

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

**FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

PROGRAMOVANIE NXT ROBOTOV

RIADENIE VETERNEJ ELEKTRÁRNE

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT -5415-68803

Bratislava 2013

Božena Pintérová

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

**FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

PROGRAMOVANIE NXT ROBOTOV

RIADENIE VETERNEJ ELEKTRÁRNE

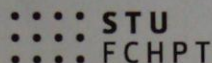
BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT-5451-68803

Študijný program:	Automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Číslo a názov študijného odboru:	5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo
Školiace pracovisko:	Oddelenie informatizácie a riadenia procesov Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky Radlinského 9, 812 37 Bratislava
Vedúci záverečnej práce/školiťel:	Ing .Richard Valo, PhD

Bratislava 2013

Božena Pintérová



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Božena Pintérová**
ID študenta: **68803**
Študijný program: **automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve**
Kombinácia študijných odborov: **5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo**
Vedúci práce: **Ing. Richard Valo, PhD.**
Konzultant: **Ing. Martin Kalúz**

Názov práce: **Programovanie NXT Robotov**

Špecifikácia zadania:

Projekt je zameraný na osvojenie si programovacích zručností pri tvorbe riadiacich algoritmov robotov LEGO-Mindstorms.

LEGO Mindstorms NXT Stavebnica s programovateľnou NXT kockou a rozličnými senzormi je zaujímavý nástroj na programovanie a navrhovanie rôznych druhov robotov, na ktorých sa dajú aplikovať vedomosti z viacerých predmetov vyučovaných na oddelení. Študenti môžu aplikovať svoje znalosti pri stavaní múdrych robotov, zbieraní dát a prezentácii nameraných výsledkov. Takto sú motivovaní riešiť praktické problémy či vytvárať a overovať vlastné námety.

Pomocou tejto stavebnice sa dajú jednoducho vytvárať roboty či vozidlá, ktoré si samé dokážu nájsť cestu, zaparkovať, prekonať prekážku či zbierať predmety roztrúsené po miestnosti.

Úlohy:

1. Zoznámenie sa s programovacím prostredím pre riadiace jednotky robotov.
2. Návrhy riadenia

Riešenie zadania práce od: **18. 02. 2013**

Dátum odovzdania práce: **25. 05. 2013**



Božena Pintérová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

PodĎakovanie

Chcela by som poĎakovať školiteľovi bakalárskeho projektu Ing. Richardovi Valovi, PhD za borné vedenie, pripomienky a cenné rady.

Čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne podľa pokynov
vedúceho bakalárskej práce s použitím literatúry, ktorú uvádzam v osobitnom zozname.

Bratislava 23.5.2013

Božena Pintérová

Abstrakt

Hlavným cieľom práce bolo overiť vhodnosť použitia softvéru Lego Mindstorms Education NXT a aplikovať ho na riadenie modelu veternej elektrárne zhotovenej zo stavebníc Lego Mindstorms. Teoretická časť práce popisuje jednotlivé časti stavebnice Lego Mindstorms, prácu v prostredí softvéru a všeobecný popis veternej elektrárne. Praktická časť zahŕňa meranie výkonu, vysvetlenie princípov riadenia, algoritmy a samotné programy riadenia.

Kľúčové slová: Lego Mindstorms Education NXT, Lego Mindstorms, veterná elektrárňa, riadiaci program

Abstract

The aim of this work was to verify the suitability of application of Lego Mindstorms Education NXT software for controlling of the model wind turbine constructed from Lego Mindstorms. The theoretical part describes parts of the Lego Mindstorms building kit, operations in software environment and general description of the wind turbine power plant. The practical part consists of performance measurements and explains control principles, algorithms and programs used in this experiment.

Keywords: Lego Mindstorms NXT Education, Lego Mindstorms, wind power, control program

Obsah

ÚVOD	10
1 Lego Mindstorm	11
1.1 NXT Kocka	11
1.1.1 Popis NXT kocky	12
1.2 Senzory	13
1.3 Akčné členy	14
1.4 Energometer	15
1.4.1 Popis displeja	16
1.4.2 Technická špecifikácia energometra	18
2 Lego Mindstorms Education NXT Software	19
2.1 Programovací panel	21
2.1.1 Základný panel	21
2.1.2 Kompletný panel	23
2.1.3 Vlastný panel	24
2.2 Panel nastavení	24
2.3 Ovládač	25
3 Veterná elektrárň	26
3.1 Veterná energia	26
3.1.1 Podmienky pre využitie vetra v energetike	26
3.2 Veterné zariadenia	28
3.2.1 Konštrukcie so zvislou osou otáčania	29
3.2.2 Konštrukcie s vodorovnou osou otáčania	30

3.3 Konštrukcia veternej turbíny.....	31
3.4 Výkon veternej elektrárne.....	33
4 Legomodel veternej elektrárne.....	35
4.1 Konštrukcia.....	35
4.2 Merania.....	36
4.2.1 Meranie č.1 Veterná turbína nie je natočená.....	36
4.2.1.1 Program pre meranie č.1.....	36
4.2.1.1 Vyhodnotenie merania č.1.....	37
4.2.2 Meranie č.2 Veterná turbína je natočená.....	37
4.2.2.1 Program pre meranie č.2.....	38
4.2.2.2 Vyhodnotenie merania č.2.....	39
4.3 Riadenie veternej elektrárne.....	39
4.3.1 Riadenie na maximálny výkon.....	39
4.3.1.1 Program riadenia na maximálny výkon.....	40
4.3.2 Riadenie na minimálny výkon.....	41
4.3.2.1 Program riadenia na minimálny výkon.....	41
4.3.3. Riadenie na želaný výkon.....	42
4.3.3.1 Program riadenia na želaný výkon.....	43
ZÁVER.....	44
LITERATÚRA.....	45
PRÍLOHA A TABUĽKY.....	46

Úvod

LEGO MINDSTORMS je pokračovaním vývoja v oblasti vzdelávania od LEGO EDUCATION - programovanie a robotika. Umožňuje získavať nové poznatky z oblasti prírodných vied, informatiky, matematiky, techniky vzrušujúcim prostredníctvom reálnych modelov, ktorých je možné navrhnuť, postaviť, programovať či testovať. Lego Education a National Instrument vyvinuli Lego Mindstorms Education NXT software. Tento softvér má intuitívne rozhranie a grafické programovacie prostredie, ktoré je ľahko zvládnuteľné pre začiatočníka ale rovnako výkonné pre pokročilejšieho používateľa.

V teoretickej časti práce som venovala popisu jednotlivých častí stavebnice LEGO MINDSTORMS ako NXT kocka, senzory, interaktívny servomotor a energometer. Práve energomer bol dôležitou súčasťou môjho modelu veternej elektrárne, pretože meral výkon turbíny. Na základe týchto hodnôt som mohla urobiť merania a navrhnuť riadenie. V ďalšej kapitole som opísala prostredie softvéru a prácu s ním. V poslednej kapitole teoretickej časti mojej práce som sa venovala všeobecnému popisu veternej elektrárne.

Praktickou úlohou mojej práce bolo navrhnuť riadenie modelu veternej elektrárne. Na začiatok som si zostrojila algoritmy pre dané riadenia a potom som v pomocu Lego Mindstorms Education NXT software navrhla programy pre riadenie na maximálny výkon a zvolený želaný výkon. Praktická časť obsahuje aj merania výkonu turbíny pre rôzne vzdialenosti a stupne pootočenia od zdroja vetra.

1 Lego Mindstorms

LEGO MINDSTORMS je pokračovaním vývoja v oblasti vzdelávania od LEGO EDUCATION - programovanie a robotika. Umožňuje študentom získavať nové poznatky z oblasti prírodných vied, informatiky, matematiky, techniky vzrušujúcim prostredníctvom reálnych modelov. Kombináciou sveta LEGO so vzdelávaním v oblasti robotických technológií tímy môžu navrhovať, stavať, programovať a testovať robotov. Stavebnica sa skladá z Lego súčiastok, pomocou ktorých je možné postaviť reálny model a špeciálnych častí ako NXT kocka, senzory, akčné členy či prepájacie káble [7].



Obr.1 LegoMindstorms

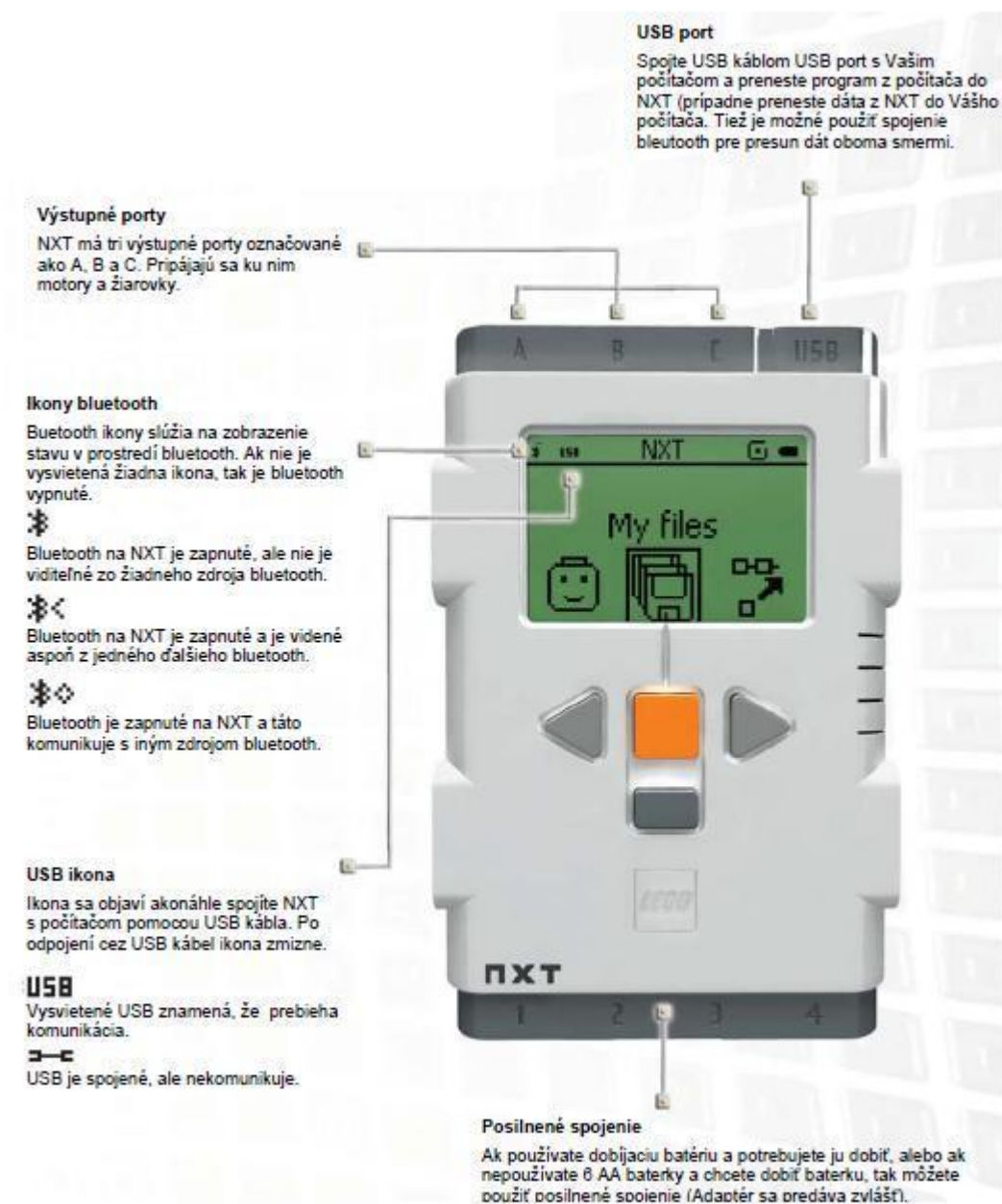
1.1 NXT kocka

NXT kocka je mozgom stavebnice Lego Mindstorms. Obsahuje dva procesory: 32 bitový - ARM7 (256 kB FLASH, 64 kB RAM) a 8 bitový - ATMEGA48 (4 kB FLASH, 512 B RAM). K dispozícii má 4 vstupné porty a 3 výstupné porty, LCD displej (60x100 bodov) a reproduktor (do 8 kHz). NXT kocku je možné nabíjať tromi spôsobmi pomocou: dobíjacieho lítiového kompaktného akumulátora, AA (akumulátorových) batérií – 6 ks alebo pomocou sieťového adaptéru.

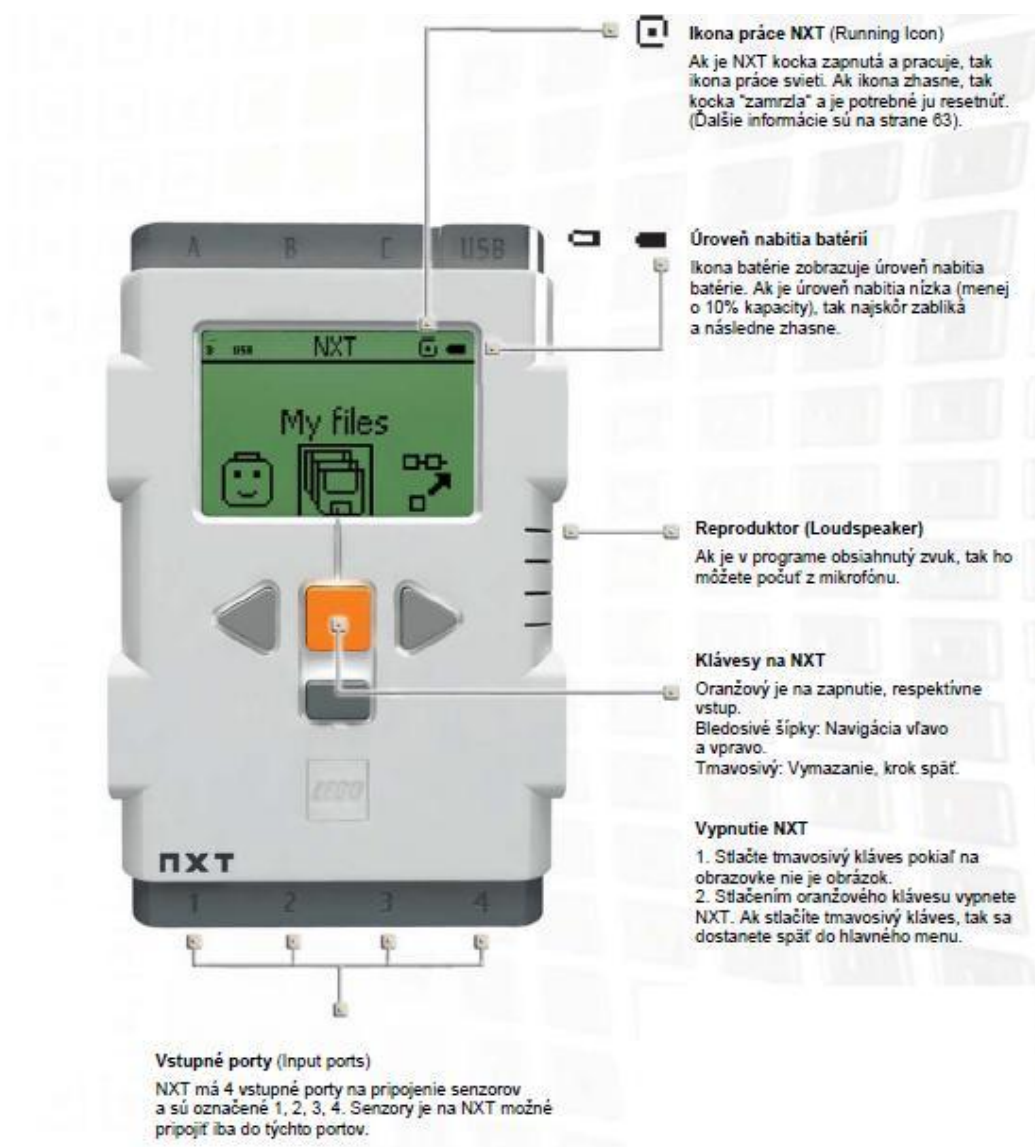


Obr.2 NXT kocka

1.1.1 Popis NXT kocky



Obr. 3 NXT kocka



Obr.4 NXT kocka

1.2 Sensory



Dotykový senzor: Umožňuje zapnutie/vypnutie



Svetelný senzor: Rozpoznáva kvalitu osvetlenia a reaguje na svetlo



Zvukový senzor: Reaguje na zvuk



Ultrasonický senzor: Meria vzdelenosti k objektom a reaguje na pohyb

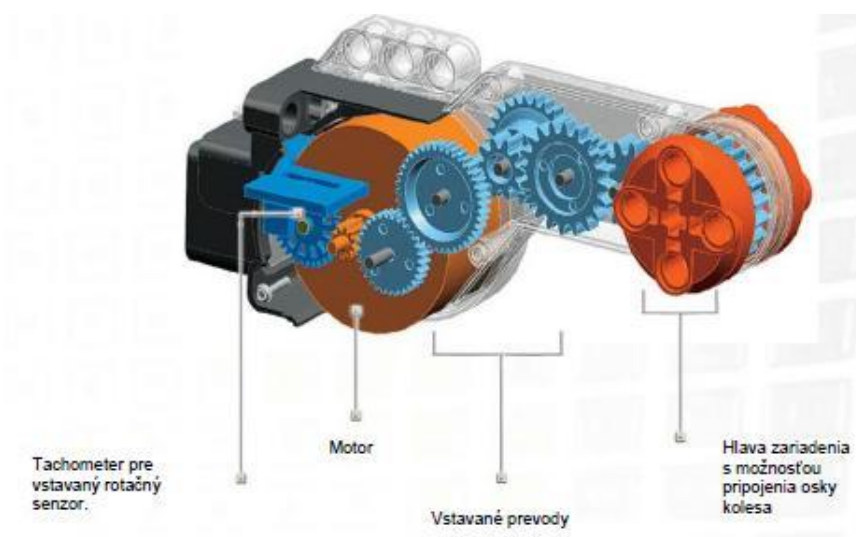


Pripájanie senzorov k NXT kocke:

Jeden koniec kábla pripojíme k senzoru a druhý koniec do vstupného portu na NXT (1, 2, 3 alebo 4).

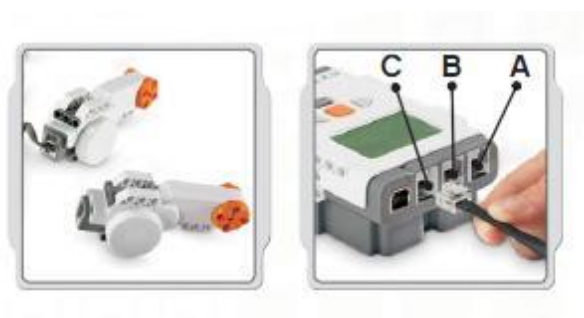
1.3 Akčné členy

Interaktívny servomotor



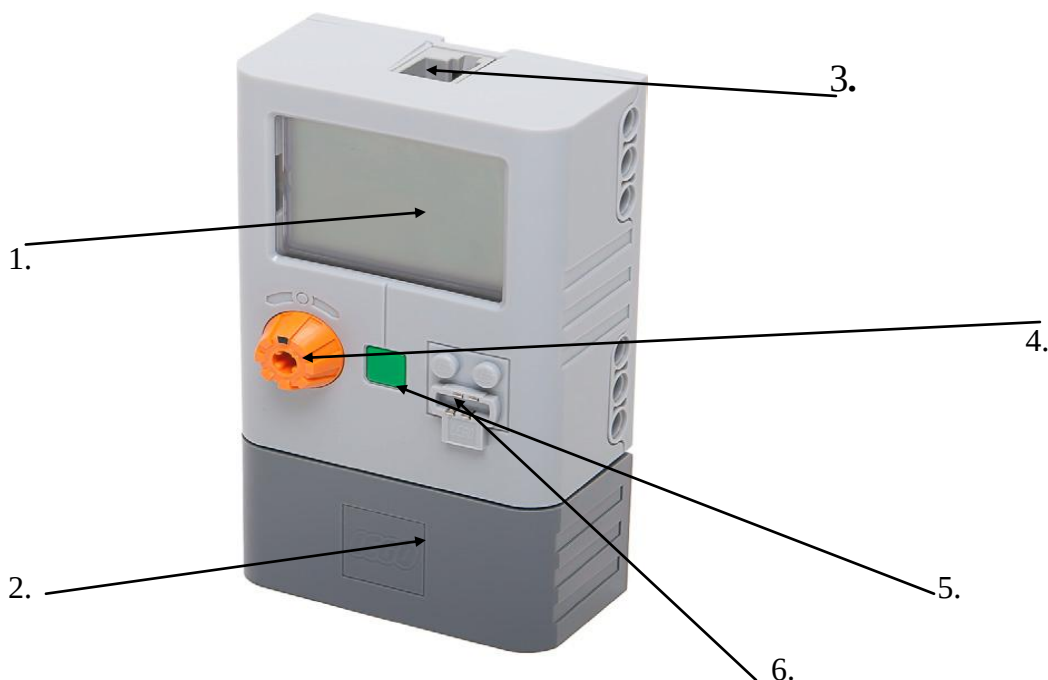
Obr.5 Interaktívny servomotor

Patrí k najviac využívaným výstupným zariadeniam stavebnice Lego nakoľko umožňuje pohyb. Servomotor môže slúžiť aj ako vstupné zariadenie pretože informuje o úrovni natočenia. Interaktívny servomotor má vstavaný rotačný senzor. V rotory zabudované spätnoväzbové zariadenie umožňuje precízne riadenie servomotora z NXT. Rotačný senzor dokonca umožňuje riadenie rotora v rozsahu +/- 1 stupeň. Jedno otočenie má 360 stupňov, ak prikážete robotovi otočiť sa o pol obrátky, tak sa otočí presne o 180 stupňov [7].



Pripájanie Servomotora k NXT
kocke

1.4 Energometer



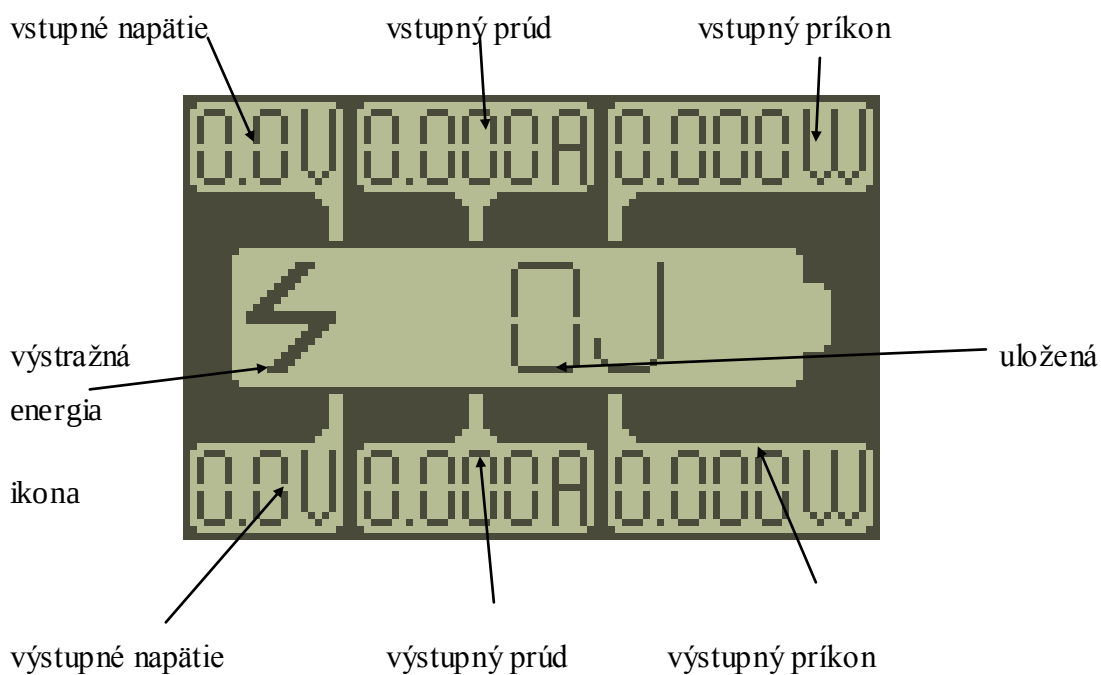
Obr.6 Energometer

1. displej energometra
2. zásobník energie
3. výstupný port
4. prepínač polarity
5. tlačidlo zapnúť/vypnúť
6. konektorový výstup

Energometer meria množstvo generovanej energie, ukladá a uvoľňuje energiu. Zásobník energie napája energometer a ukladá a uvoľňuje energiu generovanú počas experimentu.

K plnému nabitíu energometra je možné využiť niekoľko zdrojov energie: Lego batériový box, Lego box s dobíjacou batériou a pomocou NXT kocky.

1.4.1 Popis displeja



Obr.7 Displej energometra



Počas experimentu môže byť v zásobníku energie uložená energia 100 J. Pri dosiahnutí tejto hodnoty začne údaj blikat' v sekundových intervaloch, vstupné napätie sa ďalej meria, vstupný prúd a príkon udávajú hodnotu 0 J.



Ak bliká ikona blesku, v zásobníku energie je veľmi málo energie a potrebuje dobiť. S energometrom sa dá pracovať ďalej až do doby, kým ikona nebude svietiť trvalo.



Nabíjanie zásobníka: Zapnutý energometer zobrazuje hodnotu vstupného napätia a stav uloženej energie.



Hodnota 100 J na displeji neznamená, že je energometer nabitý. Pri plnom nabití sa nabíjanie ukončí automaticky a energometer sa vypne.

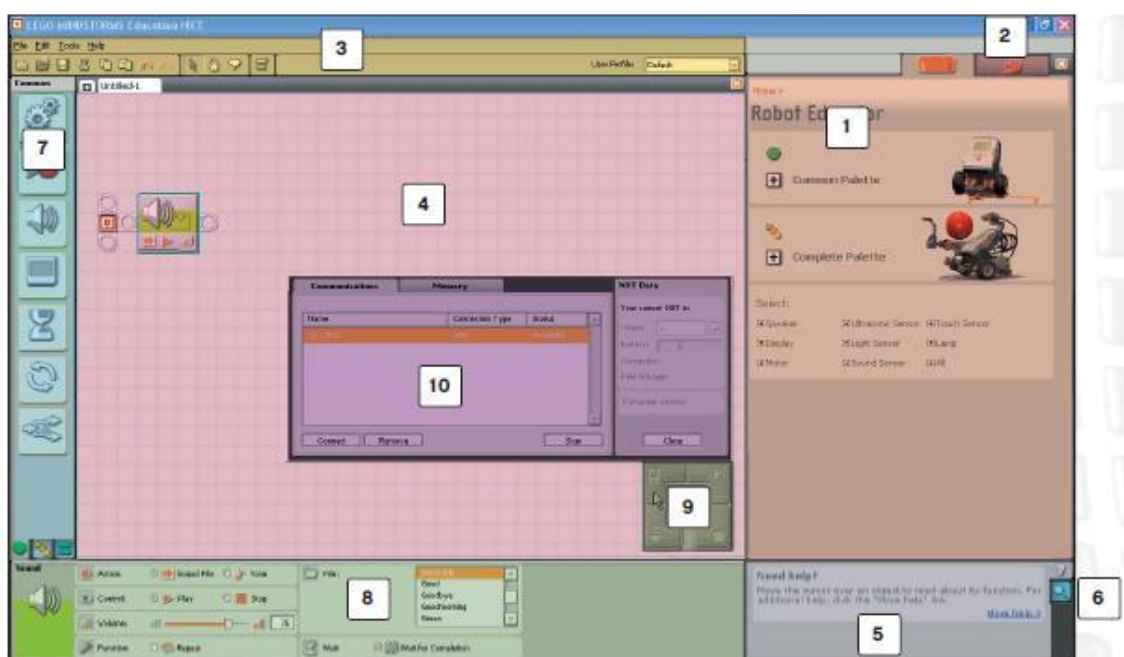
1.4.2 Technická špecifikácia energometra

Vstupné napätie.....	0 -9,9V
Vstupný prúd	0-0,2A
Príkon	$P = V \times I$
Výstupné napätie.....	0 -9,9V
Výstupný prúd	0-0,450A
Výkon	$P = V \times I$
Uložená energia	0 - 100J
Kapacita zásobníka energie.....	50mAh

[6]

2 Lego Mindstorms Education Software

Lego Education a National Instrument vyvinuli Lego Mindstorms Education NXT software. Tento software má intuitívne drag-and-drop rozhranie a grafické programovacie prostredie, ktoré je ľahko zvládnuteľné pre začiatočníka ale rovnako výkonné pre pokročilejšieho používateľa. Softvér je optimalizovaná verzia profesionálneho grafického softveru NI LabVIEW, ktorý využívajú vedci a technici na stavbu, riadenie a testovanie a výrobkov a systémov, ako napríklad mp3 a dvd prehrávače, mobilné telefóny či airbagy a bezpečnostné zariadenia automobilov a iných vozidiel.



Obr.8 Lego Mindstorms Education NXT software

1. Robot Educator
2. Môj portál
3. Nástrojová lišta
4. Pracovná plocha
5. Pomocník
6. História pracovnej plochy
7. Programovací panel
8. Panel nastavení
9. Ovládač

10. NXT okno

Robot Educator

Predstavuje súbor tutoriálov na poskladanie a programovanie robotov.

Môj portál

Ikona môj portál umožňuje pripojenie na stránku www.MINDSTORMSeducation.com, kde je množstvo užitočných informácií, vylepšení a súbor na stiahnutie.

Nástrojová lišta

Obsahuje najčastejšie používané príkazy z menu nástrojov

Pracovná plocha

Na pracovnú plochu sa umiestňujú programovacie bloky jednoduchým pretiahnutím z programovacieho panelu s pripojenými blokmi na prenos signálu. Pracovná plocha je miesto, kde sa programuje.

Pomocník

Možnosť nájsť riešenie v prípade problémov.

Programovací panel

Obsahuje všetky programovacie bloky potrebné na vytvorenie programov. Tlačidlá na spodnej časti panelu umožňujú prepínanie medzi tromi panelmi: *Základný panel*, panel s najčastejšie používanými blokmi, *Kompletný panel* obsahujúcim všetky bloky a *Vlastný panelom*, ktorý si užívateľ môže navrhnuť sám a obohatiť o nové bloky, čo si buď stiahne s webu alebo vytvorí.

Panel nastavení

Každý programovací blok má svoj konfiguračný panel na prispôbenie bloku pre špecifický vstup aj výstup.

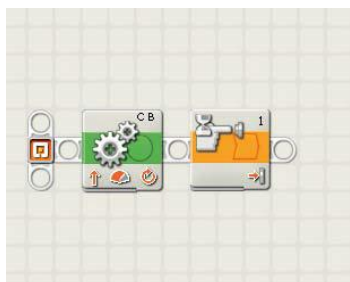
Ovládač

Zahrňa päť tlačidiel umožňujúcich sťahovanie programu z počítaču do NXT a meniť nastavenie NXT.

NXT okno

Poskytuje informácie o NXT pamäti a nastavenie komunikácie pre jednotlivé nástroje, sťahovanie a informácie.

2.1 Programovací panel



Obr. 9 Programovací panel

Programovacia lišta obsahuje všetky programovacie bloky potrebné na vytvorenie programu. Jednotlivé bloky je možné kombinovať. Každý blok obsahuje pokyny, ktoré NXT dokáže rozpoznať.



Dokončený program je potrebné uložiť do NXT. Pred samotným sťahovaním treba zapnúť a pripojiť jednotku NXT.

Obr.10 Ovládač

2.1.1 Základný panel

Tento panel je doporučený ako východiskový pri začiatkoch práce s týmto softvérom.



Obr.11 Základný panel



Blok pohybu

Umožňuje pohyb robotického motora a zapnutie svetiel



Nahraj/Prehraj blok

Slúži na programovanie fyzického pohybu robota a neskôr ho spustiť kdekoľvek inde v programe



Zvukový blok

Umožňuje robotu vydávanie zvukov vrátanie nahratých slov



Zobrazovací blok

Slúži na ovládanie displeja NXT. Poskytuje možnosť písania, ukázania ikon, kreslenia.



Čakací blok

Schopnosť robota počkať si vstup senzora, napríklad zvukový signál alebo časový interval.



Opakovací blok

Funkcia prikáže robotu vykonávať zadanú činnosť znovu a znovu pri určitej podmienke, napríklad svetlo bude svietiť, pokiaľ tlačidlo bude stlačené.



Prepínací blok

Umožňuje dať robotovi schopnosť, aby sa rozhodol na základe vopred

zadaných podmienok. Napríklad odbočiť doľava ak počuje hlasitý zvuk a doprava ak počuje tichý zvuk

2.1.2 Kompletný panel



Obr.12 Kompletný panel

Základné bloky: Obsahujú úplne rovnaké bloky ako Základný panel



Akčné bloky: Slúžia na kontrolu špecifických typoch správania, ktoré súvisia so vstupnými zariadeniami ako Servo Motor, NXT zvukový senzor, NXT displej, Bluetooth.



Senzorové bloky: Pomocou týchto blokov a senzorov robota možno kontrolovať jeho správanie. Bloky korešpondujú so senzorom dotyku, zuku, svetla, ultrazvuku, NXT tlačidiel, otáčok servomotora, časovača, Bluetooth.



Bloky postupu: Slúžia na vytvorenie komplexnejšieho správania. Umožňujú ovládanie opakovania, počkania a variabilných podmienkových funkcií. Sú tu bloky na ukončenie navoleného správania alebo logického postupu v programe a rozhodovacie bloky na naprogramovanie odpovedí pre špecifický senzor podmienok.



Dátové bloky: Využívanie a nastavenie Booleanských logických systémov, náhodných podmienok a rozsahov a prahov senzorov



Pokročilé bloky: Umožňujú prídanie textu, konvertovanie dát do textu, kontrolu spiacej funkcie NXT, ukladanie súborov do NXT, kalibráciu senzor a reset motorov.

2.1.3 Vlastný panel



Moje bloky:

Možnosť uloženia celého programu ako jedného bloku, ktorý sa môže využiť v iných programoch



Internetové sťahovanie

Umožňuje stiahnutie programov z emailov užívateľových priateľov alebo ich stiahnuť z portálov či webových stránok.

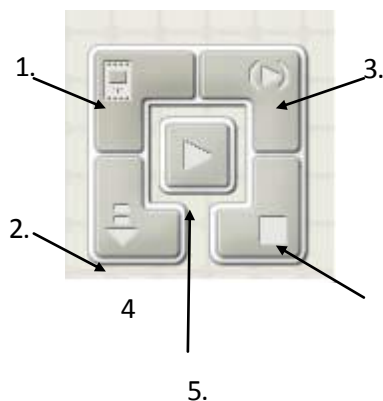
2.2 Panel nastavení

Každý programovací blok má konfiguračný panel na upravenie nastavení vybraného bloku. Konfiguračný panel bloku sa nachádza v dolnej časti obrazovky a viditeľným a aktívnym sa stáva, ak je daný blok označený na pracovnej ploche. Zmena každého parametru bloku, spôsobí zmenu správania daného bloku. Napríklad pre rýchlejší pohyb robota, treba zmeniť parametre sily v konfiguračnom nastavení Bloku pohybu.



Obr.13 Nastavenia bloku

2.3 Ovládač



Obr.14 Ovládač

1. Tlačidlo umožňuje prístup k NXT pamäti a nastavenie komunikácie
2. Tlačidlo slúži na stiahnutie programu NXT a následne je možné spustiť program z NXT
3. Tlačidlo stiahne a spustí len kúsok programu (jeden alebo viac blokov) bez nutnosti stiahnuť celý program. Užívateľ si môže overiť či práve napísaná časť programu správne funguje.
4. Tlačidlo spúšťa a stopuje program.
5. Tlačidlo stiahne program do NXT a následne ho spustí [7].

3 Veterná elektrárň

3.1 Veterná energia

Veterná energia sa zaoberá využívaním vetra ako zdroja energie [3]. Vietor je prúdenie vzduchu, ktoré vzniká dôsledkom vyrovnávania rôznych tlakov vzduchu. Tieto tlakové rozdiely v atmosfére sú spôsobené nerovnomerným zohrievaním Zeme a nerovnomerným rozložením teploty v atmosfére [4]. Vietor vane z oblasti s vyšším tlakom do oblasti s nižším tlakom a pri rovníku sa stáča vplyvom otáčania Zeme [1]. Energia vetra je veľmi veľká predstavuje asi 10^{20} J. V nižších vrstvách je prúdenie vzduchu hlavne ovplyvnené krivosťou terénu ale aj samotným trením a turbulenciami [4].

3.1.1 Podmienky pre využitie vetra v energetike

Základnou podmienkou pre postavenie veternej elektrárne je veternosť v danej oblasti. Celková veternosť sa dá odhadovať (napr. približným odhadom podľa veternosti v blízkych meraných oblastiach ako napr. letiská) alebo ju môžeme určiť meraním. Toto meranie je najvhodnejšie uskutočniť v takej výške v akej bude umiestnená gondola, alebo sa urobí meranie v 2 rôznych výškach a následne sa prepočíta rýchlosť vetra pre ďalšie výšky. Meranie by malo trvať minimálne rok a následne výsledky je vhodné porovnať s meraniami meteorologických staníc. Okrem rýchlosti vetra sú ďalšie dôležité podmienky ako frekvencia výskytu, smer vetra, turbulencie.

Rýchlosť vetra a určujúca rýchlosť

Rýchlosť vetra nie je konštantná a v čase sa mení určitými frekvenciami. Tieto zmeny rýchlosti vetra sa dejú nezávisle od seba v rôznych výškach sú iné. Nakoľko veterná turbína nie je bodový objekt uplatňuje sa stredná „určujúca“ rýchlosť tohto prúdenia:

$$v = \frac{1}{T} \cdot \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} v(t) dt$$

kde: $v(t)$ – okamžitá rýchlosť v čase t (ms^{-1}); T – stanovený časový interval; v – stredná určujúca rýchlosť ms^{-1}

Rýchlosť vetra a drsnosť povrchu

Dôsledkom trenia sa vzduch vo vrstvách bližšie pri zemi pohybuje pomalšie ako vo vrchnejších vrstvách, kde nie je také veľké trenie. Matematicky môžeme tento jav popísať nasledovne:

$$v(z) = v_1 * \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$

$v(z)$ – rýchlosť vetra vo výške z ; v_1 – rýchlosť vetra vo výške z_1 ; α – exponent vyjadrujúci drsnosť terénu

koeficient vyjadrujúci drsnosť terénu sa menia s výškou vegetácie, snehom a pod.

Turbulencie

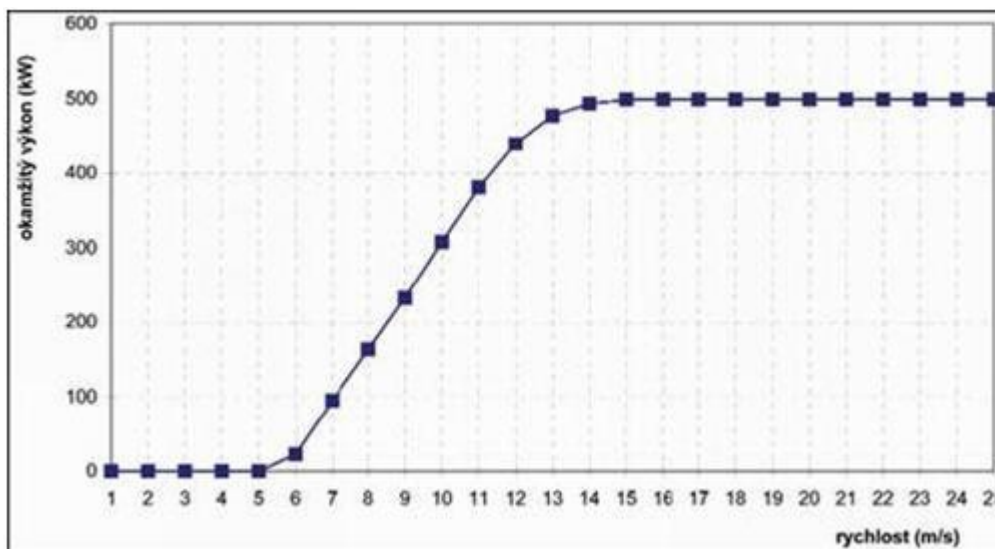
Okamžitá rýchlosť vetra má určité fluktuácie, ktoré sú zapríčinené turbulentiami. Turbulencie veľmi významne zaťažujú konštrukciu celej veternej elektrárne. Ich zaťaženie predstavuje takmer polovicu celkového zaťaženia.

Nárazy vetra

Sú definované ako extrémne hodnoty vetra, ktoré sú taktiež spôsobené turbulentiami, ale ich trvanie je veľmi krátke [4].

Smer vetra

Smer vetra sa určuje podľa svetovej strany. Na určenie smeru sa používa veterný kohút alebo veterný rukáv. Získané údaje sú datované pomocou veternej ružice. Ku konkrétnym smerom vetra je priradovaná hodnota v percentách, ktorá vyjadruje aký podiel z celkového času vietor duje práve týmto smerom a priemernú rýchlosť pri daných podmienkach [1]. Na smer vetra má vplyv aj tzv. termický vietor, čo je pohyb vzduchu spôsobovaný ohrievaním či ochladzovaním zeme počas dňa/noci [4].



Obr.15 Priebeh výkonu veternej elektrárne v závislosti na rýchlosti vetra

Z výkonovej krivky veternej elektrárne na Obrázku č.1 možno vyhodnotiť, že pre stavbu veternej elektrárne sú najvhodnejšie rýchlosti od 3,5m/s až do 15m/s. Pre rýchlosť 15m/s veterná elektrárne dosahuje maximálny výkon. Pre vyššie hodnoty rýchlosti vetra už musí byť brzdená.

Z geografického hľadiska sú pre stavbu najvhodnejšie rovinné oblasti či vrcholy nie príliš strmých pahorkov a kopcov, ktoré majú terén s čo najnižšou drsnosťou, čo menšie trenie vetra a vyššiu rýchlosť vetra [4].

3.2 Veterné zariadenia

Veterné elektrárne transformujú energiu prúdenia vzduchu na elektrickú energiu. Sila vetra sa opiera o vhodne nastavené krídla rotora turbíny a roztáča ich. Točivá sila z rotora sa prenáša cez prevodovku alebo priamo do elektrického generátora, kde sa vyrába jednosmerný, resp. striedavý prúd. Elektrická energia vyrobená veternou energiou sa buď spotrebúva priamo na mieste alebo je dodávaná do siete.

Delenie elektrární:

Podľa výkonu

- Malé do 20 kW
- Stredné do 50 kW

- Veľké nad 250 kW

Podľa konštrukcie

- S vodorovnou osou otáčania
- So zvislou osou otáčania

3.2.1 Konštrukcie so zvislou osou otáčania



Obr.16 Elektrárň so zvislou osou otáčania

Savoniusov rotor

Základný typ Savoniusovho rotora je tvorený dvomi polvalcovými plochami, ktoré sú vzájomne presadené s medzerou. Jeho výhodou je jednoduchá a lacná konštrukcia, roztočenie pri malých rýchlostiach vetra. Počiatočný krútiaci moment závisí od presadenia polvalcových plôch ale aj od polohy rotora voči smeru vetra. Jeho účinnosť je približne 20 percent.

Darrieusov rotor

Skladá sa z dvoch alebo troch kridiel, ktoré rotujú okolo spoločnej zvislej osi. Medzi veľké výhody tohto typu patrí skutočnosť, že nezávisia na smere vetra, jednoduchá konštrukcia a možnosť zabudovať generátor v zemi.

Existuje kombinácia Savoniusového a Darrieusovho rotora, ktorá je výhodná najmä kvôli jeho dobrým rozbehovým vlastnostiam. Problém predstavuje výkonová regulácia rotora, nakoľko nie možnosť regulácie pomocnou natáčania lopatiek, ale treba zabudovať mechanickú brzdu na hriadeli rotora.

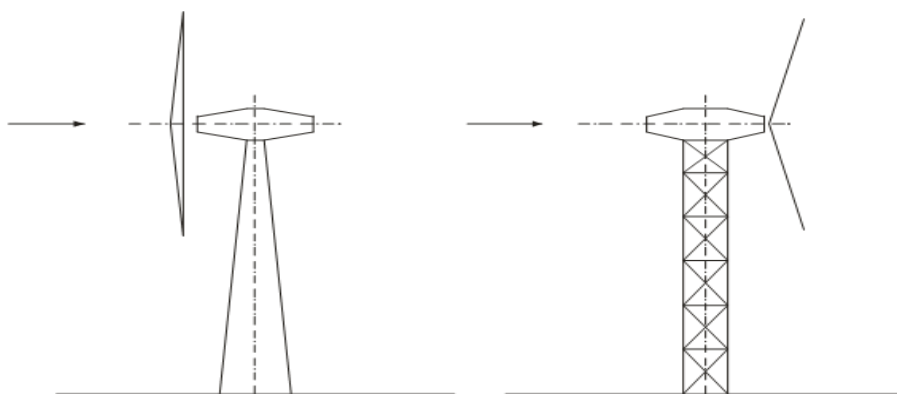
Medzi klasické usporiadania lopatiek patrí usporiadanie do H, Δ , alebo najčastejšie ϕ . Najväčšia elektrárňa tohto typu Éole je umiestnená v Kanade, má výšku rotora až 96 m s priemerom 64 m. Inštalovaný výkon je 3,8 MW.

3.2.2 Konštrukcie s vodorovnou osou otáčania



Obr.17 Turbíny s vodorovnou osou otáčania

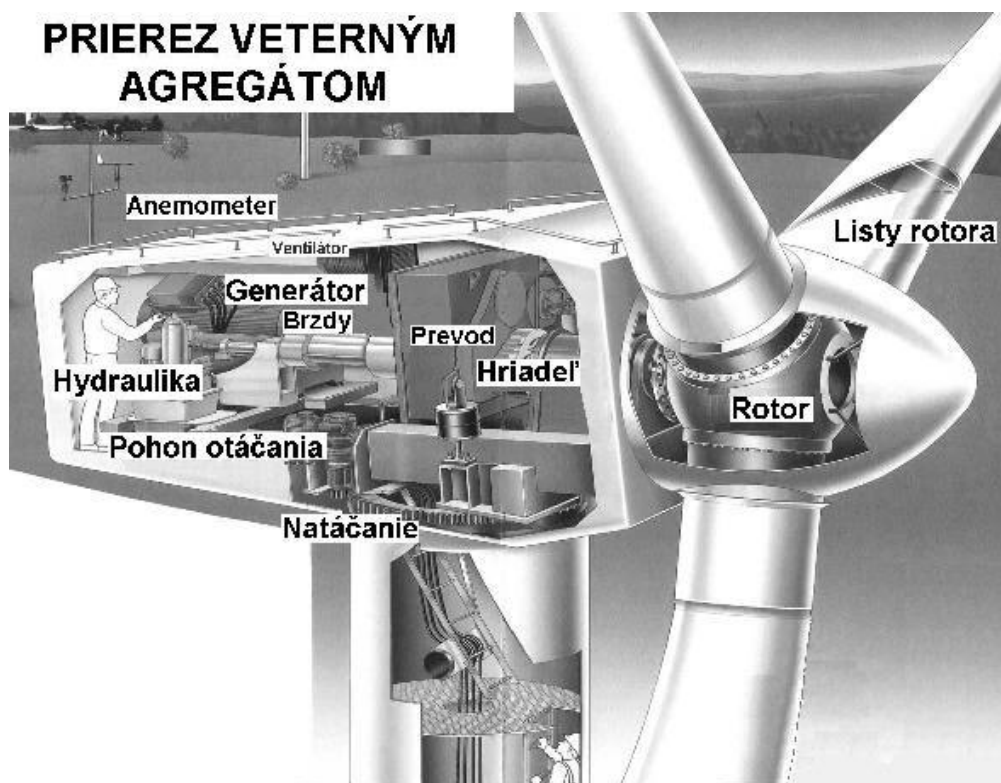
Veterne elektrárne tohto typu sú rýchlobežné zariadenia s vysokou účinnosťou premeny na elektrickú energiu (40 %). Lopatky vrtule môžu ale aj nemusia byť natáčacie, no gondola sa musí natáčať do smeru vetra. Existujú dve konštrukčné riešenia: up – wind a down – wind. Pri usporiadaní up – wind je potrebné zohľadňovať priehyb lopatky. Turbína pracuje v menšom aerodynamickom tieni stĺpa, má pokojnejší chod a menší hluk. Usporiadanie down – wind nepotrebuje riadenie natáčania do smeru vetra, pracuje však vo väčšom aerodynamickom tieni stĺpa. Aby sa aerodynamický tieň zmenšil musí mať stĺp prúťovú konštrukciu [4].



Obr.18 Usporiadanie Up

Usporiadanie down

3.3.Konštrukcia veternej turbíny



Obr.19 Prierez veterným agregátom

Listy rotora zachytávajú energiu vetra. Najdôležitejšie je navrhnuť tvar listov, tak aby čo najefektívnejšie prenášali silu vetra na rotor. Listy sú vyrábané z laminátov, polyesterov alebo iných plastických materiálov. Niektoré majú drevenú os. Vhodná

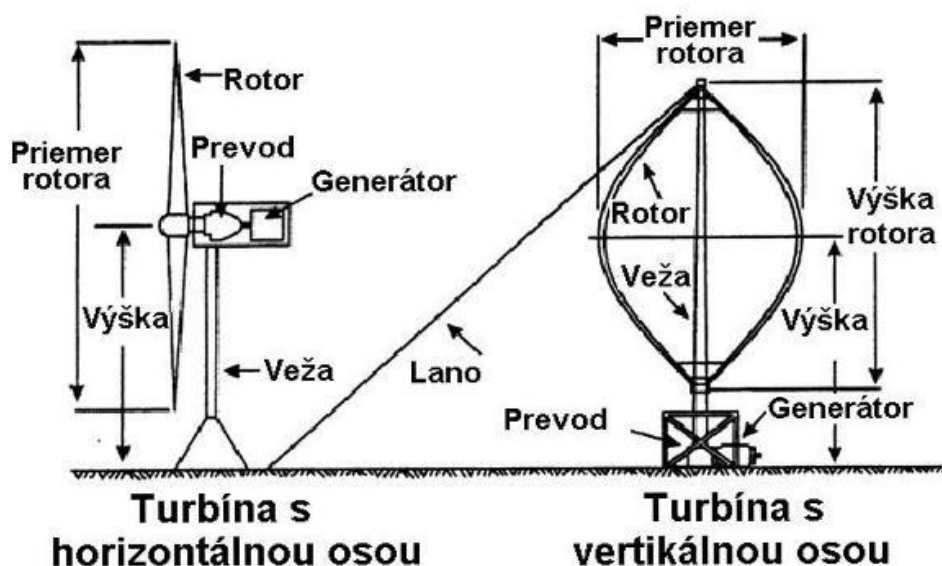
kombinácia týchto materiálov zaručuje veľkú pevnosť a pružnosť. Pri turbínach dosahuje priemer listov rotora až 25 - 50 metrov a každý list môže vážiť aj jednu tonu. Väčšina turbín má 3 listy.

Rotor je tvorený listami a hlavnou osou, ku ktorej sú listy pripevnené. Os je pripojená na hlavný prevod systému. Veľké turbíny majú rotor najčastejšie s tromi listami umiestnenými na vrchu stožiaru. Rotor s veľkým počtom listov pokrýva celú plochu zabranú rotorom aj pri malých otáčkach, kým rotor s menším počtom listov sa musí otáčať rýchlejšie, aby pokryl celú plochu. Z čoho by malo vyplývať, že čím viac rotor listov má, tým by mal mať vyššiu účinnosť. Nakoľko sa listy rotora vzájomne ovplyvňujú, veľký počet listov spomaľuje otáčky. Na druhej strane väčší počet listov spôsobuje vyšší počiatočný moment otáčania, čo využívajú malé agregáty štartujúce už pri malých rýchlostiach vetra.

Prevody a ložiská sú dôležité kvôli efektívneho prenosu momentu rotácie na generátor elektrického prúdu. Veterný generátor má podobnú konštrukciu ako generátor v tradičnej elektrárni na fosílnu palivá. Činnosť jednotlivých komponentov v turbíne je regulovaná elektronicky a môže byť riadená aj diaľkovo. Úlohou **regulácie** je udržať rovnaké napätie pri meniacich sa otáčkach generátora.

Generátor má niekoľko typov, z ktorých najbežnejšie sú jednosmerný, synchronný a asynchronný. V malých veterných elektrárnach sa najčastejšie využívajú jednosmerné generátory, pretože produkujú jednosmerný prúd, ktorý je možné uložiť do akumulátorov. V prípade striedavého generátora je nutné do sústavy zabudovať usmerňovač.. V stredných a veľkých veterných elektrárnach sa používajú hlavne synchronne alebo asynchronne generátory.

Turbíny s horizontálnou osou sú najbežnejšie typy turbín. Existujú však aj turbíny so zvislou osou otáčania. Ich výhodou je vyššia rýchlosť otáčania, a tým aj vyššia účinnosť. Fungujú teda aj pri nižšej rýchlosti vetra a nie je potrebné ich nатачаť podľa smeru vetra.



Obr.20 Turbíny s horizontálnou/vertikálnou osou otáčania

Napriek rozdielnej konštrukcii turbín s horizontálnou a vertikálnou osou je ich mechanika prakticky rovnaká. Rýchlosť otáčania listov je prenášaná na generátor pomocou prevodov. Funkciou prevodov je čo najúčinnnejšie využiť meniacu sa rýchlosť vetra. V súčasnosti sa vyvíjajú turbíny bez prevodov, čo by znížilo nároky na konštrukciu, životnosť, a tým aj cenu.

Konštrukcie niektorých turbín umožňujú ich natáčanie do smeru vetra. Natáčací aj nenatáčací typ má niekoľko výhod i nevýhod. Natáčacie turbíny dokážu lepšie zužitkovať silu vetra, ale ich konštrukcia si vyžaduje komplikovanejšie ložiská a ďalšie zariadenia, čo negatívne ovplyvňuje ich spoľahlivosť. Nenatáčacie turbíny sú jednoduchšie a vyžadujú jednoduchšiu údržbu, ale produkujú menej elektriny ako natáčacie systémy [5].

3.4 Výkon veternej elektrárne

Albert Betz v roku 1919 odvodil teoreticky maximálnu dosiahnuteľnú účinnosť veterného stroja na 59% (Betzovo pravidlo). Kinetická energia vetra sa v turbíne mení na energiu otáčavého pohybu a následne v generátore na elektrickú energiu. Teoreticky dosiahnuteľný výkon pre jednotkovú plochu:

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2}$$

k_B je Betzov koeficient, má hodnotu 0,59

Pre reálne turbíny s priemerom rotora D , teda s dĺžkou lopatky $D/2$:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

c_p je súčiniteľ výkonnosti, v ideálnom prípade rovný 0,59

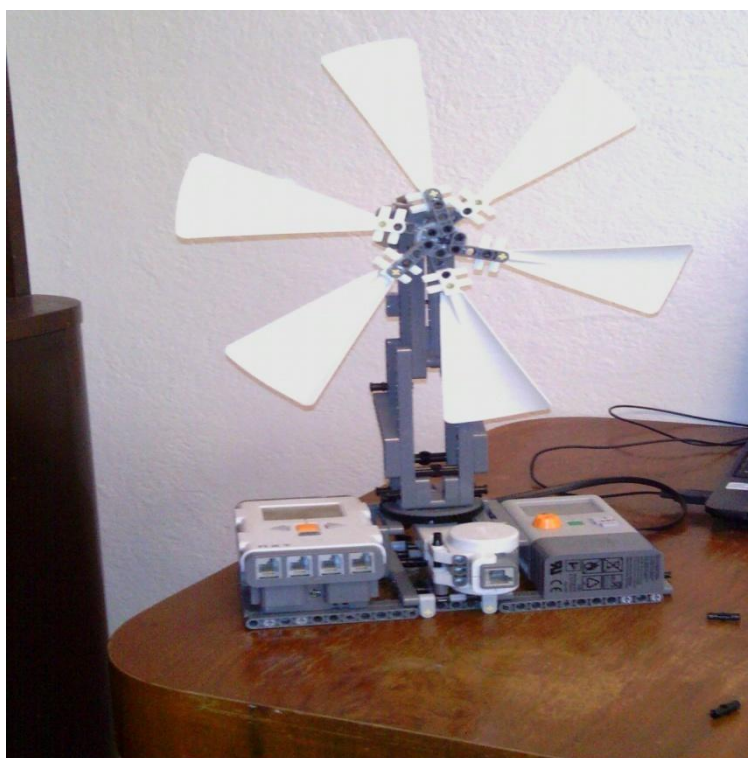
[3]

4 Legomodel veternej elektrárne

Cieľom úlohy je postaviť veternú elektráreň a naprogramovať ju tak, aby bola schopná merať výkon, natáčať sa v smere maximálneho alebo želaného výkon. K dispozícii som mala stavebnice Lego Mindstorms Education Base Set a Renewable Energy Add-on Set. Na napísanie algoritmu použijem softvér Lego Mindstorms Education NXT Software 2.0.

4.1 Koštrukcia

Hlavné časti konštrukcie sú energometer, NXT kocka, lopatky turbíny a motor. Pri stavbe elektrárne som postupovala podľa návodu a kládla som dôraz, aby jednotlivé časti konštrukcie boli pevne spojené a model bol stabilný. Príslušné časti som poprepájala ku NXT kocke ku portom A,B,C alebo 1,2,3,4.

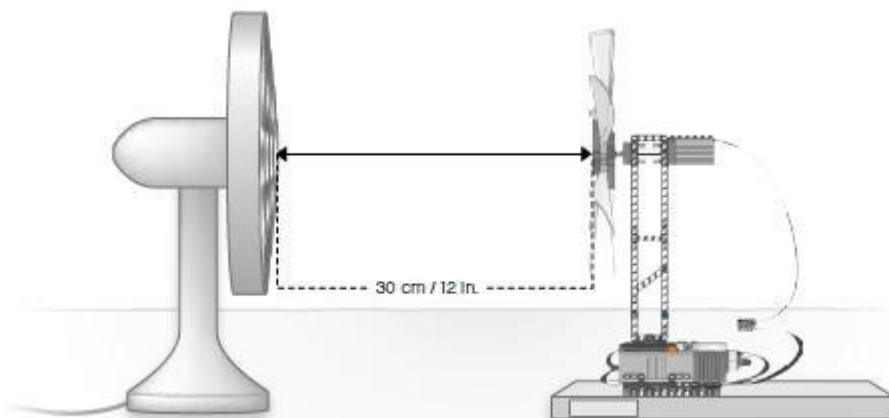


Obr.21 Postavený model veternej elektrárne

4.2 Merania

4.2.1 Meranie č. 1 Veterná turbína nie je natočená

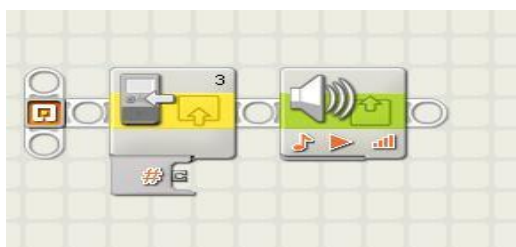
Merala som príkon energie, aký sa získa počas jednej minúty, ak bude turbína natočená priamo na ventilátor, vo vzdialenosti 30, 20 a 40 cm pri každom rýchlostnom stupni ventilátora.



Obr.22 Ilustrácia merania č.1

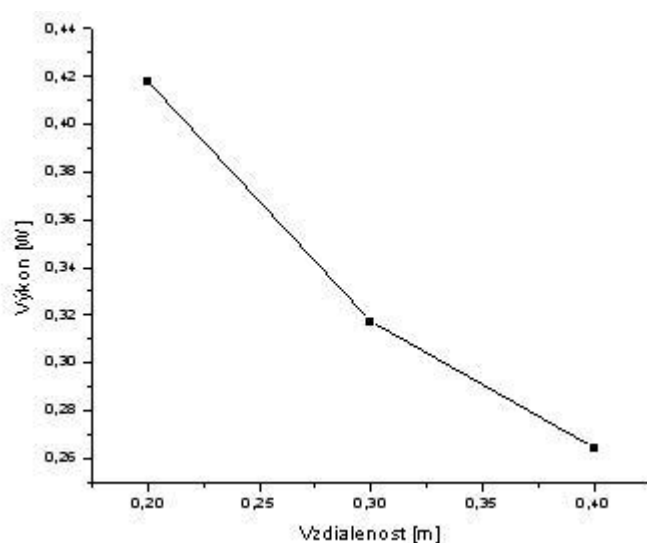
4.2.1.1 Program pre meranie č.1

Cez Lego Mindstorms som si vytvorila program, ktorý meral hodnotu príkon a zároveň ma upozornil, kedy skončila doba merania. Program pozostáva z troch blokov: štartovacieho bodu, energometra a zvukového bloku. V nastaveniach bloku energometra som nastala príkon ako veličinu, ktorú chcem merať a pri porte som označila 3, pretože k portu 3 NXT kocka som pripojila energometer. Pre zvukový port som nastavila, aby ma po 60 sekundách zvukom upozornil, že meranie skončilo.



Obr.23 Ukážka programu merania č.1

4.2.1.2 Vyhodnotenie merania č.1



Graf č. 1: Závislosť výkonu od vzdialenosti

Z nameraných údajov (uvedené v Tabuľke č. 1: Namerané hodnoty pre kolmú vzdialenosť turbíny od zdroja vetra) vyplýva, čím bližšie je zdroj vetra k turbíne, tým je výkon väčší.

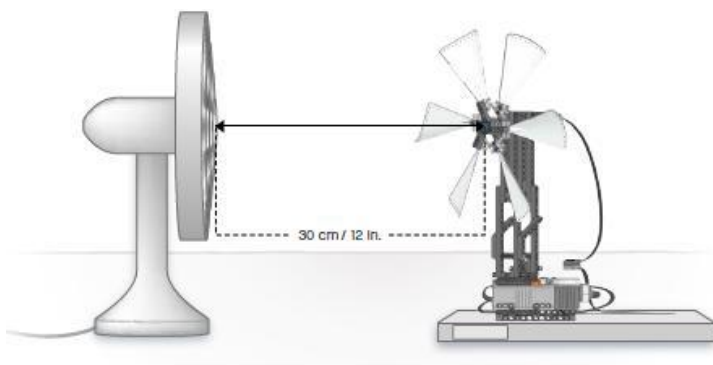
Ostatné namerané hodnoty sú uvedené v Prílohe A Tabuľky.

Tabuľka č.1: Namerané hodnoty pre kolmú vzdialenosť turbíny od zdroja vetra

Stupeň rýchlosti ventilátora	Vzdialenosť od zdroja [m]	Uložená energia [J]	Výstupné napätie [V]	Vstupné napätie [V]	Vstupný prúd [A]	Vstupný príkon [W]
3	0.4	15	9,0	3,0	0.088	0,264
3	0.3	22	9,8	2,9	0.107	0,3173
3	0.2	24	8,9	4,1	0,102	0,4182

4.2.2 Meranie č. 2 Veterná turbína je natočená

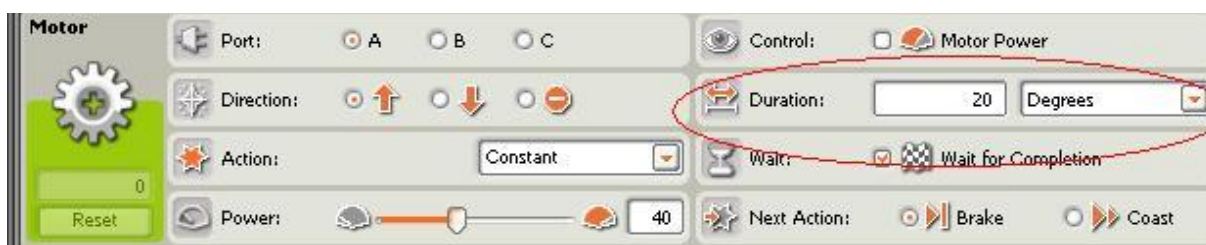
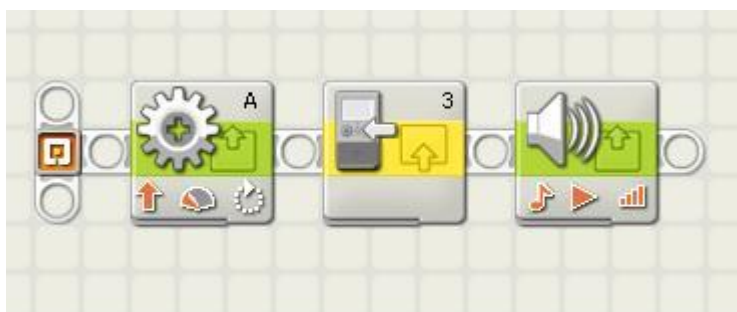
Merala som príkon energie, aký sa získa počas jednej minúty, ak bude turbína otočená o 60°, 45°, 30° a 20° od ventilátora vo vzdialenosti 30, 20 a 40 cm pri každom rýchlostnom stupni ventilátora.



Obr.24 Ilustrácia merania č.2

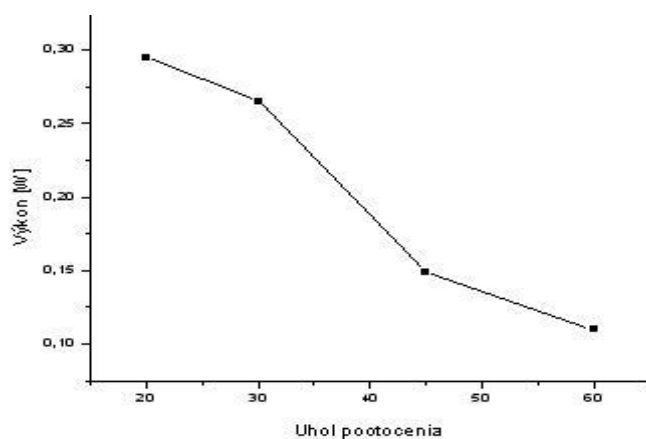
4.2.2.2 Program pre meranie č. 2

Cez Lego Mindstorms som si vytvorila program, ktorý meral hodnotu príkon a zároveň ma upozornil, kedy skončila doba merania. Program bol rovnaký ako v prvom prípade, akurát som ho doplnila o blok motora, kde som v nastaveniach zadávala o koľko stupňov sa má otočiť turbína. Zaškrtnula som port, kde je ku NXT kocke pripojený motor, teda A. Nastavenia energometra a zvukového bloku ostávajú nemenné.



Obr.25 Ukážka programu a nastavenia programu merania č.2

4.2.2.3 Vyhodnotenie merania č. 2



Graf č. 2 Závislosť výkonu od uhla pootočenia turbíny

Z nameraných údajov (uvedené v Tabuľke č. 2: Namerané hodnoty pre pootočenie turbíny od zdroja vetra) vyplýva, čím bližšie je turbína viac otočená od zdroja vetra, tým je výkon menší.

Ostatné namerané hodnoty sú uvedené v Prílohe A Tabuľky.

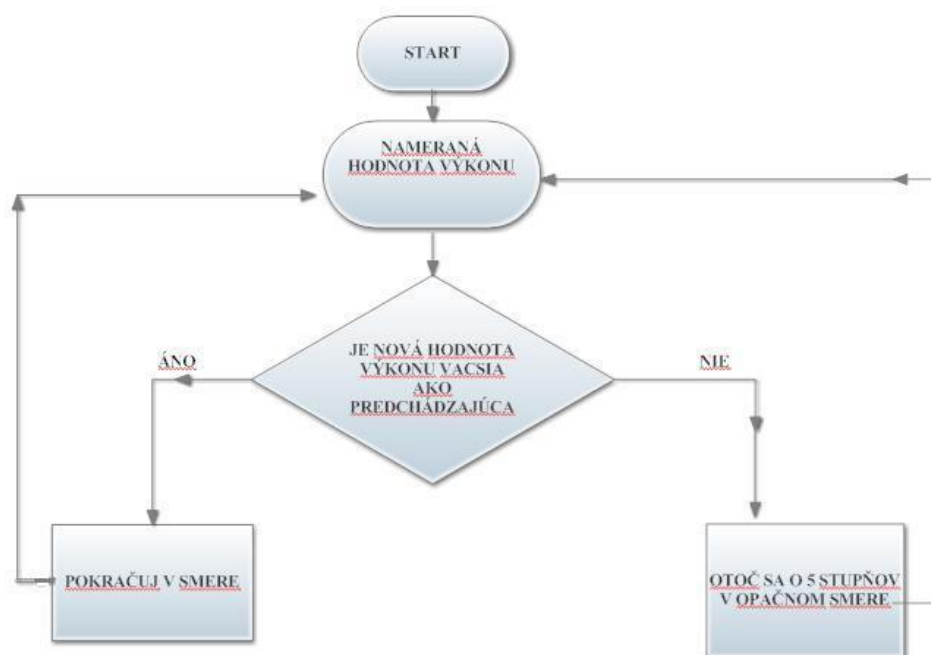
Tabuľka č.2: Namerané hodnoty pre pootočenie turbíny od zdroja vetra

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uhol pootočenia	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	60	8	8,8	2,0	0.055	0,110
3	45	9	8.8	2,3	0,065	0,1495
3	30	19	8,9	3,2	0,083	0,2656
3	20	14	8,8	3,5	0,082	0,295

4.3 Riadenie veternej elektrárne

4.3.1 Riadenie na maximálny výkon

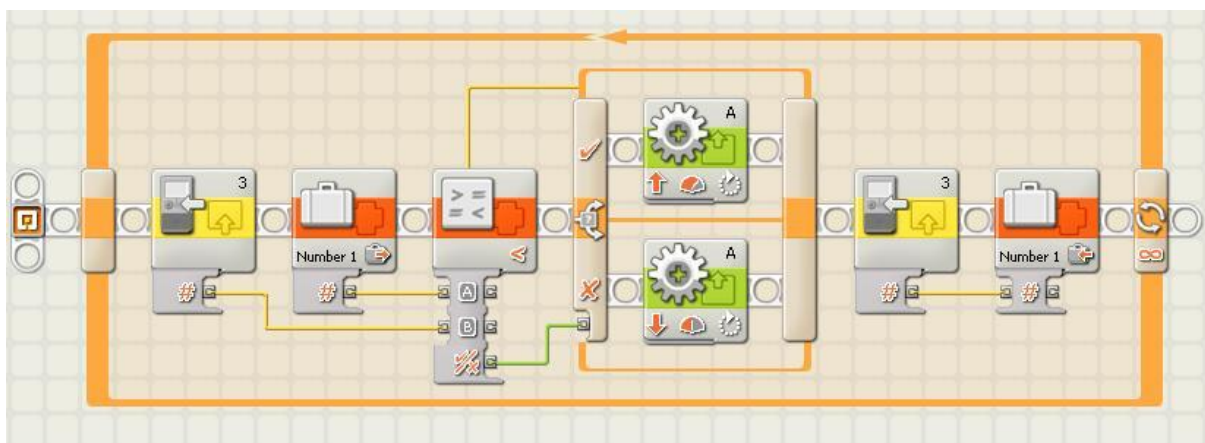
Riadenie predstavuje cyklus, kde sa porovnáva nameraná hodnota výkonu. Ak je vyhodnotená ako hodnota blízka k maximálnej, veterná turbína pokračuje v smere. Aj je nameraný údaj menší ako maximálny turbína sa pootočí o 5 stupňov opačným smerom



.Obr.26 Algoritmus riadenia na maximálny výkon

4.3.1.1 Program riadenia na maximálny výkon

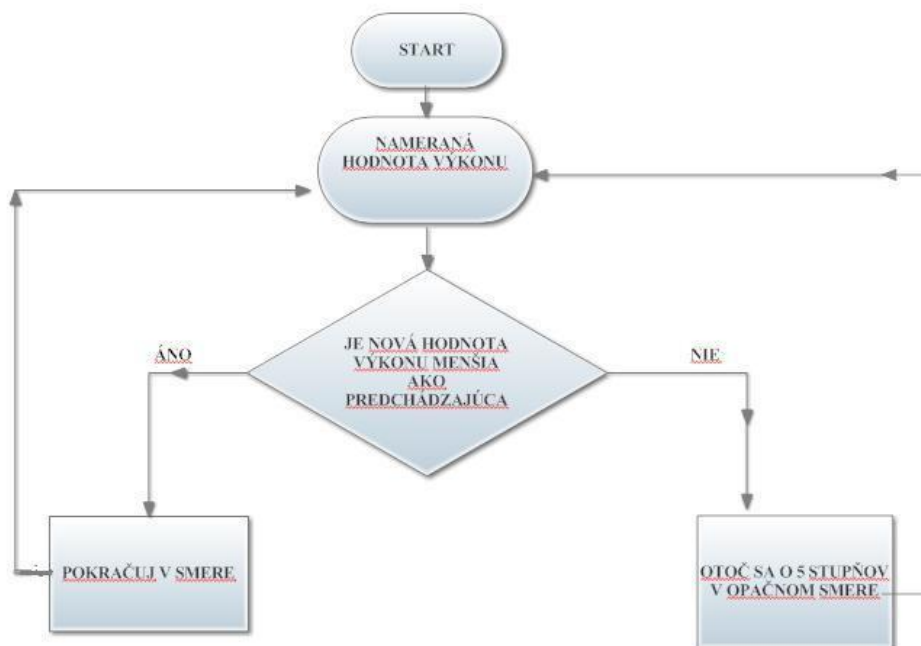
Cyklus programu reprezentuje blok Loop. Nameraná hodnota výkonu (Blok energometra) sa porovnáva prostredníctvom Porovnávajúceho bloku s predošlou nameranou hodnotou uloženou v bloku Variable. Výsledok je vstup do bloku Switch, ak je nameraná hodnota vyhodnotená ako väčšia, turbína pokračuje v danom smere. Ak je menšia, turbína sa pootočí o 5 stupňov v opačnom smere. Pootočenie rieši blok Move. V jeho nastavovacom paneli som zadala o koľko stupňov sa má motor pootočiť.. Nasleduje ďalšie meranie (Blok Energometra) a celý cyklus sa opakuje.



Obr.27 Program Riadenia na maximálny výkon

4.3.2 Riadenie na minimálny výkon

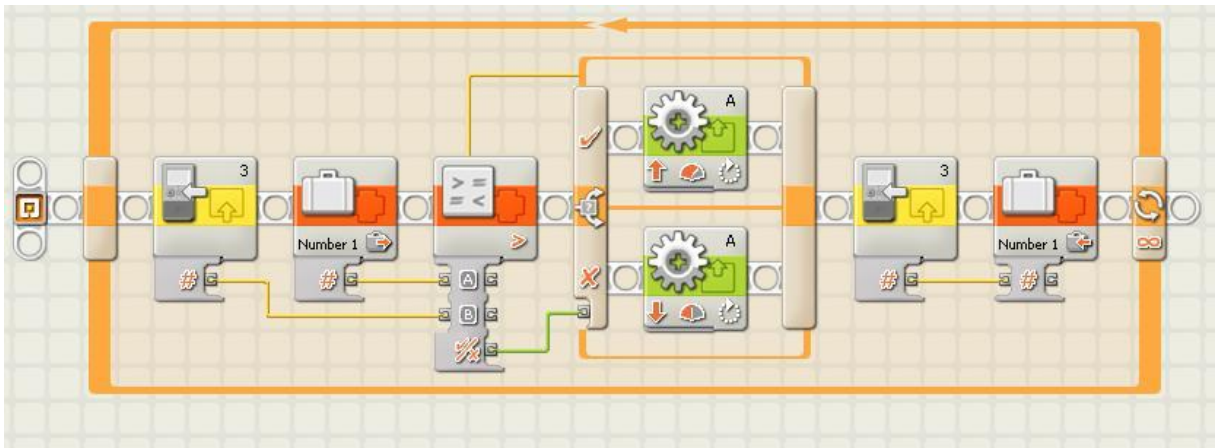
Riadenie predstavuje cyklus, kde sa porovnáva nameraná hodnota výkonu. Ak je vyhodnotená ako hodnota blízka k minimálnej, veterná turbína pokračuje v smere. Ak je nameraný údaj väčší ako daná hodnota turbína sa pootočí o 5 stupňov opačným smerom.



Obr. 28 Algoritmus riadenia na minimálny výkon

4.3.2.1 Program riadenia na minimálny výkon

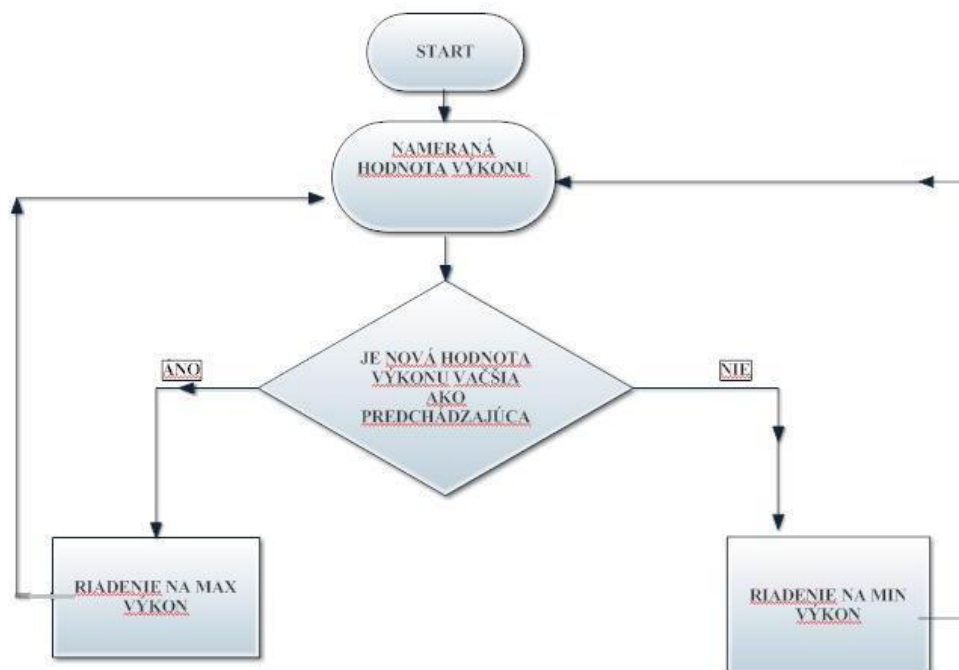
Cyklus programu reprezentuje blok Loop. Nameraná hodnota výkonu (Blok energometra) sa porovnáva prostredníctvom Porovnávacúceho bloku s predošlou nameranou hodnotou uloženou v bloku Variable. Výsledok je vstup do bloku Switch, ak je nameraná hodnota vyhodnotená ako menšia, turbína pokračuje v danom smere. Ak je väčšia, turbína sa pootočí o 5 stupňov v opačnom smere. Pootočenie rieši blok Move. V jeho nastavovacom paneli som zadala o koľko stupňov sa má motor pootočiť. Nasleduje ďalšie meranie (Blok Energometra) a celý cyklus sa opakuje.



Obr. 29 Program riadenia na minimálny výkon

4.3.3 Riadenie na želaný výkon

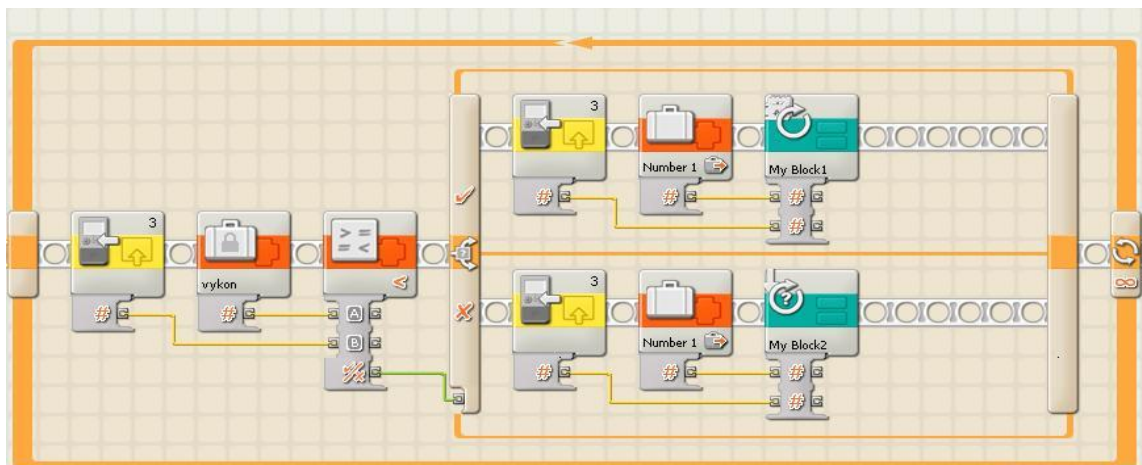
Riadenie predstavuje cyklus, kde sa porovnáva nameraná hodnota výkonu zo zvolenou žiadanou hodnotou. Ak je menšia, spustí sa riadenie na maximálny výkon. V opačnom výkone sa spustí program riadenia minimálneho výkonu.



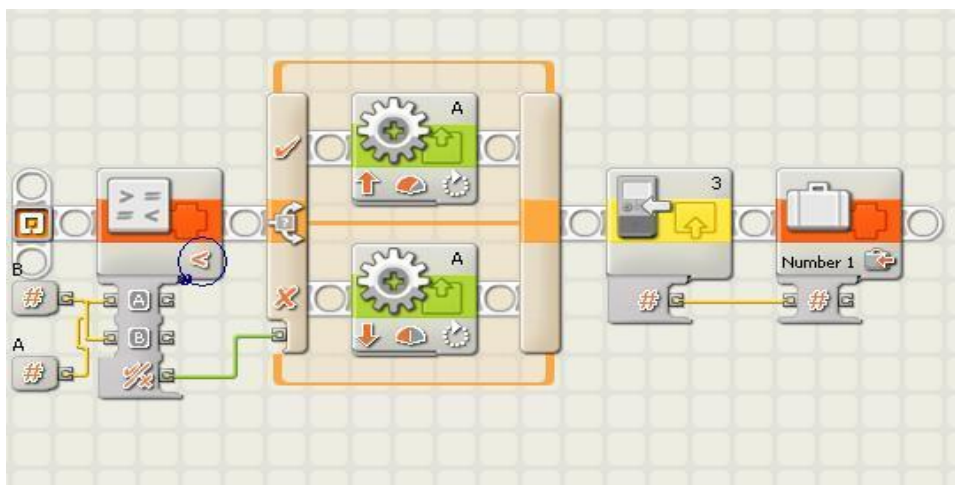
Obr.30 Algoritmus riadenia na želaný výkon

4.3.2.1 Program riadenia na želaný výkon

Cyklus programu reprezentuje blok Loop. Nameraná hodnota výkonu (Blok energometra) sa porovnáva prostredníctvom porovnávajúceho bloku so zvolenou želanou hodnotou výkonu. Výsledok je vstup do bloku Switch. Ak je daná hodnota menšia, turbína pokračuje v smere. Ak je hodnota menšia, turbína sa pootočí o 5 stupňov v opačnom smere. Kvôli prehľadnosti programu som si vytvorila dva bloky My Block1 a My Block2, kde My Block1 je takmer celý program riadenia na maximálny výkon a My Block2 program riadenia na minimálny výkon. Rozdiel medzi My Block1 a My Block2 je v nastavení Porovnávajúceho bloku. Pre My Block 1 porovnáva či je nameraná hodnota menšia ako predchádzajúca a My Block2 či je väčšia (Obr.32 My Block 1).



Obr. 31 Program Riadenia na želaný výkon



Obr. 32 My Block1

Záver

Hlavným cieľom práce bolo overiť vhodnosť použitia softvéru Lego Mindstorms Education NXT a aplikovať ho na riadenie modelu veternej elektrárne zhotovenej zo stavebníc Lego Mindstorms. Softvér a prácu s ním som popísala v teoretickej časti. V ďalších kapitolách som sa venovala popisu jednotlivých častí môjho modelu veternej elektrárne a popisu a princípu fungovania reálnej veternej elektrárne.

Praktickou úlohou mojej práce bolo navrhnúť prostredníctvom softvéru Lego Mindstorms Education NXT riadenie modelu veternej elektrárne. Navrhla tri rôzne riadenia. Riadenia na maximálny a riadenia na minimálny výkon fungovali podobne. Princíp ich riadenia spočíval v porovnaní nameranej hodnoty výkonu a predchádzajúcej hodnoty. Podmienka pri riadení na maximálny (minimálny) výkon bola, aby nová nameraná hodnota bola väčšia (menšia) ako predchádzajúca. Pokiaľ bola vyhodnotená kladne, turbína pokračovala v smere, v ktorom sa otáčala. V opačnom prípade sa pootočila o päť stupňov v opačnom smere. Obe riadenia fungovali na podobnom princípe ako dvojpolohový regulátor.

Posledné riadenie, ktoré som navrhla bolo riadenie na želaný výkon. Toto riadenie bolo z veľkej miery kombináciou predchádzajúcich riadení. Prepínanie medzi nimi určovala hodnota výkon. Ak bola menšia, spustilo sa riadenie na maximálny výkon. V opačnom výkone sa spustil program riadenia minimálneho výkonu.

Literatúra

[1] Vetrné elektrárne, [online], [cit. 2013-03-12]. Dostupné na internete:

https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:ZtGczDPUm3wJ:www.e-learning-centrope.sk/data/files/63.doc+&hl=cs&pid=bl&srcid=ADGEEShKilyMyArGl1kS5Px293bL5NYGkGCLk3Peq3i5keS6L03MexF6UAewQosha2vRWkXukLQIFJAXCu3DMv7zsb6JSgy0SLZa6IiZXCXRNkvHrD-ZAwLwVwGHiZtT5vpnM0RLF1og&sig=AHIEtbT2Joal3eASS5V746D_xTJ8p--kRA

[2] Vetrné elektrárne, , [online], [cit. 2013-03-13]. Dostupné na internete:

<http://www.posterus.sk/?p=11191>

[3] Větrná energie, [online], [cit. 2013-03-14]. Dostupné na internete:

http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie

[4] Obnoviteľné zdroje energie – energia bez konca, [online], [cit. 2013-03-15].

Dostupné na internete:

<https://OBNOVITELNE%20ZDROJE%20ENERGIE%20...%20ENERGIA%20BEZ%20KONCA.htm>

[5] Konštrukcia veternej turbíny, [online], [cit. 2013-03-15]. Dostupné na internete:

http://www.priateliazeme.sk/cepa/eportal/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=113

[6] Mindstorms education – Metodika NXT © 2006 The Lego Group.

[7] Getting Started With the LEGO® Energy Meter– Metodika NXT © 2010 The Lego Group.

Príloha A Tabuľky

Vzdialenosť: 30 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	22	9,8	2,9	0.107	0,3173
2	16	8.9	2.7	0.085	0,2295
1	10	8.8	2.6	0.063	0,1638

Vzdialenosť: 20 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	24	8,9	4,1	0,102	0,4182
2	18	8,8	3,6	0.091	0,3276
1	11	8,7	2,8	0.074	0.2072

Vzdialenosť: 40 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	15	9,0	3,0	0.088	0,264
2	11	8,9	2,6	0,078	0,2028
1	8	8,9	2,4	0,055	0,132

Uhol pootočenia: 45 °

Vzdialenosť: 30 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	9	8,8	2,3	0,065	0,1495
2	7	8,8	2,1	0,053	0,1113
1	4	8,8	2,0	0,033	0,066

Vzdialenosť: 20 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	16	8,9	3,5	0,097	0,3395
2	9	8,9	2,9	0,060	0,174
1	5	8,8	2,5	0,043	0,1075

Vzdialenosť: 40 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	5	8,8	2,4	0,034	0,0816
2	4	8,8	2,1	0,027	0,0567
1	3	8,8	2,0	0,021	0,042

Uhol pootočenia: 30°

Vzdialenosť: 30 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	19	8,9	3,2	0,083	0,2656
2	9	8,8	2,8	0,062	0,1736
1	7	8,8	2,4	0,049	0,1176

Vzdialenosť: 20 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	21	8,9	3,4	0,107	0,3638
2	14	8,9	3,1	0,091	0,2821
1	8	8,8	2,4	0,056	0,1344

Vzdialenosť: 40 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	7	8,8	2,3	0,043	0,0989
2	6	8,8	2,1	0,031	0,0651
1	3	8,8	2,0	0,014	0,028

Uhol pootočenia: 20°

Vzdialenosť 30 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	14	8,8	3,5	0,082	0,295
2	11	8,8	2,8	0,074	0,2072
1	7	8,8	2,4	0,054	0,1296

Vzdialenosť: 20 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	18	8,8	3,1	0,098	0,3038
2	16	8,8	2,9	0,070	0,203
1	9	8,8	2,5	0,045	0,1125

Vzdialenosť: 40 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	9	8,8	2,3	0,067	0,1541
2	5	8,8	2,1	0,033	0,0693
1	3	8,7	2,0	0,021	0,042

Uhol pootočenia 60°

Vzdialenosť 30 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	8	8,8	2,0	0.055	0,110
2	5	8,8	1,8	0,044	0,079
1	3	8,8	1,7	0.028	0,047

Vzdialenosť 20 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	11	8,9	2,9	0,078	0,226
2	7	8,9	2,3	0.057	0,131
1	5	8,8	1,9	0,039	0,075

Vzdialenosť 40 cm

Stupeň rýchlosti ventilátora	Uložená energia J	Výstupné napätie V	Vstupné napätie V	Vstupný prúd A	Vstupný príkon W
3	5	8,8	2.1	0.046	0,096
2	3	8,8	2,0	0.038	0,076
1	2	8,8	1,9	0.029	0,055