINK. Model je nastavený na generátorický chod zavedením záporne vzatej uhlovej rýchlosti rotora turbíny ω_r .

Vstupné parametre nastavované v maske¹³ modelu sú uvedené v tabuľke 2-3.

Tab. 2-3: Vstupné parametre modelu PMSG

K_{pm}	172,78 mV · min	Napätová konštanta
R_s	2,5 Ω	Odpor statorového vinutia
L_s	3,07 mH	Indukčnosť statorového vinutia
n_p	10	Počet pólov
J_g	0,01 kg · m ²	Moment zotrvačnosti [15]
F_{tr}	zanedbaný	Súčiniteľ trenia
D_k	zanedbaný	Koeficient viskózneho tlmenia

V modeli synchronného generátora je koeficient viskózneho tlmenia a súčiniteľ trenia zanedbaný z dôvodu veľkosti a konštrukčných vlastností agregátu (guličkové ložiská mazané vlastnou vazelínou bez cirkulácie maziva).

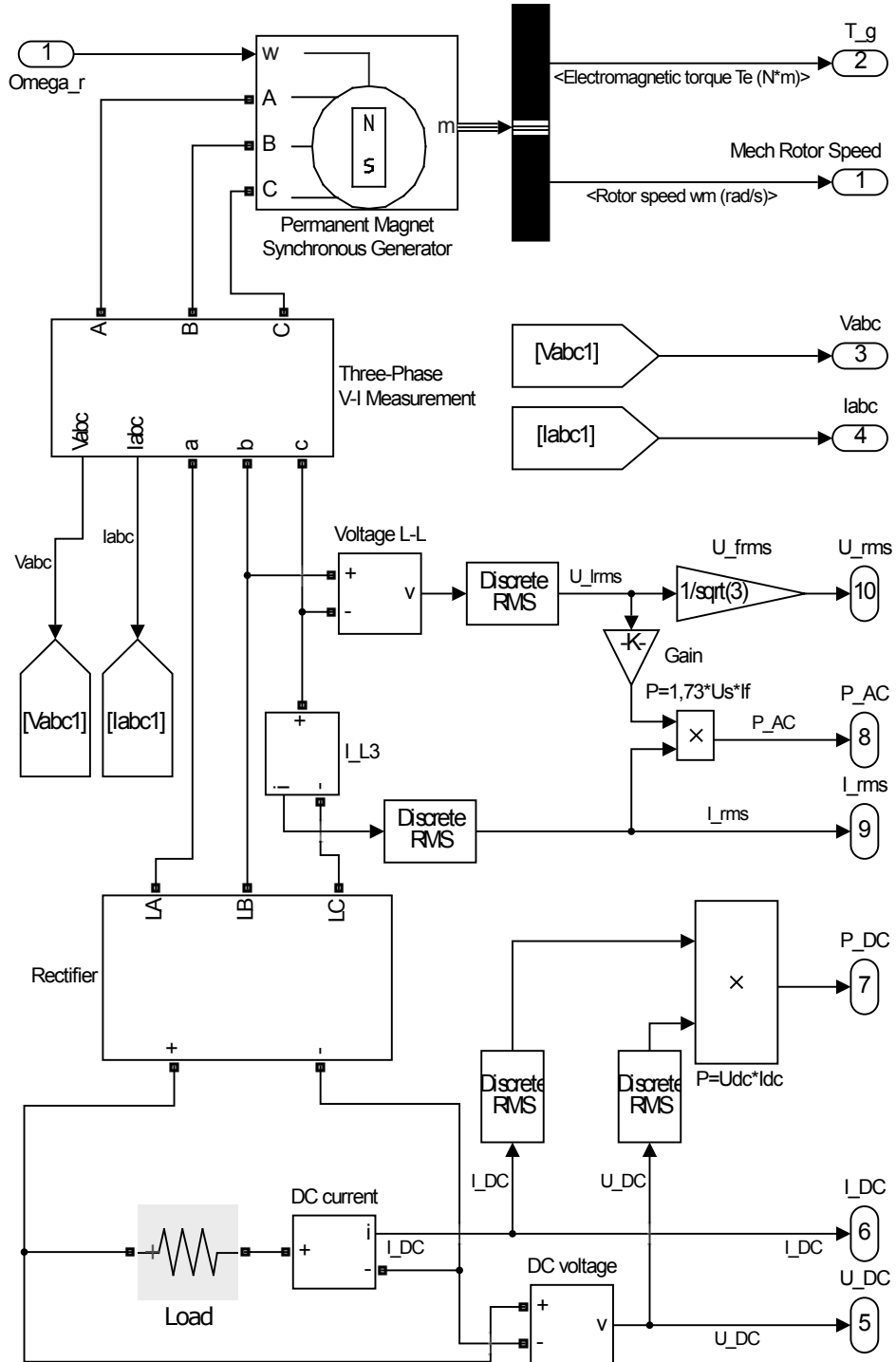
Napätová konštanta bola určená meraním naprázdno pri točiacom sa rotore, viac v časti 2.3.2. Odpor statorového vinutia bol určený meraním medzi výstupnými svorkami z generátora a následnou korekciou výsledku. Indukčnosť statorového vinutia bola určená meraním so skratovaným statorom, viac v časti 2.3.3.

Blok modelu PMSG so záťažou ďalej obsahuje usmerňovač prevzatý z knižnic programu MATLAB-SIMULINK bez ďalších úprav a nastavení, pretože datasheet použitého usmerňovača neobsahuje špecifikáciu jeho komponentov.

Za usmerňovačom je zapojená dynamicky nemenná odporová záťaž. Záťaž však bola počas merania nastavovaná MPPT regulátorom, hodnoty odporu záťaže sú zobrazené v tabuľke 2-4 a grafické znázornenie závislosti je zobrazené na Obr. 2.19. Nastavovanie tejto záťaže je teda možné len ručne, nakoľko model premenlivej odporovej záťaže z knižnice SIMSCAPE nespolupracuje s knižnicou SIMPOWERSYSTEMS. Riešenie tohto problému ponúka firma PLEXIM GmbH, nie je však súčasťou základného inštaláčného balíku MATLAB-SIMULINK a je spoplatnené.

¹³Maska modelu synchronného generátora je v prílohe C.6.

V modeli je zahrnuté taktiež meracie ústrojenstvo elektrických veličín a ich výstupy do ovládacieho prostredia. Bloková schéma modelu je zobrazená na Obr. 2.15. Maska celého bloku modelu PMSG so záťažou je v prílohe C.5.



Obr. 2.15: Bloková schéma modelu PMSG so záťažou

2.3 Merania na turbíne

Dáta prezentované v tejto podkapitole sú využité na optimalizáciu modelu podľa turbíny inštalovanej na Ústave elektroenergetiky.

Namerané elektrické veličiny boli zaznamenávané so vzorkovaním $S_m = 1$ s. Rýchlosti vetra boli zaznamenávané so vzorkovaním $S_w = 30$ s. Hodnoty boli následne spárované podľa času záznamu. Prístroje použité na meranie a analýzu dát sú uvedené v prílohe F. Bloková schéma merania elektrických veličín je v prílohe F.1.

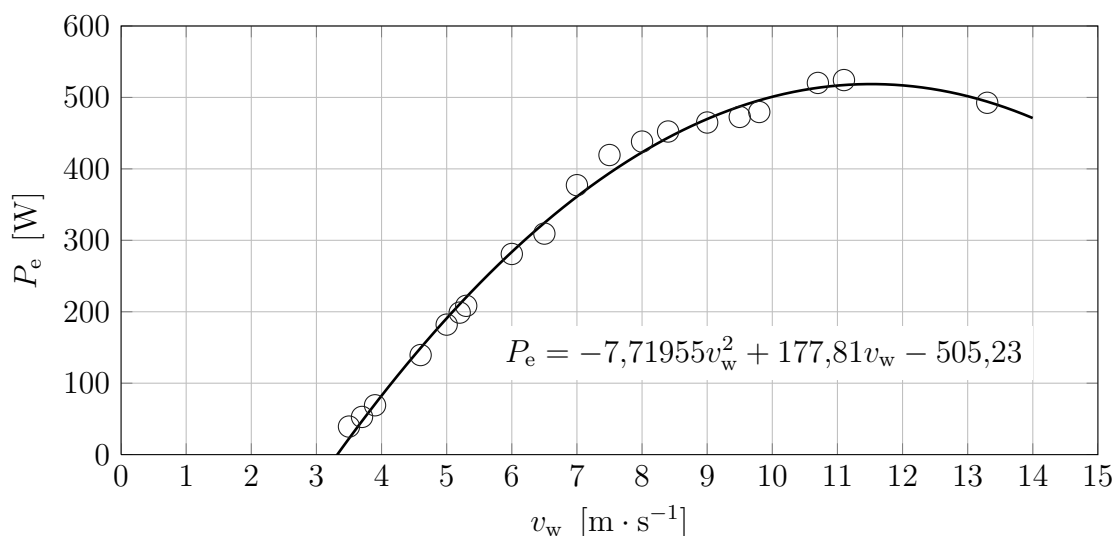
2.3.1 Meranie výkonovej charakteristiky

Počas dní 14. až 20.4.2015 bolo vykonané dlhodobé meranie výkonovej charakteristiky $P(v_w)$. Namerané charakteristiky sú uvedené v Tab. 2-4.

Tab. 2-4: Namerané dáta z turbíny

v_w [m/s]	γ [°]	$U_{f,RMS}$ [V]	$I_{f,RMS}$ [A]	U_{DC} [V]	I_{DC} [A]	R [Ω]	P_e [W]	f_I [Hz]	ω_r [rad/s]
3,5	303	25,02	0,71	56,00	0,7	80,00	39,3	30,05	38,31
3,7	321	24,97	0,81	55,33	0,95	58,24	52,8	30,81	38,70
3,9	336	25,99	0,81	56,30	1,23	45,77	69,1	31,83	39,98
4,6	14	25,74	1,37	56,80	2,45	23,18	142,2	32,97	41,41
5,0	28	26,84	1,98	63,38	2,87	22,08	182,6	35,48	44,56
5,2	341	26,65	2,19	57,60	3,45	16,70	199,7	35,28	44,31
5,3	318	26,65	2,18	58,61	3,55	16,51	208,6	35,33	44,37
6,0	317	28,78	3,12	60,61	4,64	13,06	281,3	40,02	50,27
6,5	20	29,66	3,51	61,65	5,03	12,28	309,9	42,47	53,34
7,0	29	31,26	3,76	66,46	5,68	11,70	377,7	45,03	56,56
7,5	344	32,88	4,49	68,58	6,13	11,21	420,4	48,48	60,89
8,0	9	33,67	4,21	68,15	6,43	11,23	438,2	49,06	61,62
8,4	2	33,39	4,55	68,53	6,60	11,04	452,3	49,65	62,36
9,0	26	33,65	4,98	68,45	6,80	10,08	465,6	51,20	64,31
9,5	5	33,88	5,32	67,54	7,01	9,65	473,2	52,38	65,79
9,8	11	34,45	5,43	68,11	7,04	9,67	480,3	53,08	66,67
10,7	24	34,40	5,71	68,85	7,55	9,12	521,2	57,88	72,70
11,1	1	34,88	5,39	72,68	7,21	10,08	524,9	54,11	67,96
13,3	1	33,53	4,89	68,16	7,23	9,43	494,5	51,06	64,13

Z nameraných údajov je možné zostrojiť charakteristiku závislostí ustáleného výkonu pri danej rýchlosti vetra $P_e(v_w)$, zobrazená je na Obr. 2.16.



Obr. 2.16: Závislosť ustáleného výkonu od rýchlosti vetra

Hodnoty ustálených elektrických výkonov za usmerňovačom môžeme pri uvažovaní účinnosti premeny mechanickej energie na hriadeli na energiu elektrickú η_e prepočítať na mechanický výkon dostupný na hriadeli.

Účinnosť generátora sa z dostupných materiálov nepodarilo zistiť, budeme preto uvažovať účinnosť podľa obdobných zariadení¹⁴ približne rovnú $\eta_g = 0,72$. Účinnosť usmerňovača sa počas merania pohybovala približne na hodnote $\eta_{\text{rect}} = 0,98$. Celková uvažovaná účinnosť elektrických zariadení je teda $\eta_e = 0,7$.

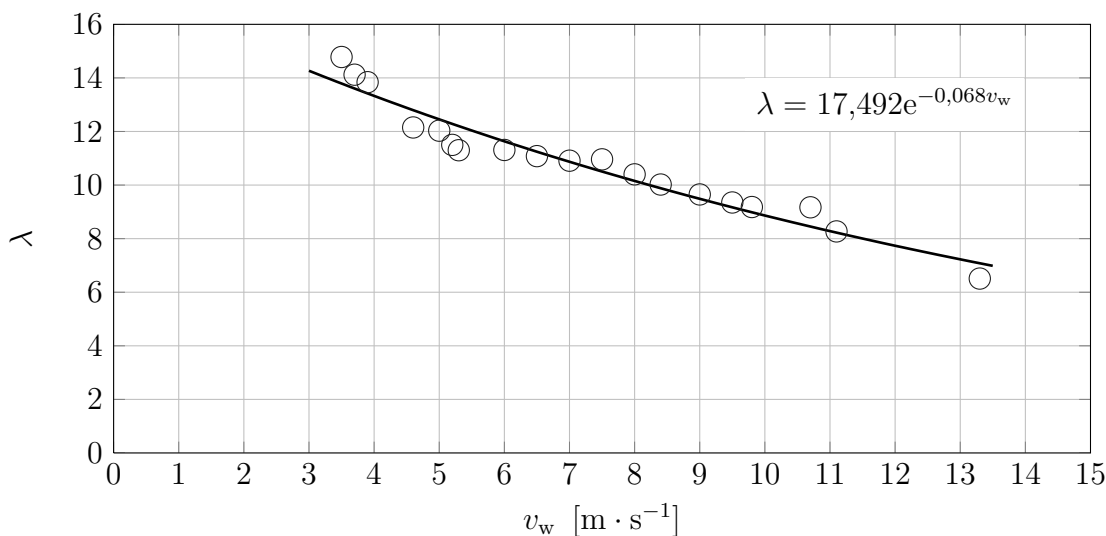
Použitím známeho vzťahu (1.14) môžeme vyjadriť hodnoty výkonového koeficientu $C_P(v_w)$. Následne podľa rov. (1.22) vypočítame hodnoty rýchlobežností λ podľa ktorých je možné zostaviť závislosť $C_P(\lambda)$. Vypočítané hodnoty sú uvedené v tabulke 2-5.

Tab. 2-5: Vypočítané hodnoty λ a C_P

v_w [m/s]	3,5	3,7	3,9	4,6	5,0	5,3	6,0	6,5	7,0
λ [–]	14,78	14,12	13,84	12,15	12,03	11,30	11,31	11,08	10,91
C_P [–]	0,35	0,40	0,45	0,55	0,56	0,54	0,50	0,44	0,43
v_w [m/s]	7,5	8,0	8,4	9,0	9,5	9,8	10,7	11,3	13,3
λ [–]	10,96	10,40	10,02	9,65	9,35	9,18	9,17	8,27	6,51
C_P [–]	0,38	0,33	0,28	0,25	0,21	0,20	0,16	0,15	0,08

¹⁴ Pre 10 pólový synchronný generátor s výkonom $P_{\text{max}} = 1 \text{ kW}$, podľa [16].

Blok modelu rotora turbíny pracuje so závislosťami $\lambda(v_w)$ a $C_P(\lambda)$. Vynesením ich hodnôt do grafu získame grafické znázornenie ich závislostí.



Obr. 2.17: Závislosť rýchlobežnosti od rýchlosti vetra

Je nutné poznamenať, že na konštrukciu krivky $C_P(\lambda)$ sú použité ustálené namerané hodnoty výkonových koeficientov pri danom vetre podľa tab. 2-5. Z tohto dôvodu bude táto krivka reflektovať konečný stav výkonového koeficientu pri danej rýchlosti vetra po odoznení prechodového deja - teda v tomto prípade po prekonaní stavu rozbehu turbíny. Dynamická funkcia $C_P(\lambda)$, ktorá popisuje správanie sa krivky výkonového koeficientu turbíny počas celého spektra otáčok si vyžaduje veľmi precíznu metodiku merania a prístrojové vybavenie, ktoré momentálne nie je na Ústave elektroenergetiky dostupné. Postup počas merania je popísaný v časti 4.3.

Krivka ustálených hodnôt sa však dá približne aproximovať pomocou známych vzťahov pre dynamickú závislosť $C_P(\lambda)$ turbín s nastaviteľným natáčaním listov. Podľa [13] platí:

$$C_P(\lambda, \vartheta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \vartheta - c_4 \vartheta^x - c_5 \right) e^{\frac{-c_6}{\lambda_i}}, \quad (2.17)$$

kde ϑ je uhol natočenia listu. Potom $c_i, i \in \langle 1; 6 \rangle$ a χ vystupujúce v rovnici sú parametrizačné koeficienty. Pre pomer $1/\lambda_i$ platí nasledovná rovnica:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\vartheta} - \frac{\psi}{\vartheta^3 + 1}. \quad (2.18)$$

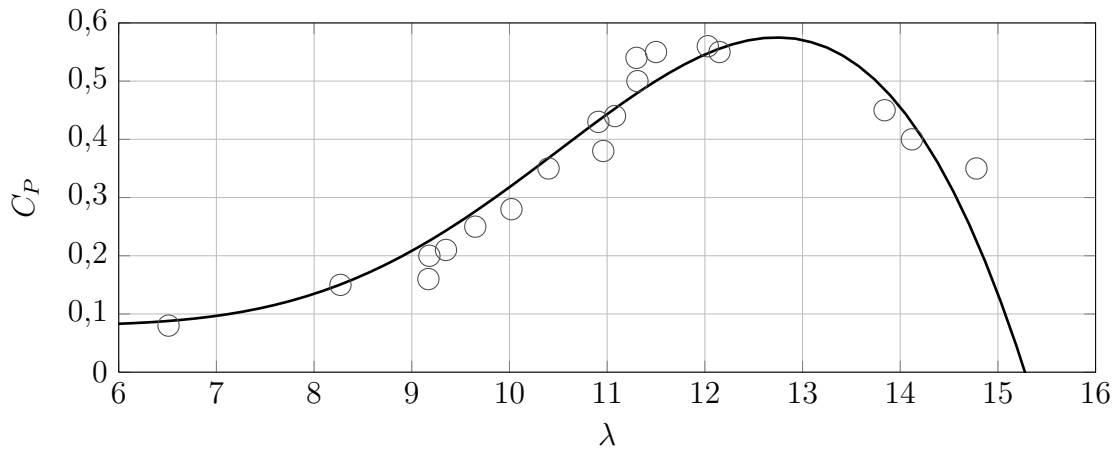
Keďže uvažujeme turbínu bez natáčania lopatiek, teda $\vartheta = 0$, môžeme rovnicu (2.17) upraviť na tvar

$$C_P(\lambda) = c_x + c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_5 \right) e^{\frac{-c_6}{\lambda_i}}, \quad (2.19)$$

kde pripočítaním koeficientu c_x sa nastavuje počiatočná hodnota na osi y pre $\lambda \approx 0$. Zároveň za rovnakých predpokladov po úprave rovnice (2.18) platí:

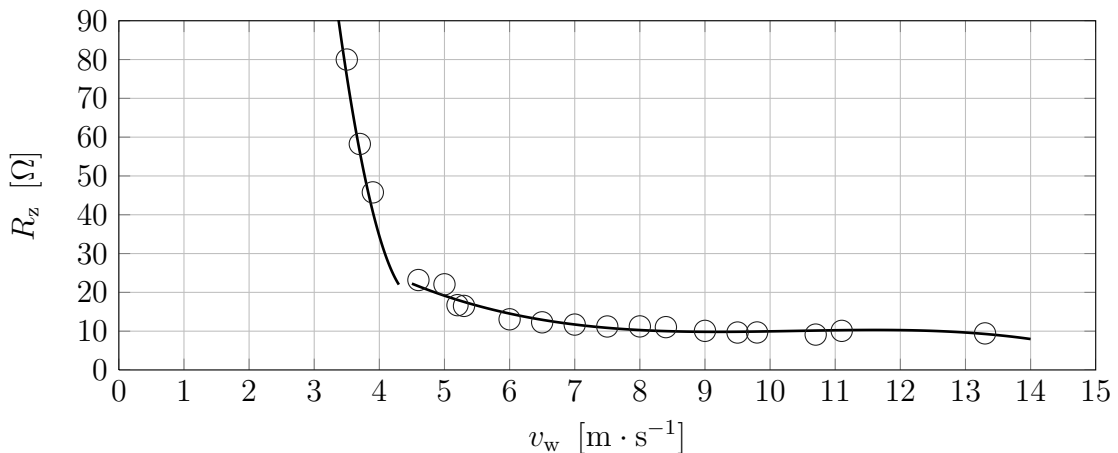
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} - \psi. \quad (2.20)$$

Koeficienty c_x , c_1 , c_2 , c_5 , c_6 a ψ vystupujúce v rovnici (2.19) boli nastavené tak, aby čo najlepšie kopírovali závislosť na nameraných hodnôt. Hodnoty koeficientov sú: $c_x = 0,08$; $c_1 = 4,2$; $c_2 = 96$; $c_5 = 1,55$; $c_6 = 81$; $\psi = 0,05$. Charakteristika $C_P(\lambda)$ je zobrazená na Obr. 2.18.



Obr. 2.18: Závislosť výkonového koeficientu na rýchlobežnosti

Dáta, z ktorých boli zostavené tieto charakteristiky boli merané na záťaži, ktorú nastavoval MPPT regulátor. Z tohto dôvodu tieto charakteristiky v sebe zahŕňajú popis jeho funkcie v podobe nastavenia odporu záťaže. To znamená, že nastavením odporu záťaže je simulovaná činnosť MPPT regulátora. Hodnoty odporu záťaže ktorú nastavoval MPPT regulátor v závislosti na rýchlosti vetra, respektíve výkone sú uvedené v tabuľke 2-4. Grafické znázornenie závislosti odporu záťaže na rýchlosti vetra je na Obr. 2.19.

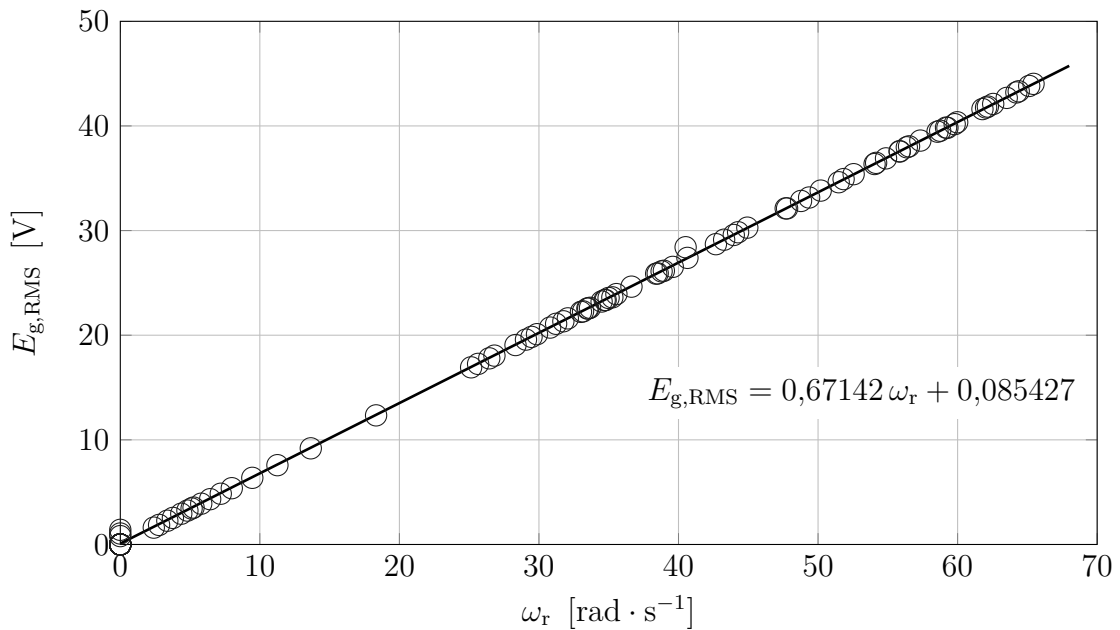


Obr. 2.19: Odpor záťaže počas merania charakteristík

2.3.2 Meranie napäťovej konštanty

Meranie napäťovej konštanty generátora bolo uskutočnené naprázdno. Z Obr. 2.13 je zrejmé, že pri prúde statorom $I_g = 0$ A je namerané napätie naprázdno rovné vnútornému elektromotorickému napätiu generátora E_g . V súlade so vzťahom (2.7) môžeme z nameraných dát¹⁵ pre známy počet pólov $n_p = 10$ zostrojiť charakteristiku závislosti napätia na uhlovej rýchlosti rotora zobrazenú na Obr. 2.20.

Lineárny regresný model výpočtu je v prílohe E.1. Koefficient determinancie pre tento model je $R^2 = 0,99981$, čo oprávňuje jeho použitie.



Obr. 2.20: Závislosť napätia od uhlovej rýchlosti rotora

Z Obr. 2.20 je viditeľné, že závislosť napätia od uhlovej rýchlosti má lineárny charakter. Po zanedbaní absolútneho člena z rovnice regresie pre napäťovú konštantu platí:

$$K_{pm} = \frac{E_g}{\omega_r} = 0,67142 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}. \quad (2.21)$$

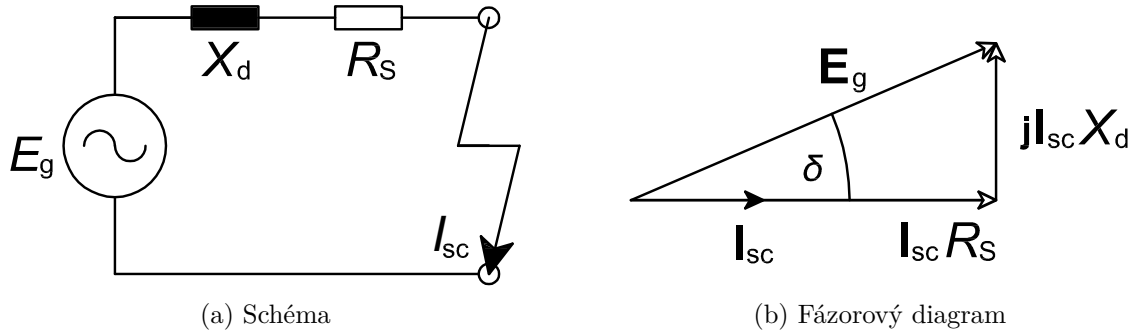
Matematický model PMSG v programe MATLAB-SIMULINK využíva konštantu pre špičkovú hodnotu združeného napätia v tvare $[\text{mV} \cdot \text{min}]$. Po prepočte platí:

$$K_{pm} = 0,67142 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \frac{2\pi \text{ rad} \cdot \sqrt{2}\sqrt{3}}{60 \text{ s}} \cdot 1000 = 172,226 \text{ mV} \cdot \text{min}. \quad (2.22)$$

¹⁵ Dátové tabuľky sú prístupné v elektronickej prílohe na CD. Pozri zoznam priložených dát na CD v prílohe G.

2.3.3 Meranie so skratovaným statorom

Za účelom výpočtu indukčnosti rotora turbíny bolo vykonané meranie¹⁶ na turbíne so skratovaným statorom. Napätie na svorkách generátora naprázdno počas skratu poklesne na takmer nulovú hodnotu. Tento úbytok napätia počas skratu nastane na impedancii statorového vinutia.



Obr. 2.21: Schéma a fázorový diagram pri skratovanom statore

Z efektívnej hodnoty ustáleného skratového prúdu (Obr. 2.22c), $I_{sc,RMS} = 14,14$ A môžeme vypočítať úbytok napätia na zmeranom odpore vinutia jednej fázy statora $R_s = 2,5 \Omega$, ktorý je rovný:

$$\Delta U_{R_s} = I_{sc} R_s = 14,14 \text{ A} \cdot 2,5 \Omega = 35,35 \text{ V}. \quad (2.23)$$

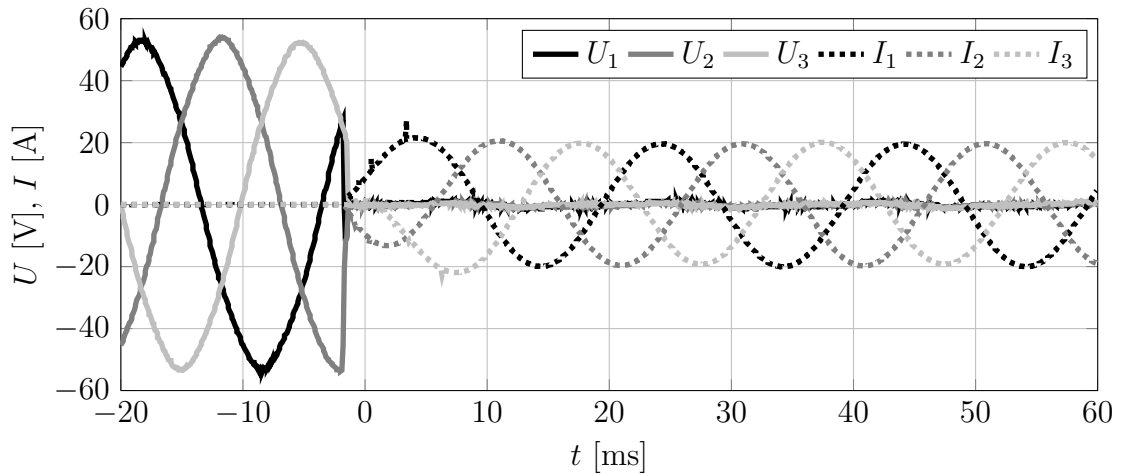
Následne z efektívnej hodnoty napätia naprázdno, pred skratom, podľa Obr. 2.22b a úbytku napätia na odpore vinutia (po skrate) môžeme s rešpektovaním fázorového diagramu zobrazeného na Obr. 2.21b určiť úbytok napätia na reaktancii vinutia

$$\Delta U_{X_d} = I_{sc} X_d = \sqrt{E_g^2 - \Delta U_{R_s}^2} = \sqrt{(37,9 \text{ V})^2 - (35,35 \text{ V})^2} = 13,67 \text{ V}. \quad (2.24)$$

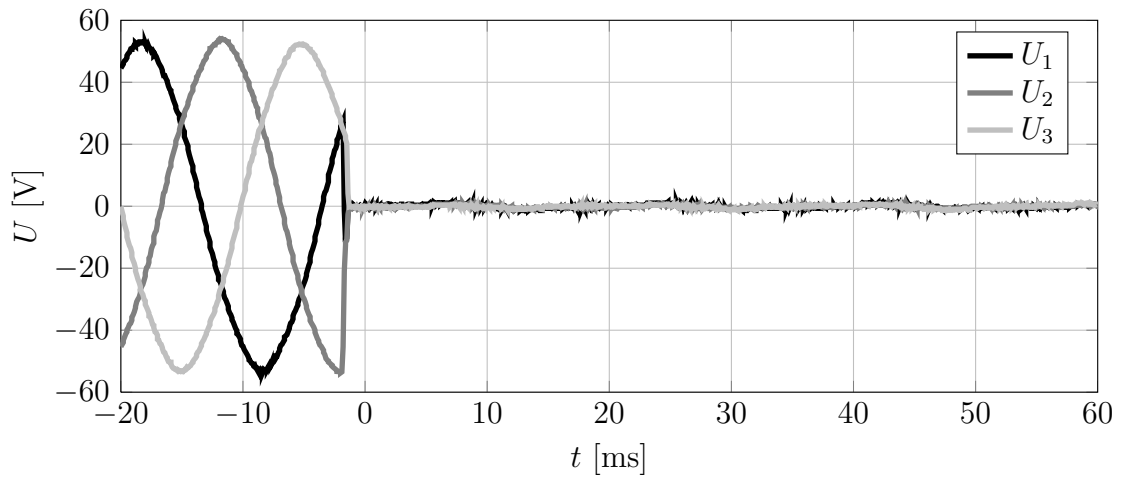
Indukčnosť statorového vinutia generátora určíme z reaktancie vinutia. Perióda prúdu po skrate je podľa Obr. 2.22c približne rovná $S_T = 20$ ms. Indukčnosť vinutia je potom:

$$L_s = \frac{\Delta U_{X_d}}{I \left(2\pi \frac{1}{S_T}\right)} = \frac{13,67 \text{ V}}{14,14 \text{ A} \left(2\pi \cdot \frac{1}{20 \text{ ms}}\right)} = 3,07 \text{ mH}. \quad (2.25)$$

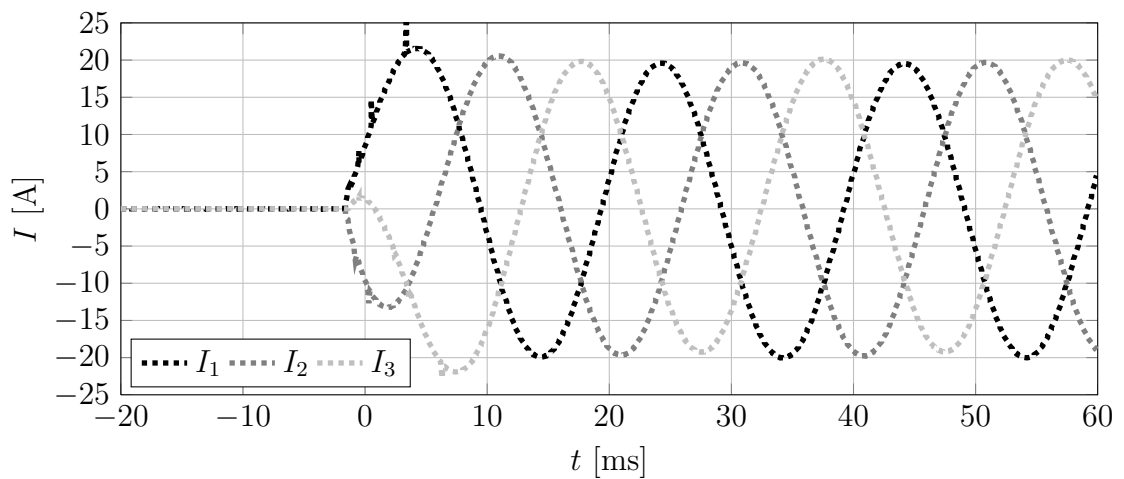
¹⁶ Na meranie priebehu skratového prúdu boli použité prístroje uvedené v prílohe F-1.



(a) Priebehy fázových napätí a prúdov



(b) Priebehy fázových napätí



(c) Priebehy prúdov

Obr. 2.22: Charakteristika generátora v stave nakrátko

3 EXPERIMENTY

Táto časť práce sa venuje popisu experimentov a porovnaniu modelu s nameranými hodnotami na turbíne. V prvej časti tejto kapitoly sú popísané experimenty s modelom využívajúcim statickú krivku výkonového koeficientu $C_P(\lambda)$ skonštruovanú z veličín nameraných v ustálenom stave. V závere je popísaný experiment s modelom využívajúcim dynamickú krivku $C_P(\lambda)$ nastavenú podľa všeobecnej krivky platnej pre vrtulové turbíny.

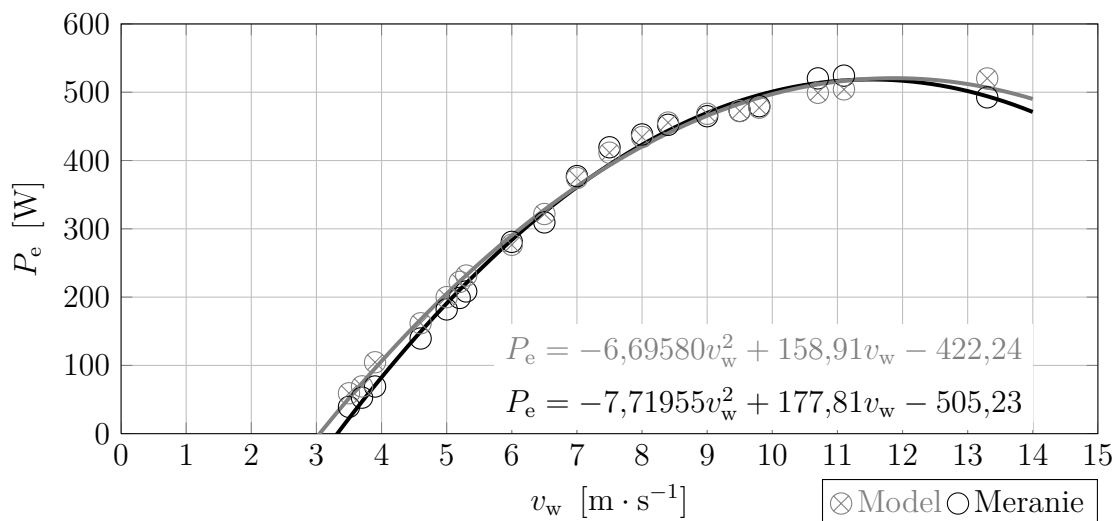
3.1 Model so statickou krivkou $C_P(\lambda)$

Tento model využíva krivku výkonového koeficientu zostavenú z ustálených hodnôt pri danej rýchlosti vetra. Nastavenie modelu podľa tejto krivky je diskutované v časti 2.3.1. Konštrukciou tohto modelu sa zaoberá časť 2.2.2.

V podkapitole 3.1.1 sú navrhnuté experimenty v ustálených stavoch, ktorých výsledky sú porovnané s nameraných charakteristikami. Ďalej, v časti 3.1.2 je opísaný experiment pri premennej rýchlosti vetra. Je nutné poznamenať, že model dosahuje najlepšiu presnosť v rozsahu rýchlostí vetra $v_w = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $v_w = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

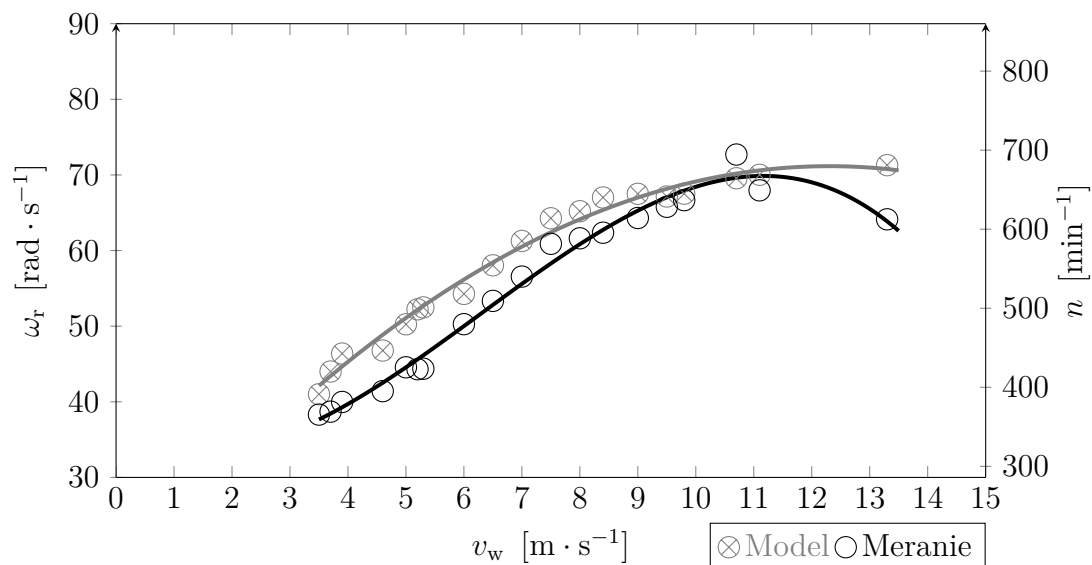
3.1.1 Charakteristiky v ustálených stavoch

V modeli bola postupnými krokmi nastavovaná rýchlosť vetra v nameranom rozsahu $\langle 3,7; 13,3 \rangle \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty boli následne odčítané po ustálení výkonu na DC strane. Odpor záťaže bol počas simulácií nastavovaný podľa tab. 2-4.

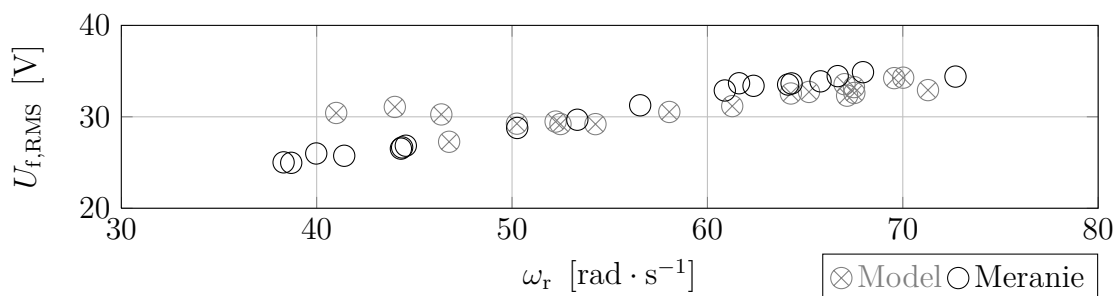


Obr. 3.1: Závislosť ustáleného výkonu od rýchlosti vetra

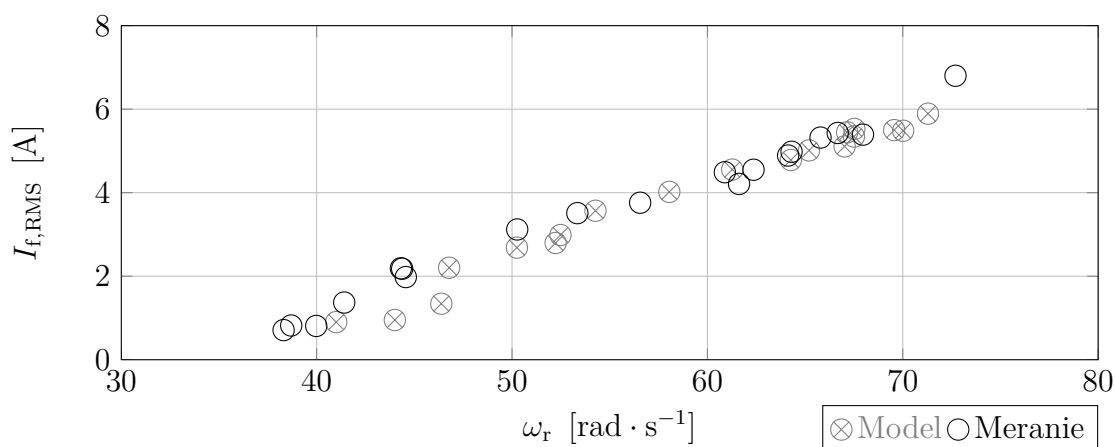
Informácie o správaní sa turbíny a presnosti modelu popisujú zostrojené charakteristiky závislostí veličín v ustálených stavoch. Je zrejmé, že charakteristiky modelu kopírujú namerané hodnoty s dostatočnou presnosťou.



Obr. 3.2: Závislosť ustálených uhlových rýchlostí rotora od rýchlosti vetra



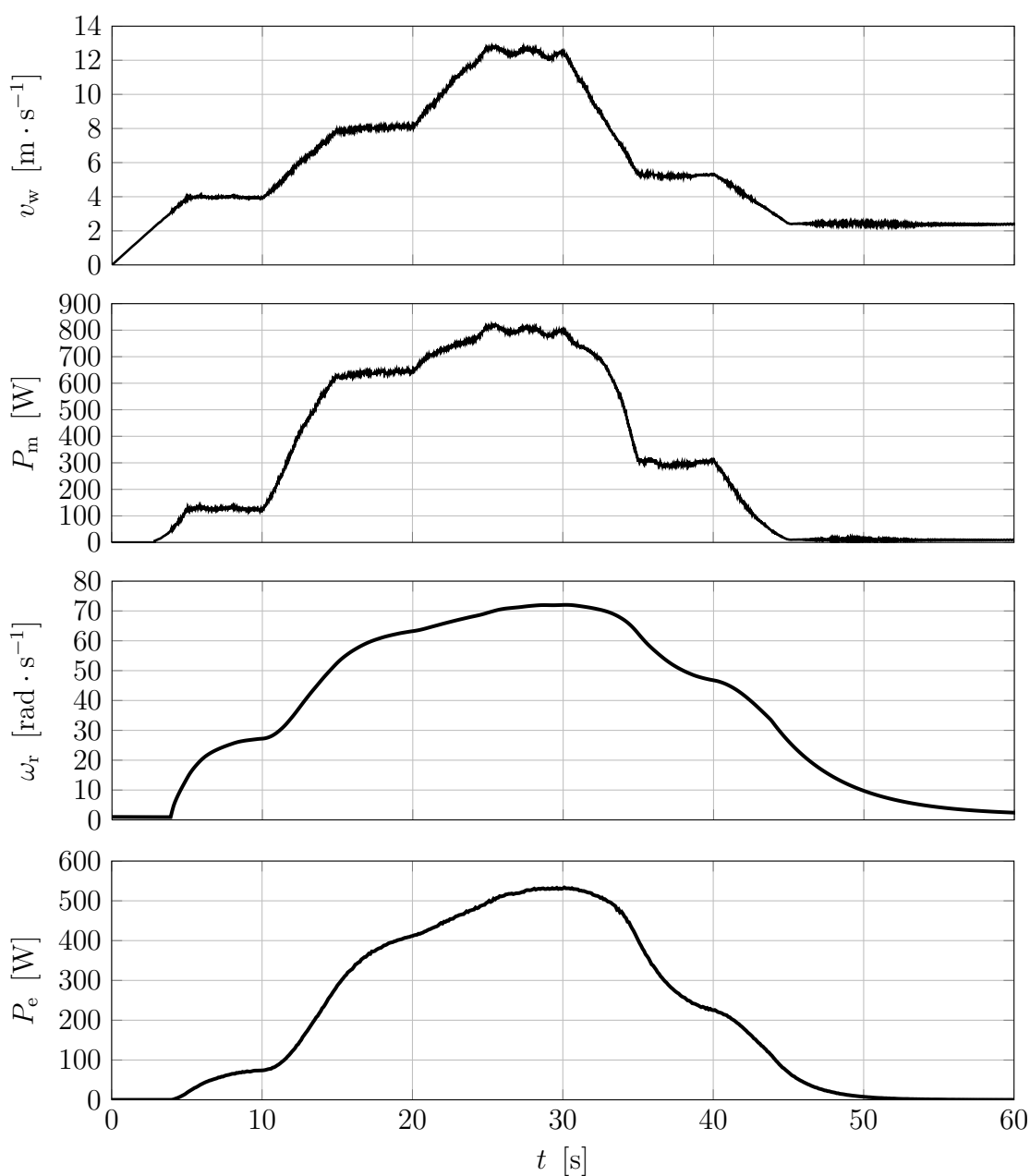
Obr. 3.3: Závislosť efektívnej hodnoty fázového napätia od uhlovej rýchlosti rotora



Obr. 3.4: Závislosť efektívnej hodnoty fázových prúdov od uhlovej rýchlosti rotora

3.1.2 Charakteristiky pri zmene rýchlosti vetra

Tento experiment bol vytvorený za účelom skúmania odozvy výkonu turbíny na premenlivú rýchlosť vetra. Na Obr. 3.5 sú zobrazené všetky krajné stavy turbíny nastavené v modeli rotora. Pri rýchlosti $v_w < 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nie je model v chode. Nad touto rýchlosťou začne turbína naberať mechanický výkon a zároveň začne rásť mechanická uhlová rýchlosť rotora turbíny, ktorá tvarom približne kopíruje mechanický výkon P_m . Elektrický výkon približne opisuje tvar rastu otáčok, čo je v súlade s teoretickými predpokladmi.

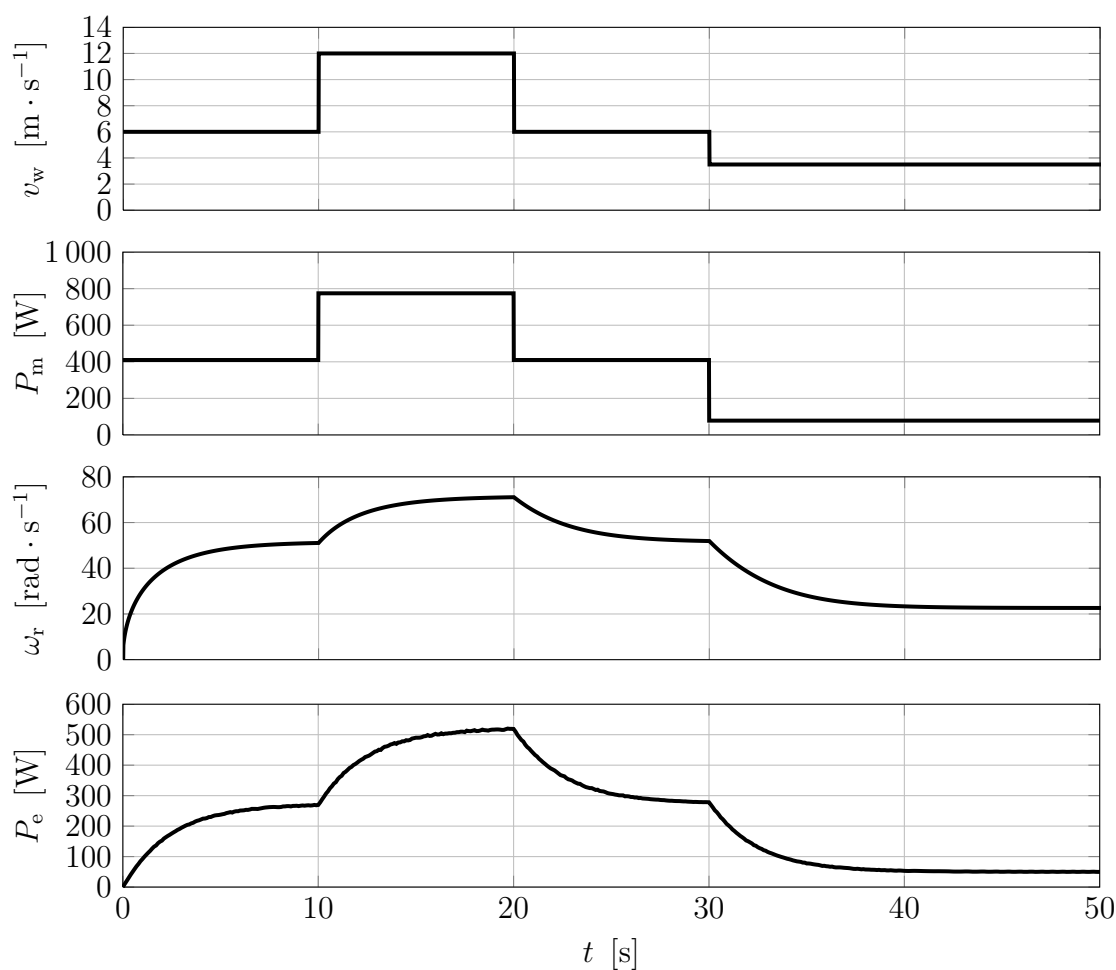


Obr. 3.5: Charakteristiky modelu turbíny pri premenlivej rýchlosti vetra

Približne od 35-tej sekundy je viditeľný výrazný pokles rýchlosti vetra. S ním zároveň klesá mechanický výkon dodávaný z vetra na hriadeľ turbíny. Strmosť poklesu uhlovej rýchlosti je daná zotrvačnosťou turbíny. Pokles elektrického výkonu opäť kopíruje tvar priebehu otáčok, no strmosť jeho poklesu zároveň ovplyvňuje aj vybijanie energie akumulovanej v elektrickom obvode generátora. Od 45-tej sekundy vidíme pokles rýchlosti vetra pod hodnotu $v_w < 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, model rotora sa pomocou bloku Wind Guard odstavuje, čím simuluje odstavenie reálnej turbíny.

3.1.3 Charakteristiky pri step-up rýchlosti vetra

Cielom tohto experimentu je ukážka spôsobu výpočtu mechanického výkonu, ktorý je počítaný priamo z rýchlosti vetra. To znamená, že tento model pracuje s predpokladom nekonečne pevných listov turbíny. Toto zjednodušenie bolo prijaté na základe obmedzenej možnosti získavania dát. Detailne sa mu venujú podkapitoly 2.3.1 a 4.3.



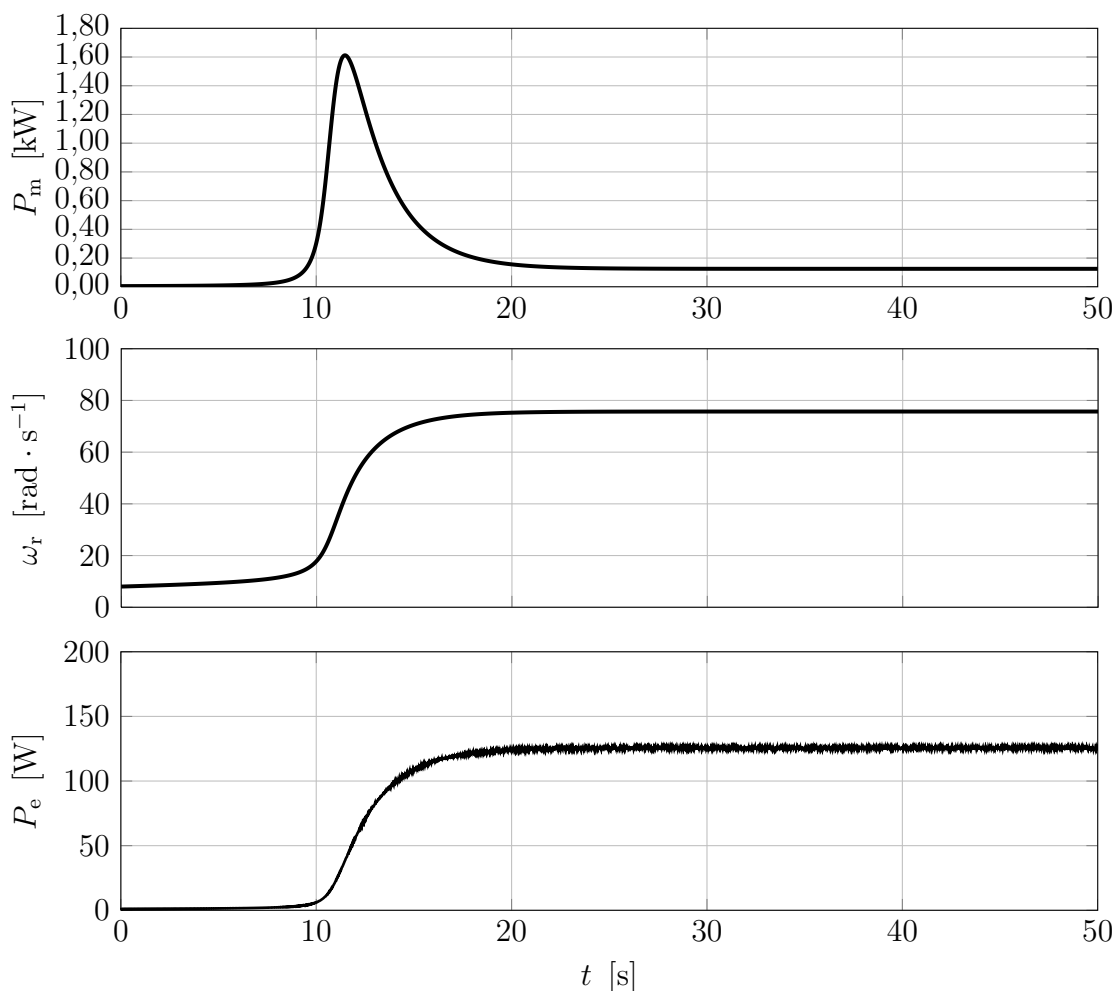
Obr. 3.6: Charakteristiky modelu turbíny pri step-up rýchlosti vetra

3.2 Charakteristiky modelu s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$

Je nutné poznamenať, že táto časť slúži len na ilustrovanie charakteristík, keďže dynamickú krivku $C_P(\lambda)$ turbíny WHISPER 200 s dostupným laboratórnym zariadením nebolo možné určiť. Postup na jej určenie je diskutovaný v časti 4.2.

Model s dynamickou krivkou preto používa obecnú dynamickú krivku $C_P(\lambda)$ pre všeobecnú vrtulovú turbínu. Koefficienty zvolenej krivky výkonového koeficientu sú: $c_x = 0,001$; $c_1 = 0,5$; $c_2 = 66$; $c_5 = 4$; $c_6 = 12,82$; $\psi = 0,035$. Do modelu rotora je implementovaná úpravou modelu zobrazenou na Obr. 2.8. Takto upravený model je pripravený na jej presné nastavenie .

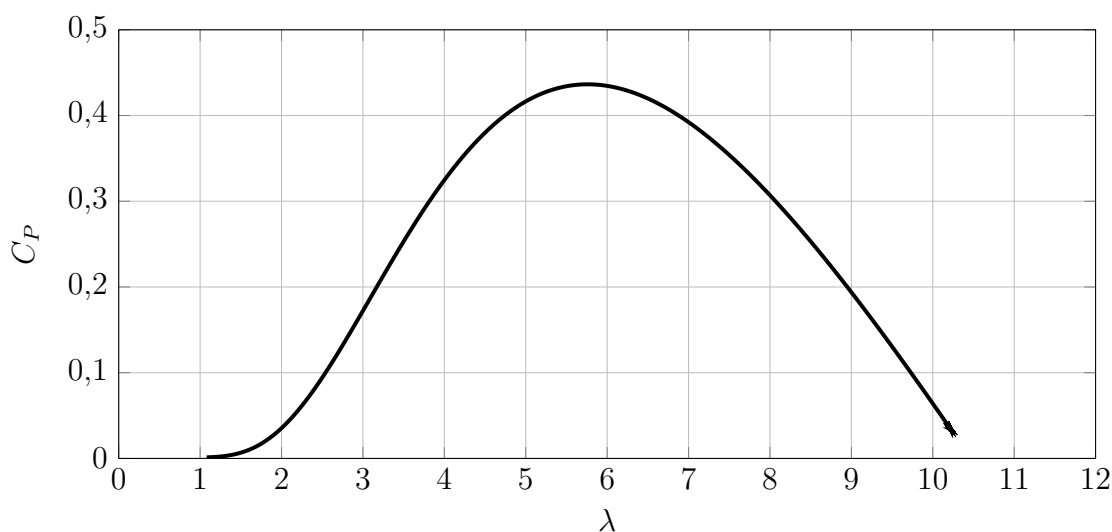
Charakteristiku tohto modelu turbíny je možné najlepšie popísať pri konštantnej rýchlosti vetra, je zobrazená na Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Charakteristika rozbehu modelu s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$ pri konštantnej rýchlosti vetra $v_w = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Z charakteristiky rozbehu modelu pri konštantnej rýchlosti vetra $v_w = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 3.7) je zrejme, že model sa začína rozbiehať integráciou od uhlovej rýchlosti $\omega_{\text{start}} = 8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Je to z dôvodu nutného nastavenia počiatkovej hodnoty uhlovej rýchlosti ω_{start} do integrátora. Tá je závislá od vstupnej rýchlosti vetra. Vo všeobecnosti musí dosahovať takú veľkosť, pri ktorej je funkcia $C_P(\lambda) > 0$. Táto vlastnosť čiastočne skresľuje charakteristiku prvého rozbehu na ustálenú uhlovú rýchlosť. Je však vidieť, že aj napriek nastaveniu počiatkovej uhlovej rýchlosti začína táto narastať až približne od 10-tej sekundy, čo je dané tvarom krivky $C_P(\lambda)$. V skutočnosti, pri reálnej turbíne, môžeme predpokladať podobnú charakteristiku rozbehu zo zastaveného stavu. Táto vlastnosť turbín je daná ich konštrukčnými vlastnosťami, najmä tvarom listov.

Simuláciou pri konštantnej rýchlosti vetra s dostatočne veľkým odporom záťaže¹⁷ je možné získať krivku $C_P(\lambda)$, ktorá bola nastavená v maske modelu. Vynesением závislosti výkonového koeficientu C_P na rýchlobežnosti λ dostaneme jej charakteristiku zobrazenú na Obr. 3.8. Z nej je zrejme, že turbína dosahuje najväčšiu hodnotu výkonového koeficientu pri rýchlobežnosti $\lambda \approx 5,7$.



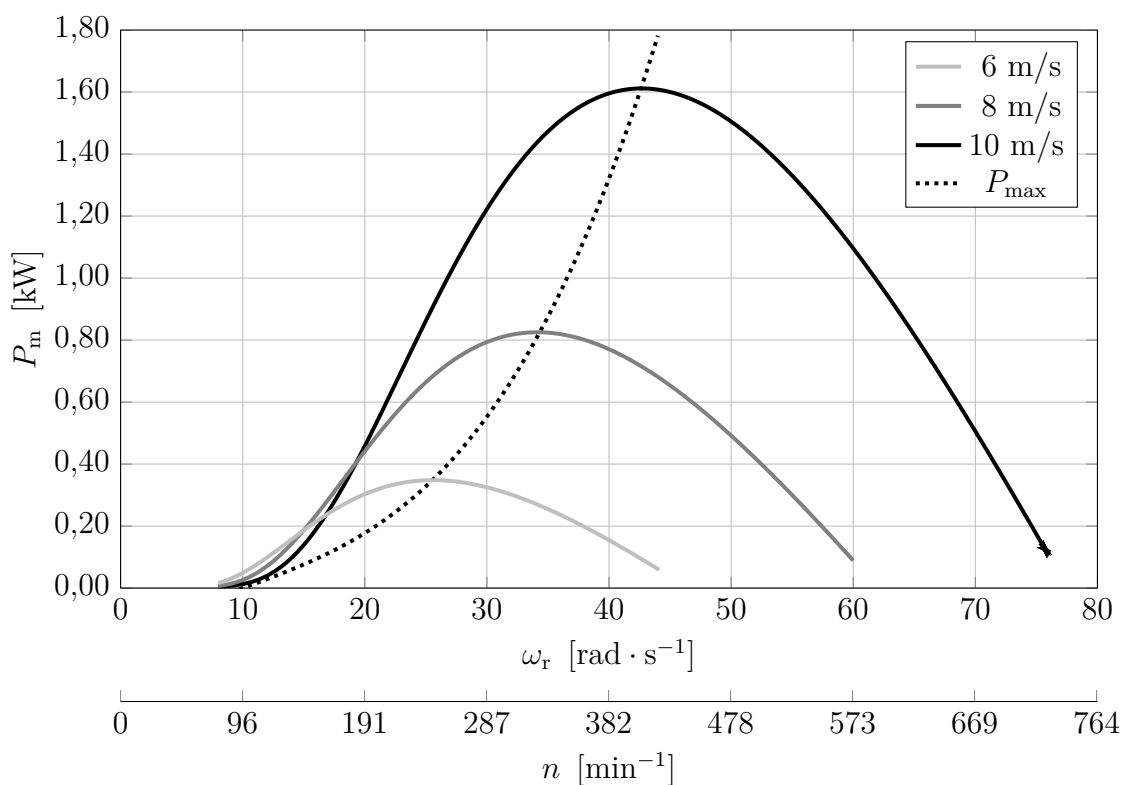
Obr. 3.8: Namodelovaná charakteristika výkonovej krivky

Ďalej na Obr. 3.7 vidíme prekmit mechanického výkonu pri rozbehu. Keďže turbína sa rozbieha a nastavený odpor záťaže pri tejto simulácii je pomerne veľký ($R_z = 100 \Omega$), nie je mechanický moment turbíny dostatočne brzdený momentom generátora. To má za následok rýchly nárast a následný pokles výkonu. Zároveň s oneskorením daným momentom zotrvačnosti agregátu J_a je viditeľný nárast uhlovej rýchlosti rotora turbíny. Spolu s ňou narastá elektrický výkon.

¹⁷Nekonečne malý odpor pôsobí ako spojenie svoriek statora nakrátko a tým turbínu brzdí. Naopak, nekonečne veľký odpor predstavuje generátor naprázdno a tým turbínu urýchľuje.

Vynesením závislosti $P_m(\omega_r)$ zo simulácií pre rôzne rýchlosti vetra bola skonstruovaná charakteristika mechanického výkonu turbíny v závislosti na otáčkach zobrazená na Obr. 3.9. Z charakteristík zobrazených na tomto obrázku je zrejmé, že turbína dosahuje maximálny výkon pri danej rýchlosti vetra len pre jednu hodnotu uhlovej rýchlosti, respektíve otáčok. Pribeh maximálneho výkonu turbíny pri ideálnych otáčkach je zvýraznený bodkovanou krivkou P_{\max} .

Úlohou regulácie vrtulových turbín je udržiavať turbínu blízko pri ideálnych otáčkach. To je v našom prípade, pri turbíne bez možnosti natáčania listov, možné dosiahnuť zmenou odporu záťaže pomocou MPPT regulátora.



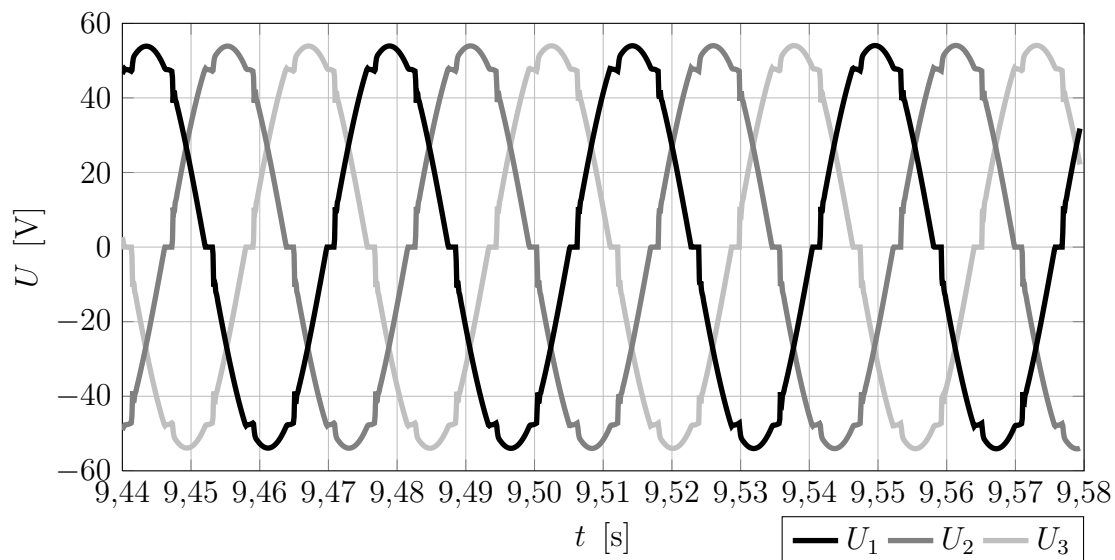
Obr. 3.9: Charakteristika závislosti $P_m(\omega_r)$ pri konštantnej rýchlosti vetra

Model turbíny s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$ môže byť na rozdiel od modelu s takzvanou statickou krivkou, ktorá je nastavená z nameraných ustálených hodnôt, použitý na následné výskumné projekty zaoberajúce sa reguláciou tejto turbíny zmenou odporu záťaže pomocou MPPT regulátora¹⁸. A to z dôvodu, že tento model počíta s dynamickou závislosťou výkonového koeficienta turbíny C_P na uhlovej rýchlosti rotora turbíny a rýchlosti vetra.

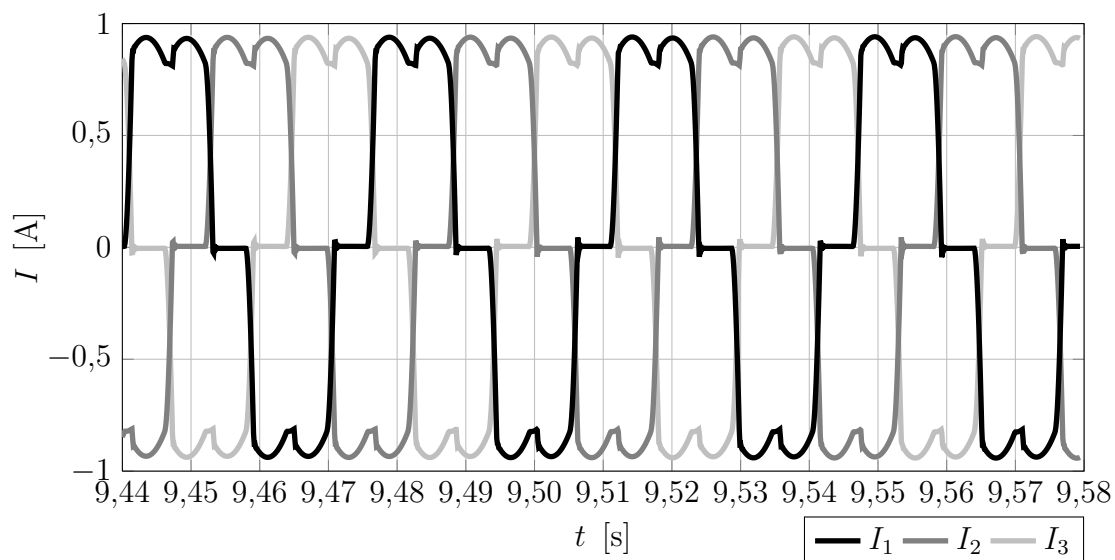
¹⁸ Vstupom pre regulátor môžu byť napríklad hodnoty mechanickej uhlovej rýchlosti rotora, alebo frekvencie napätia a rýchlost vetra.

3.3 Priebehy napätí a prúdov

Na výstupe z modelu PMSG je zobraziteľný priebeh napätí a prúdov. Na ilustráciu výstupu slúži vzorka priebehov dát zobrazená na Obr. 3.10. Tento priebeh napätí a prúdov bol simulovaný pri $v_w = 3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a odpore záťaže $R_z = 52 \Omega$. Počas zobrazenia dát mal rotor turbíny uhlovú rýchlosť $\omega_r = 35,63 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.



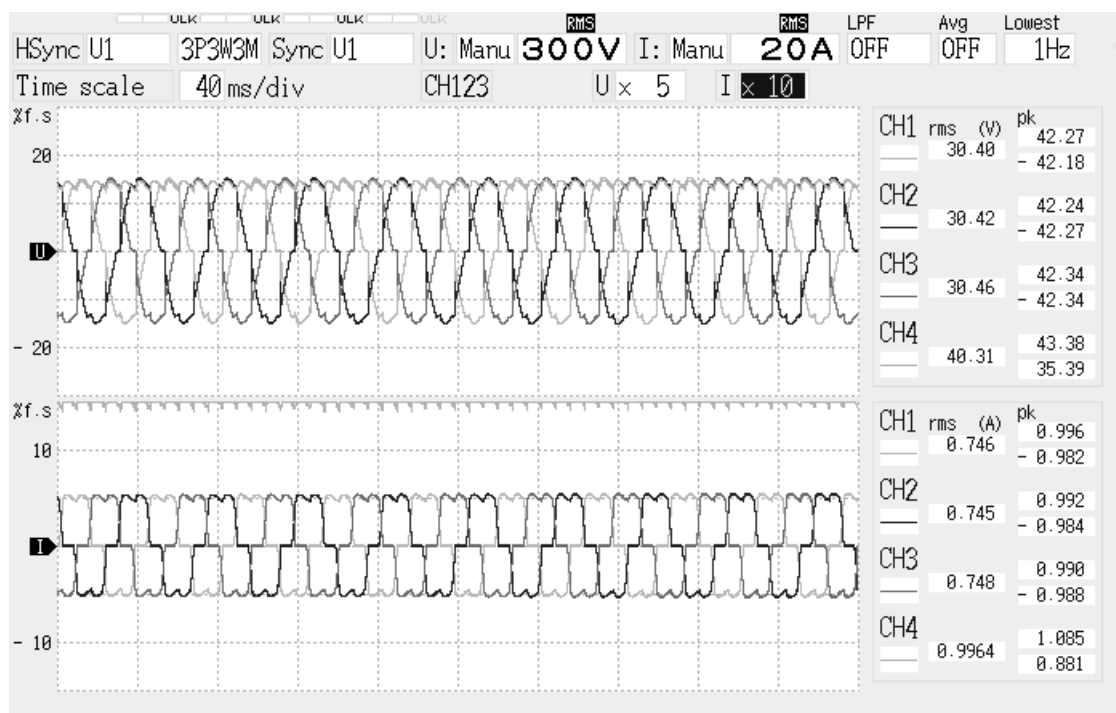
Priebehy združených napätí



Priebehy fázových prúdov

Obr. 3.10: Priebehy napätí a prúdov z modelu PMSG

Priebehy napätí a prúdov môžeme porovnať s nameranými priebehmi zobrazenými na Obr. 3.11 s konštatovaním, že ich tvar je zhodný. Z nameraných priebehov je zrejmé, že perióda napätí $S_u \approx 43 \text{ ms}$, čo zodpovedá mechanickej uhlovej rýchlosti rotora $\omega_r = 29,21 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 3.11: Zmerané priebehy združených napätí a fázových prúdov

Veľkosť simulovaných a zmeraných špičkových napätí sa v tomto prípade líši. Vzhľadom k rôznej perióde nameraných a simulovaných priebehov napätí sa uhlové rýchlosti rotora v týchto dvoch prípadoch líšia o $\Delta\omega_r = 6,42 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Podľa teoretických predpokladov potvrdených meraním napätovej konštanty¹⁹ generátora je jeho vnútorné indukované napätie závislé od mechanickej uhlovej rýchlosti rotora ω_r . Tento rozdiel nameraných a simulovaných priebehov môže byť zapríčinený meraním počas prechodového stavu - rozbehu, alebo spomalenia turbíny.

Zo známej efektívnej hodnoty fázového prúdu, fázovej hodnoty nameraného napätia na záťaži a známej impedancie statorového vinutia je možné spočítať vnútorné indukované napätie generátora pri danej uhlovej rýchlosti. Riešením obecného náhradného obvodu vinutia synchronného generátora podľa variácie fázového diagramu zobrazeného na Obr. 2.13 dostaneme efektívnu hodnotu vnútorného indukovaného napätia generátora $E_{g,RMS} = 19,15 \text{ V}$. Následne vydelením mechanicou uhlovou rýchlosťou získame pre overenie veľkosť napätovej konštanty, ktorá je podľa výpočtu $K_{pm} = 0,6556 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$. Ak by bola teda uhlová rýchlosť rotora rovnaká, ako počas simulácie, vnútorné indukované napätie by bolo rovné $E_{g,RMS} = 23,35 \text{ V}$.

Obdobným postupom zistíme vnútorné indukované napätie generátora počas simulácie, ktoré je $E_{g,RMS} = 23,935 \text{ V}$. Vidíme, že tieto hodnoty $E_{g,RMS}$ sú si podobné.

Touto analýzou bola potvrdená presnosť nastavenia parametrov statorového vinutia a napätovej konštanty v modeli generátora.

¹⁹ Pozri časť 2.3.2.

4 NÁVRHY NA ROZŠÍRENIE MODELU

Súčasný model pracuje s určitými zjednodušujúcimi predpokladmi, ktoré zapríčiňujú jeho čiastočnú nepresnosť. Medzi ne sa radí napríklad empirické určenie momentu zotrvačnosti. Jeho presné určenie je kľúčovou časťou dynamického modelu, keďže dynamické vlastnosti turbíny priamo ovplyvňuje.

Statický model, nastavený podľa nameraných parametrov, pracuje s výkonovou krivkou $C_P(\lambda)$ skonštruovanou z ustálených výkonov pri danej rýchlosti vetra.

Dynamický model, ktorý je popísaný v časti 3.2, pracuje s všeobecnou dynamickou krivkou výkonového koeficientu $C_P(\lambda)$ platnou pre veterné motory. Presné určenie dynamickej krivky $C_P(\lambda)$ pomocou navrhovanej metódy v časti 4.2, by vnieslo do tohto modelu presnú dynamickú charakteristiku turbíny WHISPER 200. Tento model by bolo potom možné použiť na modelovanie jej dynamických vlastností.

Tieto návrhy spolu s navrhovaným spôsobom spolupráce modelu v hybridnom systéme sú diskutované v nasledujúcich podkapitolách.

4.1 Návrh postupu pre experimentálne určenie momentu zotrvačnosti

Pri odvodzovaní experimentálnej metódy určenia momentu zotrvačnosti predpokladáme, že je známa dynamická závislosť výkonového koeficientu $C_P(\lambda)$.

Budeme vychádzať z podmienky rovnosti momentov. Dosadením rovnice (2.14) do rov. (2.3), vyznačením veličín, ktoré sú závislé od času a použitím substitúcie $R = X_d / \tan \delta$, dostaneme:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_a} \left(\frac{1}{2} \frac{\rho C_P(t) v_w^3(t) A_r}{\omega_r(t)} - \frac{3I_g^2(t) R(t)}{\omega_r(t)} \right), \quad (4.1)$$

kde $R(t)$ je vo všeobecnosti časovo premenná celková rezistencia náhradného obvodu statora a pripojenej záťaže, t.j. súčet rezistancie jednej fázy statorového vinutia R_s a jednej fázy záťaže R_z . Separáciou premenných ω_r a t v rov. (4.1) dostaneme

$$d\omega_r = \frac{1}{J_a} \left(\frac{1}{2} \frac{\rho C_P(t) v_w^3(t) A_r}{\omega_r(t)} - \frac{3I_g^2(t) R(t)}{\omega_r(t)} \right) dt. \quad (4.2)$$

Integrovaním cez k sekúnd dlhý časový interval $\langle 0; t_k \rangle$ dostaneme:

$$\int_{\omega_r(t_0)}^{\omega_r(t_k)} \omega_r(t) d\omega_r = \frac{1}{J_a} \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{1}{2} \rho C_P(t) v_w^3(t) A_r - 3I_g^2(t) R(t) \right) dt. \quad (4.3)$$

Po vyriešení integrálu na ľavej strane a vyjadrení hľadaného J_a potom dostaneme:

$$J_a = \frac{2}{\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)} \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{1}{2} \rho C_P(t) v_w^3(t) A_r - 3I_g^2(t) R(t) \right) dt. \quad (4.4)$$

Pre kontrolu môžeme vzťah (4.4) nájsť aj odvodením zo zákona zachovania energie. Zmena kinetickej energie rotujúceho agregátu veternej turbíny v časovom intervale $\langle t_0; t_k \rangle$ je rovná bilancii výkonov pôsobiacich na tento agregát:

$$\Delta E_k = \int_{t_0}^{t_k} P(t) dt. \quad (4.5)$$

Pre kinetickú energiu rotujúceho agregátu platí:

$$E_k = \int_m dE_k = \int_m \frac{1}{2} v_{\text{rot}}^2(m) dm = \int_m \frac{1}{2} [\omega_r r(m)]^2 dm = \frac{1}{2} \omega_r^2 \int_m r^2(m) dm, \quad (4.6)$$

kde v_{rot} je obvodová rýchlosť jednotlivých hmotnostných elementov dm ktoré majú od osi rotácie kolmú vzdialenosť $r(m)$. Posledný integrál je rovný momentu zotrvačnosti agregátu:

$$\int_m r^2(m) dm = J_a. \quad (4.7)$$

Konečne, pre kinetickú energiu rotujúceho agregátu veternej turbíny platí:

$$E_k = \frac{1}{2} J_a \omega_r^2, \quad (4.8)$$

a pre jej zmenu medzi t_0 a t_k dostaneme:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J_a (\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)). \quad (4.9)$$

Dosadením rovnice (4.9) do rovnice (4.5) a vyjadrením výkonu ako rozdielu mechanického príkonu dodávaného pôsobením vetra a elektrického činného výkonu vyrábaného generátorom dostaneme

$$\frac{1}{2} J_a (\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)) = \int_{t_0}^{t_k} (P_m(t) - P_e(t)) dt. \quad (4.10)$$

Výkony na pravej strane rovnice rozpíšeme nasledovne:

$$\frac{1}{2} J_a (\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)) = \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{1}{2} \rho C_P(t) v_w^3(t) A_r - 3R(t) I_g^2(t) \right) dt, \quad (4.11)$$

kde $R(t)$ má rovnaký význam ako v rov. (4.1). Konečne, po vyjadrení hľadaného momentu zotrvačnosti agregátu J_a dostaneme vzťah

$$J_a = \frac{2}{\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)} \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{1}{2} \rho C_P(t) v_w^3(t) A_r - 3R(t) I_g^2(t) \right) dt. \quad (4.12)$$

Možno konštatovať, že pri využití rovnosti momentov v rov. (4.4), ako aj zákona zachovania energie v rov. (4.12) sme dospeli k totožným vzťahom pre hľadaný moment zotrvačnosti J_a .

Z rov. (4.12) vyplýva, že určenie momentu zotrvačnosti agregátu J_a môžeme značne zjednodušiť pri meraní naprázdno, kde $I_g = 0$ A. Dostaneme nasledovný vzťah:

$$J_a = \frac{\rho A_r}{\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)} \int_{t_0}^{t_k} C_P(t) v_w^3(t) dt. \quad (4.13)$$

Pri praktickom meraní nebudú časové funkcie $C_P(t)$ a $v_w(t)$ merané kontinuálne, ale iba v diskretných časových okamihoch v intervale $t \in \langle t_0; t_k \rangle$ so vzájomnými rozstupmi Δt . Integrovanie v rov. (4.13) môžeme zmeniť na sumáciu cez nekonečne malé intervaly Δt .

$$J_a = \frac{\rho A_r}{\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{k-1} C_P(t_i) v_w^3(t_i) \Delta t. \quad (4.14)$$

V našom prípade nadobúda Δt len konečne malých hodnôt. Približne teda platí:

$$J_a \approx \frac{\rho A_r}{\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)} \sum_{i=0}^{k-1} C_P(t_i) v_w^3(t_i) \Delta t, \quad (4.15)$$

pričom t_i sú diskretizované časové okamihy, z ktorých máme dáta z meraní.

Pri meraní experimentu naprázdno, je dôležité odčítavať frekvenciu indukovaného napätia, z ktorej je následne možné určiť uhlovú rýchlosť rotora.

Hodnotu časovej funkcie $C_P(t_i)$ potom určíme z jej charakteristiky $C_P(\lambda)$ pre zmeranú uhlovú rýchlosť ω_r a rýchlosť vetra v_w v danom časovom intervale. Tá by mala byť počas experimentu menšia, ideálne v rozsahu 3 až $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aby sa turbína bez záťaže príliš rýchlo neroztočila na limitné otáčky. Rýchlosť vetra je nutné odčítavať s čo najjemnejším vzorkovaním.

Natočenie turbíny do smeru prúdenia vetra musí byť počas experimentu konštantné.

4.2 Meranie krivky výkonového koeficientu

Meranie dynamickej výkonovej krivky naráža na problém súčasných možnosti získania dát popísaných v kapitole 4.3.

Určenie dynamickej výkonovej krivky $C_P(\lambda)$ je podmienené nutnou znalosťou momentu zotrvačnosti J_a . Experimentálne určenie momentu zotrvačnosti si však vyžaduje znalosť funkcie $C_P(\lambda)$, z toho vyplýva, že tieto dva experimenty sú navzájom na sebe závislé a nie je možné bez znalosti momentu zotrvačnosti J_a zistiť priebeh krivky $C_P(\lambda)$.

Moment zotrvačnosti je teda potrebné určiť modelovaním pomocou niektorého z radu programov využívajúcich metódu konečných prvkov a následne postupnými iteračnými krokmi najprv určiť závislosť krivky $C_P(\lambda)$ pri vypočítanom momente zotrvačnosti J_a . Potom je pomocou nižšie popísaného experimentu možné určiť jeho presnejšiu hodnotu. Následne je nutné znova prepočítať krivku $C_P(\lambda)$ s novou, experimentálne určenou hodnotou momentu zotrvačnosti J_a . Tento postup je potrebné zopakovať niekoľko krát až do bodu, kedy bude rozdiel v $i+1$ kroku iterácie približne rovnaký ako v kroku i -tom.

Pri meraní so záťažou platí:

$$\frac{1}{2}J_a(\omega_r^2(t_k) - \omega_r^2(t_0)) \approx \sum_{i=0}^{k-1} \left(\frac{1}{2}\rho A_r C_P(v_w(t_i), \omega_r(t_i)) v_w^3(t_i) - 3R(t_i) I_g^2(t_i) \right) \Delta t. \quad (4.16)$$

Pre konkrétny časový interval $\langle t_j; t_{j+1} \rangle$ o dĺžke Δt potom odvodíme:

$$\frac{1}{2}J_a(\omega_r^2(t_{j+1}) - \omega_r^2(t_j)) \approx \left(\frac{1}{2}\rho A_r C_P(v_w(t_j), \omega_r(t_j)) v_w^3(t_j) - 3R(t_j) I_g^2(t_j) \right) \Delta t. \quad (4.17)$$

Preskupením predchádzajúcej rovnice môžeme jednoducho vyjadriť:

$$C_P(v_w(t_j), \omega_r(t_j)) \approx \frac{\frac{1}{2}J_a(\omega_r^2(t_{j+1}) - \omega_r^2(t_j)) + 3R(t_j) I_g^2(t_j) \Delta t}{\frac{1}{2}\rho A_r v_w^3(t_j) \Delta t}. \quad (4.18)$$

Vidíme, že výkonový koeficient v danom časovom okamihu predstavuje pomer energie využitej na urýchlenie rotujúcich hmôt turbíny a činné straty na rezistanciách ku kinetickej energii veterného stĺpca, ktorý počas daného časového intervalu $\langle t_j; t_{j+1} \rangle$ o dĺžke Δt prešiel plochou A_r vymedzenou rotujúcimi listami turbíny, čo je v súlade so vzťahom (1.14) a teda aj s našim predpokladom o jeho význame.

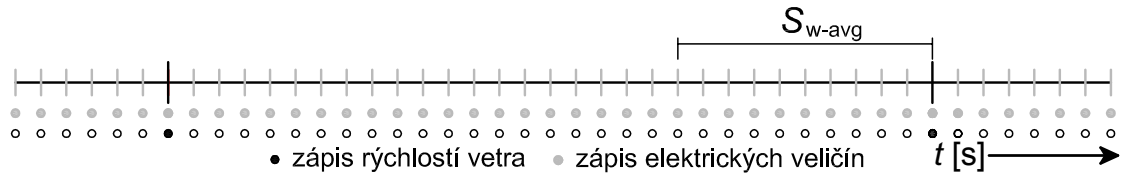
Pri meraní naprázdno sa vzťah zjednoduší:

$$C_P(v_w(t_j), \omega_r(t_j)) \approx \frac{\frac{1}{2}J_a(\omega_r^2(t_{j+1}) - \omega_r^2(t_j))}{\frac{1}{2}\rho A_r v_w^3(t_j) \Delta t}, \quad (4.19)$$

kde mechanická uhlová rýchlosť ω_r sa určí z frekvencie napätia naprázdno.

4.3 Spresnenie meraní

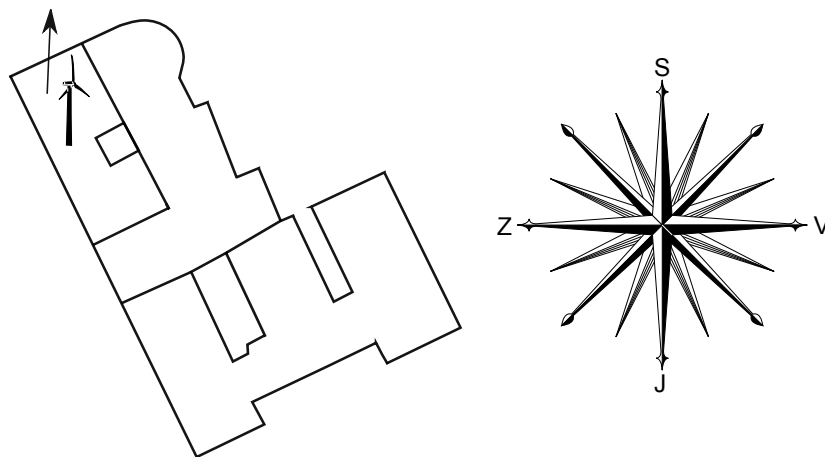
Súčasný hardvérový vybavenie laboratória umožňuje dosiahnuť len určitú presnosť merania výkonových charakteristík turbíny. Zlepšenie postupu merania experimentu by spresnilo dosiahnuté výsledky, z ktorých bola nastavovaná charakteristika turbíny. Spôsob zaznamenávania veličín počas experimentu je naznačený na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Časová os zápisu dát

Elektrické veličiny boli zaznamenávané so vzornovaním $S_m = 1$ s. Rýchlosť vetra bola zaznamenávaná každých $S_w = 30$ s na výstupe z anemometra pomocou pripojeného PLC. Táto rýchlosť je priemerom rýchlostí vetra z posledných desiatich sekúnd pred zápisom, teda z intervalu S_{w-avg} , naznačenom na predchádzajúcom obrázku.

Počas merania experimentu sa zistilo, že na inštalovanom PLC nie je možné ponechať dlhodobo spustené jemnejšie vzorkovanie z dôvodu naplnenia vnútorných pamätí a následného zrútenia systému. Taktiež použitý anemometer nedosahuje dostatočnú odozvu vzorkovania pre dané experimenty. Na spresnenie merania by bolo vhodné použiť anemometer s jemnejším vzorkovaním, ideálne rovnakým, v akom sú zapisované hodnoty elektrických veličín.



Obr. 4.2: Smer fixácie turbíny

Z nameraných dát podľa tabuľky 2-4 je zrejmé, že najväčšie výkony boli dosahované majoritne zo smerov severo-severo-západ až severo-severo-východ.

Je to z dôvodu, že v inštalovanej výške z tohto smeru nemá vietor mnoho prekážok, ktoré by musel prekonať. Preto je aj tvorba turbulentného prúdenia menej pravdepodobná, ako pri prúdení vetra z iných smerov.

Pre spresnenie ďalších meraní by bolo preto vhodné turbínu zafixovať do jedného smeru (Obr. 4.2) pomocou konzoly a následne, pri spracovaní dát, pracovať len s orientáciou prúdenia vetra blízko tomuto smeru. Týmto opatrením sa eliminujú prechodové javy pri natáčaní turbíny a vzorka nameraných dát sa tak značne očistí. Po tejto úprave si však meranie vyžaduje väčší časový interval, preto je nutné na zapisovanie dát použiť hardvér s väčšou pamäťou.

4.4 Spolupráca modelu v hybridnom systéme

Spolupráca s ďalšími energetickými modelmi môže byť realizovaná niekoľkými možnými variantami. K realizácii je však najvýhodnejšie postupovať cestou najmenšej výpočtovej náročnosti. Model veternej turbíny pracuje s vzorkovaním $S_{vz} = 1 \cdot 10^{-5}$ s. Toto jemné vzorkovanie je nutné z dôvodu správnej funkcie bloku synchronného generátora, ktorý pri hrubšom vzorkovaní značne skresluje výstupné priebehy napätí a prúdov. Jemné vzorkovanie však zvyšuje výpočtovú náročnosť modelu.

Z dôvodu pomerne veľkej výpočtovej náročnosti samotného modelu veternej turbíny je export dát do pracovného prostredia programu MATLAB-SIMULINK, alebo do súboru najvhodnejšou variantou. Odpadá taktiež nutnosť korigovať vzájomnú funkčnosť jednotlivých blokov z modelu veternej turbíny a blokov z pripojeného modelu.

Pri exporte dát je možné nastaviť aj požadované vzorkovanie, ktoré sa nastavuje priamo v blokoch `To workspace`, alebo `To file`. Výstupné parametre z modelu (pozri Obr. D.1 v prílohe), ktoré je možné použiť v ďalších energetických blokoch sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 4-1: Výstupné parametre

$U_{f,RMS}$	$I_{f,RMS}$	P_{AC}	U_{DC}	I_{DC}	P_{DC}	P_m
U_{abc}	I_{abc}	v_{avg}	Wind	ω_r	λ	C_P

Exportované dáta je následne možné načítať v hybridnom modeli pomocou blokov `From workspace` a `From file` z knižnic prostredia. Pri načítavaní dát v hybridnom modeli je potom nutné nastaviť rovnaké vzorkovanie ako pri exportovaní dát.

ZÁVER

Účelom tejto práce bolo vytvoriť matematický model vrtulovej veternej turbíny WHISPER 200 inštalovanej na Ústave elektroenergetiky, FEKT VUT.

Potrebným teoretickým podkladom k zostaveniu modelu je venovaná prvá kapitola, v ktorej je diskutovaná všeobecná teória platná pre vrtulové turbíny. Teoretické poznatky v nej uvedené sú následne aplikované pri zostavovaní matematického modelu celého agregátu, ktorému je venovaná nasledujúca kapitola. V nej je diskutované funkčné riešenie jednotlivých blokov. Zároveň obsahuje vyhodnotenú merania na reálnej turbíne, podľa ktorých bol model agregátu nastavený.

Ako prvý bol vytvorený model s tzv. **statickou krivkou výkonového koeficientu**, ktorá je zostavená z ustálených hodnôt výkonov meraných na odpore záťaže, ktorú nastavoval MPPT regulátor. Ten vniesol do nameraných dát charakteristiku regulácie. To znamená, že nastavovaním odporu záťaže v tomto modeli aproximujeme charakteristiku regulátora, avšak bez jeho dynamickej odozvy na hodnotu otáčok turbíny pri prechodových javoch - rozbeh, alebo spomalenie turbíny.

Tento model môže byť použitý napríklad na bilančné výpočty niekoľkých charakteristík, a to napríklad aký výkon, otáčky alebo napätie môžeme od celého agregátu očakávať pri danej rýchlosti vetra. Porovnaním simulovaných závislostí výkonu, mechanickej uhlovej rýchlosti, napätí a prúdov s nameranými hodnotami bola overená dostatočná presnosť nastavenia tohto modelu.

Jednoduchou úpravou tohto modelu bol vytvorený **dynamický model**, v ktorom je nastavená všeobecná dynamická krivka výkonových koeficientov $C_P(\lambda)$ platná pre vrtulové turbíny. Tá zohľadňuje jeho závislosť na aktuálnej uhlovej rýchlosti pri danej rýchlosti vetra. Model je zároveň pripravený na jej presné nastavenie. Funkčnosť tohto modelu bola overená v navrhnutom experimente.

Posledná kapitola tejto práce je venovaná návrhom na rozšírenie modelu. Sú v nej popísané všetky nevyhnutné opatrenia na zlepšenie funkčnosti dynamických simulácií, ako je návrh postupu pre experimentálne určenie momentu zotrvačnosti a dynamickej krivky výkonového koeficientu.

Vytvorené modely ďalej poskytujú niekoľko možností výskumu, za všetky spomeniem aspoň dve.

Po prvé, nadviazať na presne nastavený dynamický model môžu výskumné projekty zaoberajúce sa návrhom regulácie výkonu turbíny pomocou zmeny záťaže MPPT regulátorom.

Druhým rozšírením môže byť práve možnosť spolupráce s ďalšími energetickými modelmi. Tu môže byť využitý či už statický model na bilančné výpočty, alebo dynamický model pre výskum správania sa hybridného systému pri prechodových javoch.

LITERATÚRA

- [1] JOHNSON, G.L. *Wind Energy Systems*. E-Book, Manhattan 2006.
- [2] HAU, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2nd. Edition. Berlin: Springer, 2006. ISBN 3-540-24240-6.
- [3] SCHAFFARCZYK, A.P. *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Berlin: Springer, 2014. ISBN 978-3-642-36408-2.
- [4] SATHYAJITH, M. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Berlin: Springer, 2006. ISBN 3-540-30905-5.
- [5] MANWELL, J.F., MCGOWAN, J.G., ROGERS, A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2nd. Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2009. ISBN 978-0-470-01500-1.
- [6] WOOFENDEN, I. *Wind Power for Dummies*. Willey Publishing Inc., 2009. ISBN 978-0-470-49637-4.
- [7] PRAMOD, J. *Wind Energy Engineering*. McGraw-Hill Companies, Inc., 2011. ISBN 978-0-07-1711478-5.
- [8] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. BOSSANYI, E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons Ltd., 2011. ISBN 0-471-48997-2.
- [9] BAJER, J. *Mechanika 3*. 2. vydanie. Olomouc: Nakladatelství V.Chlup, 2012. ISBN 978-80-903958-5-5.
- [10] BHADRA, S.N., KASTHA, D., BANERJEE, S. *Wind Electrical Systems*. Oxford University Press, 2005. ISBN 978-0-19-567093-6.
- [11] TEXAS SOLAR COMPANY *Whisper 200 Datasheet*. [Online]. 2014, [cit. 5.12.2014]. Dostupné z URL: <http://www.txspc.com/PDF/whisper_100-200_spec.pdf>.
- [12] LUO, N., VIDAL, Y., ACHO, L. *Wind Turbine Control and Monitoring*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-3-319-08413-8.
- [13] HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy*. 3rd. Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2014. ISBN 978-1-119-96294-6.

- [14] TANG, C., PATHMANATHAN, M., SOONG, W.L., ERTUGRUL, N. Effects of Inertia on Dynamic Performance of Wind Turbines *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities* Sydney: IEEE, 2008. ISBN 978-0-7334-2715-2.
- [15] GINLONG *GL-PMG-1000 Datasheet*. [Online]. 2015, [cit. 8.3.2015]. Dostupné z URL: <http://www.ginlong.com/download/200908/GL-PMG-1000_Specification_Sheet.pdf>.
- [16] MELLAH, H., HEMSAS, K. E. Simulations Analysis with Comparative Study of a PMSG Performances for Small WT Application by FEM *International Journal of Energy Engineering* e-ISSN: 2163-1905. [Online]. 2015, [cit. 29.4.2015]. Dostupné z URL: <<http://article.sapub.org/10.5923.j.ijee.20130302.03.html>>.
- [17] IOV, F., HANSEN, A.D., SØRENSEN, P., BLAABJERG, F. *Wind Turbine Blockset in Matlab Simulink*. Uni.Print Aalborg University, 2004. ISBN 87-89179-46-3.

ZOZNAM PRÍLOH

A	Implementácia knižnice WTB_v3	53
B	Návod na obsluhu modelu	54
C	Masky jednotlivých blokov	55
	C.1 Maska filtra	55
	C.2 Maska bloku vetra	55
	C.3 Maska bloku rotora turbíny	56
	C.4 Maska bloku hriadeľa	57
	C.5 Maska bloku PMSG so záťažou	58
	C.6 Maska bloku PMSG	59
D	Užívateľské prostredie modelu	60
E	Programy a zdrojové kódy	61
	E.1 Program na výpočet napäťovej konštanty	61
F	Použité prístroje a software	64
	F.1 Bloková schéma merania elektrických veličín	64
G	Obsah priloženého CD	65
H	Fotodokumentácia agregátu	66

A IMPLEMENTÁCIA KNIŽNICE WTB_V3

Knižnica WIND TURBINE BLOCKSET bola vyvinutá Dánskym vysokoškolským výskumným inštitútom Risø, [17]. Nie je bežnou súčasťou programového prostredia MATLAB SIMULINK a je ju preto nutné pre správnu funkčnosť určitých častí modelu implementovať.

Na implementáciu knižnice je nutné postupovať podľa nasledovných krokov:

1. uložte priečinok <WTB_v3> z priloženého CD na disk svojho počítača, ideálne do priečinku <toolbox> v inštalačnom priečinku programu MATLAB;
2. spustte program MATLAB;
3. nastavte cestu k súboru pomocou File->Set Path;
4. stlačte tlačidlo Add with Subfolders;
5. vyberte priečinok <WTB_v3> a následne potvrdte pomocou tlačidla Ok;
6. výber uložte pomocou tlačidla Save a následne zatvorte dialógové okno pomocou tlačidla Close;
7. otvorte program SIMULINK a skontrolujte implementáciu knižnice WTB_v3.

Ak bude program MATLAB hlásiť chybu Character Encoding Function, potom je nutné do príkazového riadku zadať nasledovné príkazy v uvedenom slede:

1. `bdclose all;`
2. `set_param(0,'CharacterEncoding','windows-1250')`, pričom ďalšie možnosti kódovania textu sú ISO-8859-1, US-ASCII, UTF-8, Shift_JIS.

B NÁVOD NA OBSLUHU MODELU

Uvedený návod na obsluhu modelu stručne popisuje možnosti zmeny nastavení modelu. Masky jednotlivých blokov sú zobrazené v prílohe C. Schéma celkového užívateľského prostredia modelu je v prílohe D.

Rýchlosť prúdenia vetra sa nastavuje pomocou dvoch blokov:

- statická v bloku `Static Wind Velocity`;
- dynamická v bloku `Contineous Wind Velocity`. V tomto bloku sa nastavujú diskkrétne hodnoty rýchlosti vetra. Je dôležité dbať na rovnakú periódu vzoriek.

Následne je nutné nastaviť:

1. v bloku `Wind Averager` periódu vzoriek vetra. Zhodná perióda s nastavením v bloku `Contineous Wind Velocity` priemeruje v danom intervale, ak je menšia, priemeruje v zadanom intervale, čo má za následok strmšie zvýšenie rýchlosti vetra a jeho následnú stagnáciu;
2. v bloku `Wind Averager` počiatočnú rýchlosť vetra na začiatku simulácie;
3. v bloku `Wind Model` nastaviť parametre z tabuľky 2-2;
4. v bloku `PMSG with Load` nastaviť v maske veľkosť záťaže.

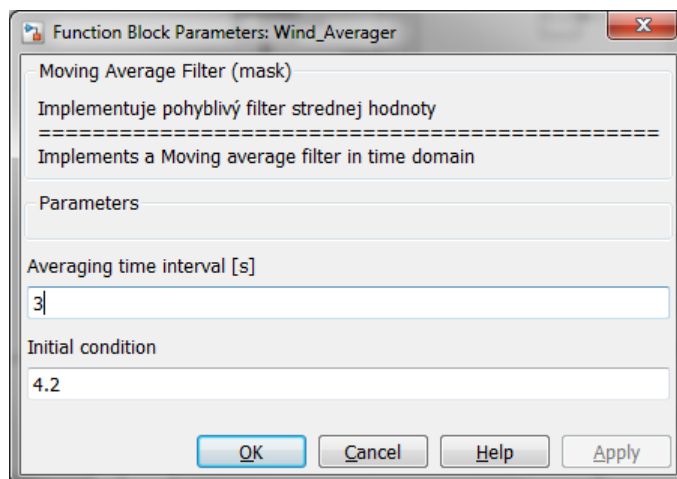
Zmenu mechanických parametrov je možné vykonať nasledovným postupom:

- v bloku `Wind Turbine` je možné pomocou koeficientov upravovať tvar krivky $C_P(\lambda)$, hustotu vzduchu a priemer rotora turbíny, pozri Obr. C.3;
- ak bol zmenený priemer rotora turbíny, je nutné nastaviť jeho novú hodnotu aj v bloku `Wind Model`;
- ak boli zmenené koeficienty krivky $C_P(\lambda)$, je nutné nastaviť nové hranice krivky vo vnútri bloku `Wind Turbine` pomocou bloku `TSR Guard`, hraničné rýchlosti vetra sa nastavujú pomocou bloku `Windspeed Guard`;
- v bloku `Shaft Model` sa nastavuje moment zotrvačnosti agregátu a štartovacia uhlová rýchlosť.

Nastavenie parametrov generátora je možné zmeniť vo vnútri bloku `PMSG with Load` pomocou bloku generátora - `PMSG`.

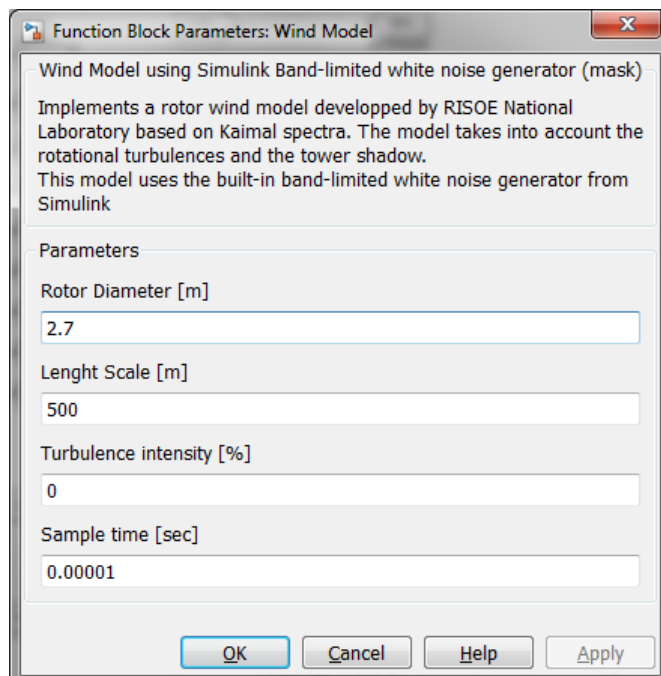
C MASKY JEDNOTLIVÝCH BLOKOV

C.1 Maska filtra



Obr. C.1: Maska bloku filtra

C.2 Maska bloku vetra



Obr. C.2: Maska bloku vetra

C.3 Maska bloku rotora turbíny

Function Block Parameters: Wind Turbine

Wind Turbine Rotor (mask)

Blok modelu rotora turbíny.
=====

Wind turbine rotor model.

Parameters

Rotor diameter
2.7

Air density
1.25

Coefficients

CX
0.08

C1
4.2

C2
96

C5
1.55

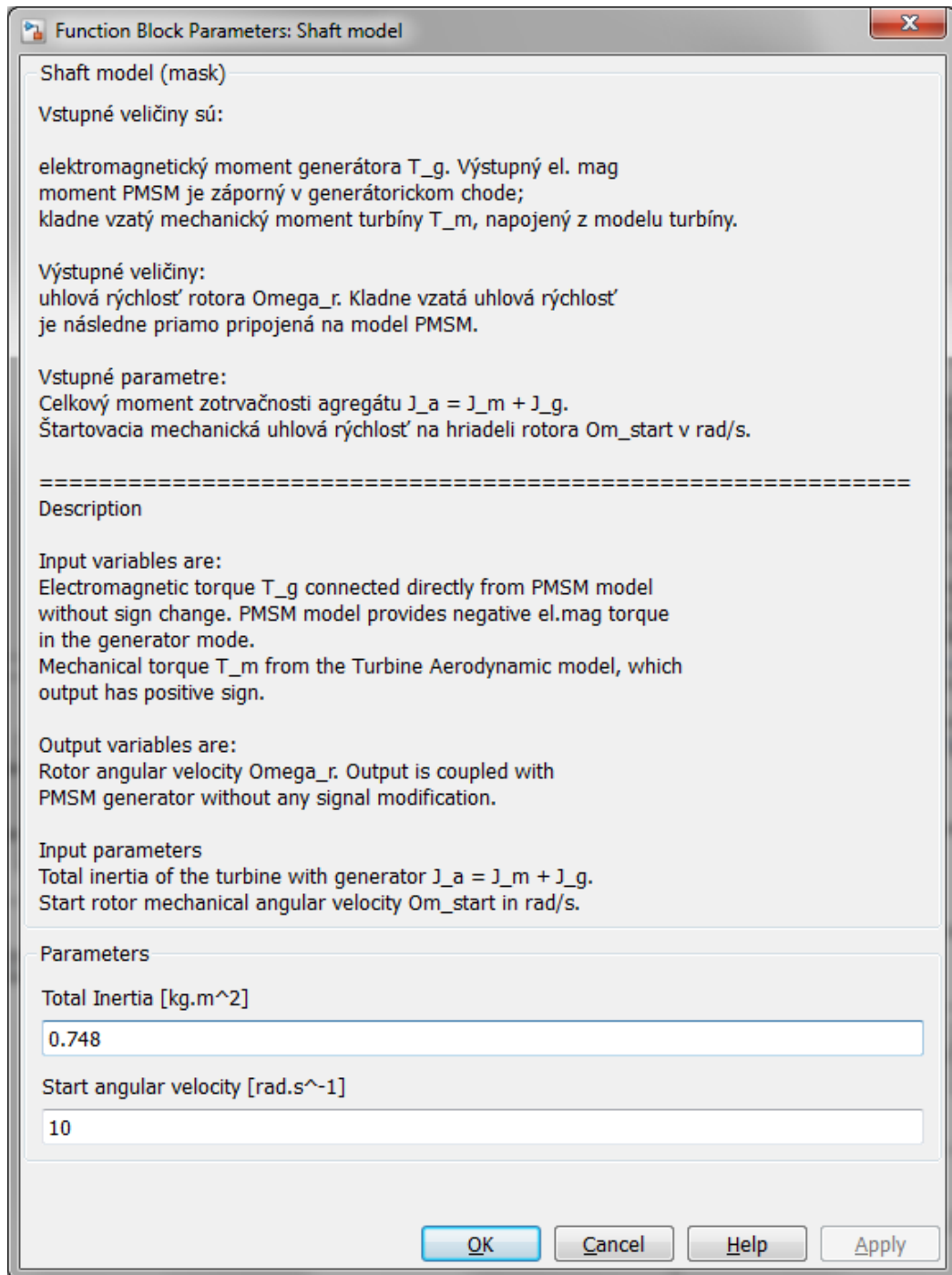
C6
81

Psi
0.05

OK Cancel Help Apply

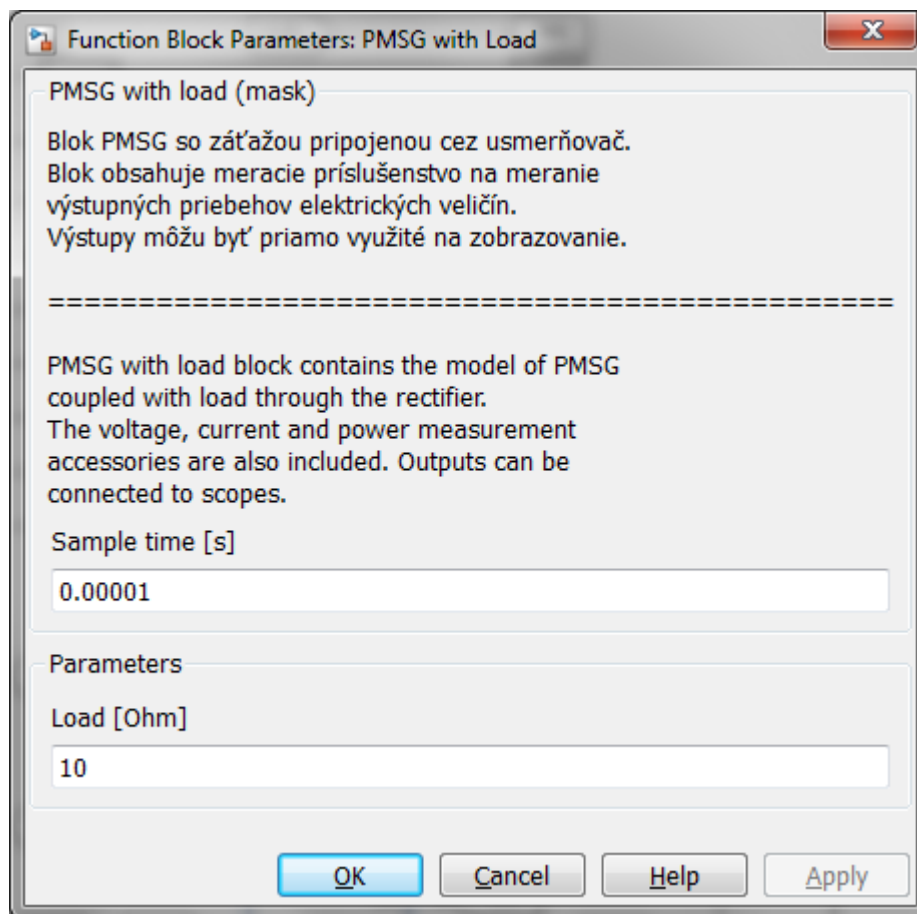
Obr. C.3: Maska bloku rotora turbíny

C.4 Maska bloku hriadeľa



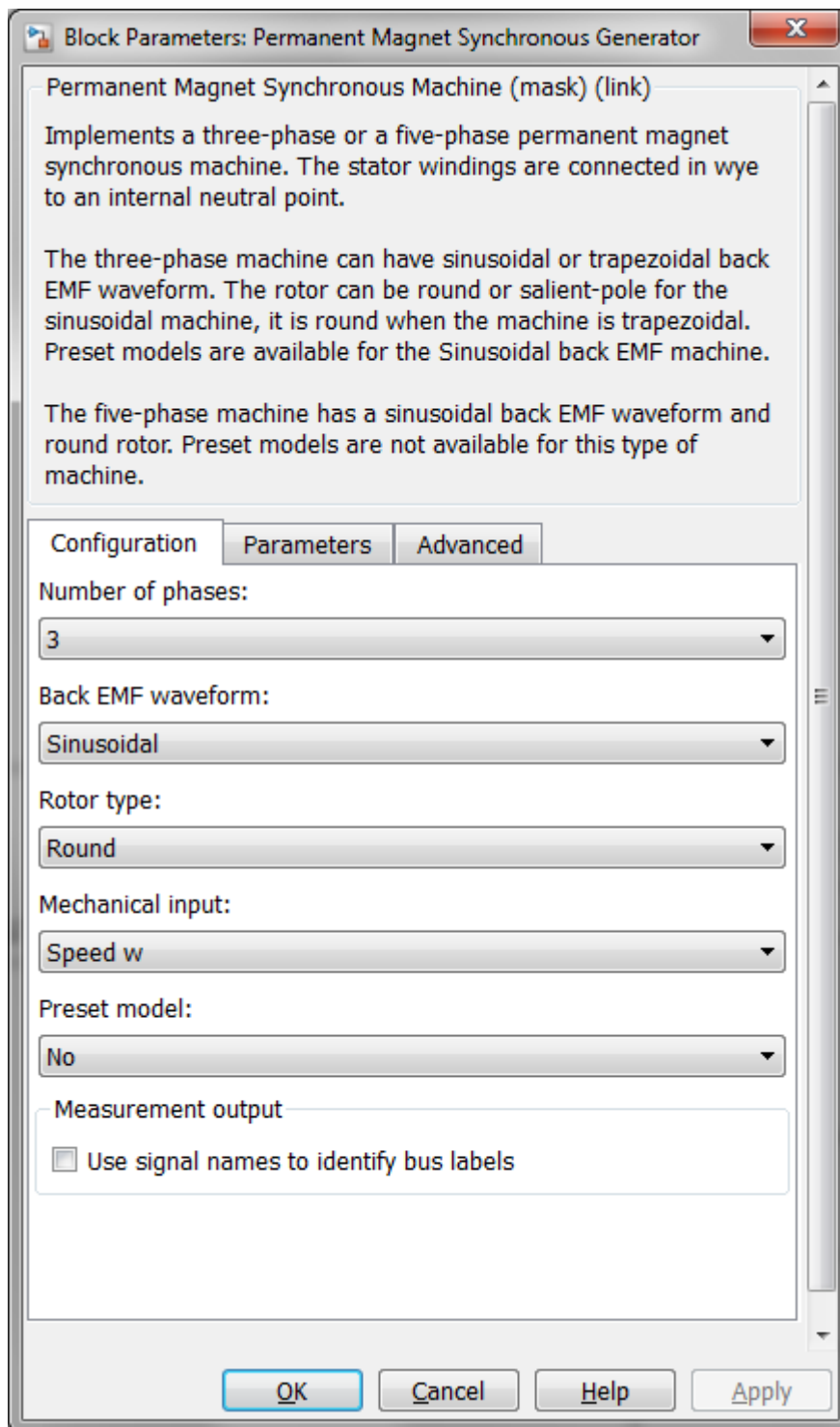
Obr. C.4: Maska bloku hriadeľa

C.5 Maska bloku PMSG so zátazou



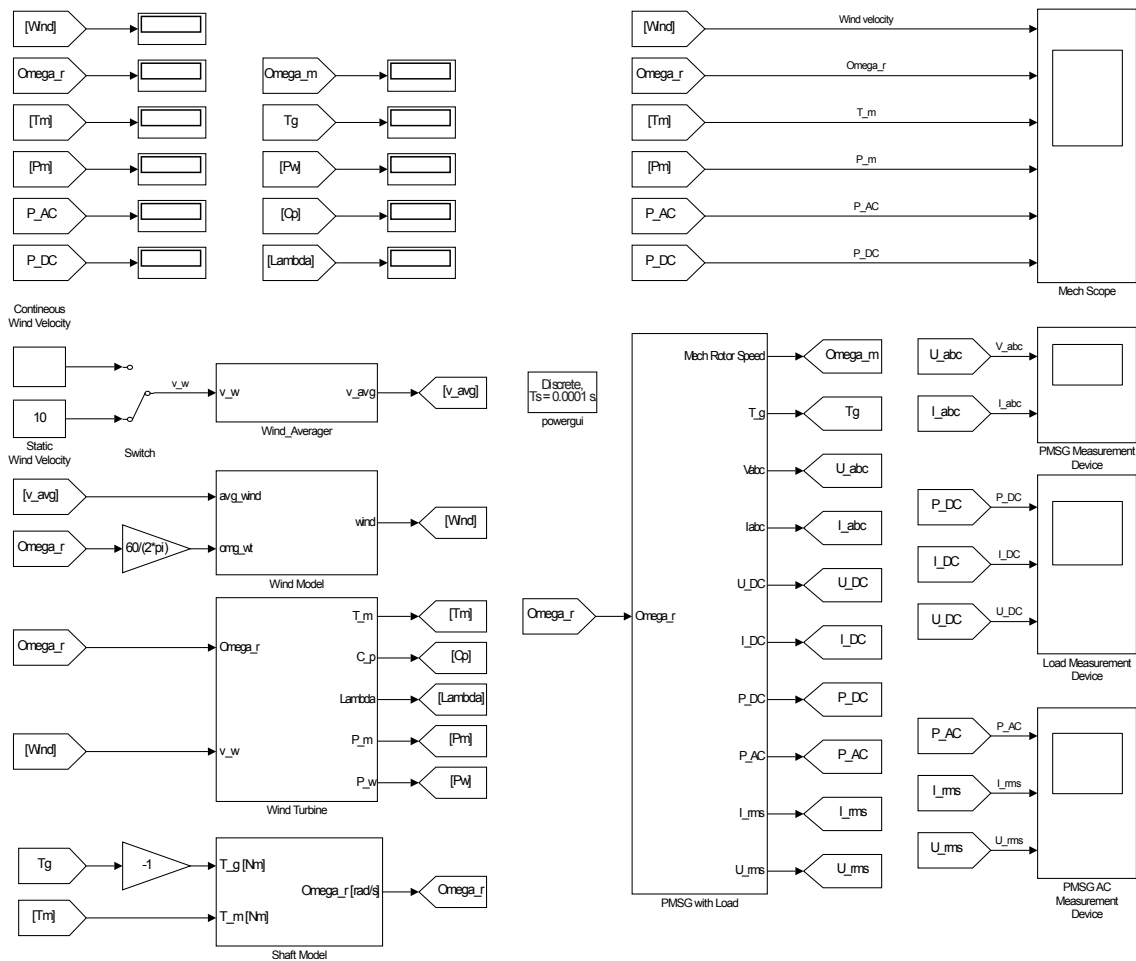
Obr. C.5: Maska bloku rotora turbíny

C.6 Maska bloku PMSG



Obr. C.6: Maska bloku PMSG

D UŽÍVATEĽSKÉ PROSTREDIE MODELU



Obr. D.1: Uživatelské prostredie modelu

E PROGRAMY A ZDROJOVÉ KÓDY

E.1 Program na výpočet napäťovej konštanty

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                               REGRESNY MODEL NAPATOVEJ KONSTANTY      %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

format long
close all
clear all
clc
% pocet polov
n_p=10;

% stupen hladaneho polynomu;
% 1 ~ regresia priamkou, 2 ~ parabolou, etc.
p = 1;

% vektor frekvencii (elektrickych)

f = [ % hodnoty frekvencie
];

% vektor uhlovych rychlosti (mechanickych)
omega = 2*pi*f*2/n_p;

% vektor vnutornych indukovanych napati naprazdno
E_0 = [ % hodnoty fazoveho napatia
        ]';

% pocet nameranych bodov
n = length(omega);

% urcenie pomocnej matice Z
% plati: (Z^T)Zc = (Z^T)E_0, kde '^T' znaci transponovanie
Z = ones(n,p+1);
```

```
for i = 1:n
    for j = 1:p+1
        Z(i,j) = omega(i)^(j-1);
    end
end
% vektor koeficientov hladaneho regresneho polynomu
% c(1) je absolutny clen, c(2) je linearny clen, etc.
c = (Z'*Z)\Z'*E_0;

% vektor funkcných hodnot regresneho modelu
y = zeros(1,n);
for i = 1:n
    for j = 1:p+1
        y(i) = y(i)+c(j)*omega(i)^(j-1);
    end
end

% celkova suma stvorcov
S_tot = sum((E_0-mean(E_0)).^2);

% rezidualna suma stvorcov
S_res = sum((E_0-y').^2);

% koeficient determinacie R^2
R2 = 1 - S_res/S_tot;

% napatova konstanta (V.s/rad)
k = c(2);

% vypis vysledkov
disp(['Regresna krivka ma tvar: E_0 = ' num2str(c(1)) ' + ' ...
num2str(k) '*omega.']) % korektne len pre p = 1
disp(['Napatova konstanta je ' num2str(k) ' V.s.rad^-1.'])
disp(['Koeficient determinacie R^2 je ' num2str(R2) '.'])

% pomocne vektory pre podrobne vykreslenie regresnej krivky do grafu
A = linspace(min(omega),max(omega),10000);
Y = zeros(1,length(A));
```

```
for i = 1:length(A)
    for j = 1:p+1
        Y(i) = Y(i)+c(j)*A(i)^(j-1);
    end
end

% graf s nameranymi datami a regresnou krivkou
% (korektny pre akekolvek p)
scatter(omega,E_0), ...
xlabel('\it \omega_{\rm g} \rm [rad \cdot s^{-1}]'), ...
    ylabel('\it E_{\rm 0, RMS} \rm [V] ');
axis([min(omega) max(omega)*1.05 min(E_0) max(E_0)*1.05]);
hold on
plot(A,Y),legend('Dáta','Lineárna regresia','Location','NorthWest');
```

F POUŽITÉ PRÍSTROJE A SOFTWARE

Tab. F-1: Skratovanie

Meranie	Prístroj	Typ	Výrobca	Výrobné číslo
U, I, f	Power Analyzer	C.A 8334B	CHAUVIN ARNOUX	–

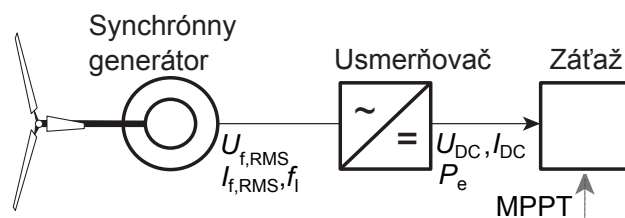
Tab. F-2: Prevádzková charakteristika

Meranie	Prístroj	Typ	Výrobca	Výrobné číslo
Vietor v_w	Anemometer	MW 21	MIERIJ METEO	–
U, I, f	Power Analyzer	3390	HIOKI	120804663
U, I, f	Príslušenstvo	3390	HIOKI	120804663

Tab. F-3: Použitý software

Účel	Software	Výrobca	Verzia
Simulácia modelu	MATLAB-SIMULINK	MATHWORKS	2014a
Model vetra	WTB v.3	RISØ DENMARK	verzia 3.0
Úprava obrázkov	INKSCAPE	open source	verzia 0.91
Sadzba práce	MiKTeX	open source	verzia 2.9

F.1 Bloková schéma merania elektrických veličín



Obr. F.1: Bloková schéma merania elektrických veličín

G OBSAH PRILOŽENÉHO CD

Nastavené modely použité na jednotlivé experimenty sú označené podľa čísla podkapitoly v ktorej sú využívané. Uložené sú v priečinku <Model>.

Prílohy z meraní sú dostupné v priečinku <Merania>. Zoznam priložených súborov je uvedený v tabuľke G-1.

Tab. G-1: Obsah priloženého CD

Priečinok	Súbor	Experiment	Popis
<Model>	Experiment_1.slx	3.1.1	Charakteristiky modelu pri ustálených rýchlostiach vetra.
	Experiment_2.slx	3.1.2	Charakteristiky modelu pri zmene rýchlosti vetra.
	Experiment_3.slx	3.1.3	Charakteristiky modelu pri step-up rýchlosti vetra.
	Experiment_4.slx	3.2	Charakteristiky modelu s dynamickou krivkou $C_P(\lambda)$.
<Merania>	K_pm.xlsx	-	Meranie napätovej konštanty.
	Model_Kpm.m	-	Regresný model napätovej konštanty K_{pm} .
	Skrat.xlsx	-	Priebehy pri skrate.
<Data>	<---->	-	Dáta z meraní na turbíne.
<Kniznica>	WTB_v3	-	WIND TURBINE BLOCKSET

H FOTODOKUMENTÁCIA AGREGÁTU



Obr. H.1: Turbína Whisper 200 v mieste inštalácie