

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

LUKÁŠ KADLEC

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta Elektrotechniky a Informatiky

Fotovoltaická meteorologická stanice

Autor práce: Lukáš Kadlec

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Štěpánek

Bakalářská práce

2009

University of Pardubice

Faculty of Electrical Engineering and Informatics

Photovoltaic meteorological station

Author: Lukáš Kadlec

Supervisor: Ing. Ladislav Štěpánek

Bachelor work

2009

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

Navrhněte optimální ovládání pohybu solárního panelu pomocí mikropočítače. Zařízení doplňte o měřiče fyzikálních veličin (teplota solárních článků, teplota a tlak v okolí solárního panelu, okamžitý výkon solárních článků, atd.). Naměřené hodnoty zaznamenávejte a graficky zpracujte na displeji počítače.

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16. 5. 2009

Lukáš Kadlec

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Štěpánkovi za rady, připomínky a pomoc při výběru návrhu a při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

V této práci je popis základních částí malé meteorologické stanice a jejich vzájemná interakce. Zařízení je napájeno ze solárních článků, o ovládání se stará mikroprocesor. Stanice umožňuje měřit tlak, vlhkost, teplotu a intenzitu slunečního záření.

Klíčová slova

Meteorologická; měření tlaku; měření vlhkosti; měření teploty; solární

Abstract

In this work is the description of basic parts of a meteorological station and their interaction. The device is powered by solar cells and commanded by a microprocessor. The station can be used to pressure, humidity and temperature measurements and gauging the intensity of solar radiation.

Key words:

Meteorological; pressure measurement; humidity measurement; temperature measurement; solar

Obsah:

1.	POPIS ZAŘÍZENÍ	14
1.1.	ELEKTRICKÁ ČÁST	14
1.2.	MECHANICKÁ ČÁST.....	15
2.	JEDNOTLIVÉ ČÁSTI.....	22
2.1.	FOTOČLÁNKY.....	22
2.1.1.	Náhradní schéma fotočlánku.....	23
2.1.2.	Výroba.....	24
2.1.3.	Solární panel.....	25
2.2.	DC/DC	29
2.2.1.	Step-Down regulátory	30
2.2.2.	Step-Up regulátory	31
2.2.3.	Invertující měnič	31
2.3.	LT1073.....	32
2.3.1.	Princip fungování obvodu LT1073	33
2.3.2.	Výběr tlumivky	34
2.3.3.	Výběr kondensátoru	36
2.3.4.	Výběr diody.....	37
2.3.5.	Step-Up (Boost Mode).....	37
2.3.6.	Využití omezení proudu.....	38
2.4.	MCU.....	40
2.5.	USB	41
2.6.	VLHKOST A TEPLOTA	42
2.7.	TLAK	43
2.8.	HODINY.....	45
2.9.	PAMĚŤ.....	45
2.10.	H-MŮSTEK	45
2.11.	MOTORY	47
3.	PROGRAM PRO MIKROPROCESOR	50
4.	PROGRAM PRO PC	51
5.	MĚŘENÍ	52

Seznam obrázků:

OBR. 1 NAPÁJECÍ CESTY	14
OBR. 2 SIGNÁLOVÉ CESTY	15
OBR. 3 PŘEDNÍ POHLED	16
OBR. 4 POHLED ZE STRANY	17
OBR. 5 POHLED ZE ZADU	18
OBR. 6 DETAIL PODSTAVCE A SPÍNAČE POLOHY	19
OBR. 7 MOTORY	20
OBR. 8 PODSTAVEC ZESPODU	20
OBR. 9 ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA	21
OBR. 10 ŘEZ FOTOVOLTAICKÝM ČLÁNKEM	22
OBR. 11 NÁHRADNÍ SCHÉMA SOLÁRNÍHO ČLÁNKU [7]	23
OBR. 12 PRŮMĚRNÉ MNOŽSTVÍ DOPADAJÍCÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ ZA ROK NA ÚZEMÍ ČR v kWh/m ² , ZÁŘENÍ DOPADÁ NA VODOROVNOU PLOCHU [3]	27
OBR. 13 SOLÁRNÍ ŘEZ	27
OBR. 14 SCHÉMA POSPOJOVÁNÍ ŘEZŮ	29
OBR. 15 TYPICKÉ ZAPOJENÍ DC/DC PŘEVODNÍKU (STEP-DOWN)	29
OBR. 16 STEP DOWN REGULÁTOR	30
OBR. 17 STEP UP REGULÁTOR	31
OBR. 18 INVERTUJÍCÍ MĚNIČ	31
OBR. 19 BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODU LT1073	33
OBR. 20 MAXIMÁLNÍ SPÍNANÝ PROUD V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ	36
OBR. 21 ZAPOJENÍ LT1073 JAKO STEP-UP MĚNIČE	38
OBR. 22 ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍHO SPÍNANÉHO PROUDU NA ODPORU R _{LM}	39
OBR. 23 PRŮBĚH NAPĚTÍ NA TLUMIVCE	40
OBR. 24 SENZOR TEPLoty A VLHKOSTI	42
OBR. 25 SENZOR TLAKU	44
OBR. 26 VNITŘNÍ PRŮŘEZ ČIDLEM TLAKU	44
OBR. 27 STRUKTURA H-MŮSTKU (ČERVENĚ ZVÝRAZNĚN)	46
OBR. 28 ZAPOJENÍ H-MŮSTKU S MOSFET [1]	47
OBR. 29 PRINCIP ČINNOSTI STEJNOSMĚRNÉHO STROJE [5]	48
OBR. 30 PRINCIP OTÁČENÍ PODLE JEDNÉ OSY	49
OBR. 31 VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU PRO MIKROPROCESOR	50

OBR. 32 OKNO HLAVNÍHO PROGRAMU	51
OBR. 33 HODNOTY NAMĚŘENÉ POMOCÍ 100W ŽÁROVKY NA 1 SOL. ŘEZU	52
OBR. 34 HODNOTY NAMĚŘENÉ NA SESTAVENÉM SOL. PANELU	53
OBR. 35 PRŮBĚH TLAKU BĚHEM DNE	53
OBR. 36 PRŮBĚH VLHKOSTI BĚHEM DNE	54
OBR. 37 PRŮBĚH TEPLoty BĚHEM DNE	54

Seznam zkratk:

CMOSens	spojení analogového senzoru a digitálního zpracování
DC/DC	převodník mezi stejnosměrnými napětími
EMI	Elektromagnetické rušení
I2C.....	protokol pro digitální komunikaci mezi zařízeními
MCU.....	mikrokontrolér
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor polem řízený tranzistor
RH	relativní vlhkost
Step Up.....	spínaný měnič s výstupním napětím větším než vstupním
Step Down.....	spínaný měnič s výstupním napětím menším nebo stejně velkým jako vstupní
TWI.....	to samé co I2C
OS-CON	speciální kondenzátory s pevným dielektrikem na jednom čipu
OTP	One-Time Programmable – jen jednou naprogramovatelná paměť
Pull-Up	odpor sloužící k zvýšení potenciálu na uzlu

Úvod

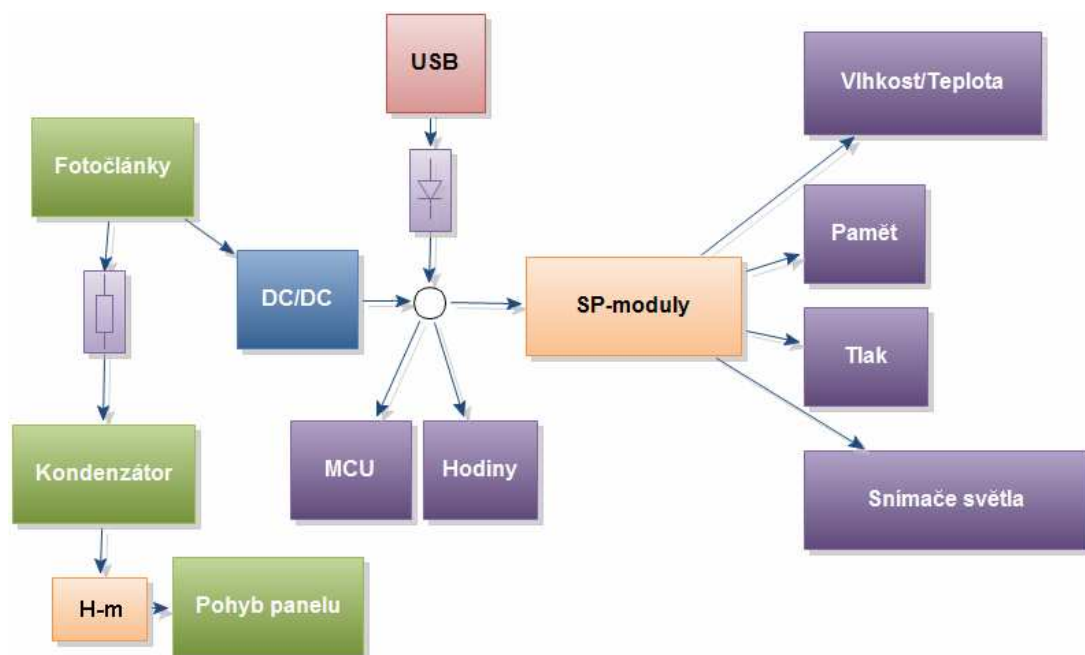
V poslední době se stále více dostávají do popředí alternativní zdroje energie. Více či méně většina z nich je založena na energii, která se k nám dostává ze Slunce. Z obnovitelných zdrojů je to především energie větrná a energie slunečního záření. K přímé výrobě elektřiny ze slunečního záření se využívají fotovoltaické články. Ty jsou vhodné zejména pro zařízení, která jsou na odlehlejších místech a tedy bez možnosti přímého připojení k elektrické síti. Hlavní nevýhody jsou vysoká pořizovací cena a velká závislost na počasí a denní a roční době.

V této bakalářské práci jsem se pokusil navrhnout zařízení, které bude mít jako hlavní zdroj energie solární články, které se budou automaticky směřovat ke Slunci. Zároveň bude přebytečná energie využita k napájení řídicí logiky a senzorů. Díky tomu je zařízení nezávislé na rozvodné síti a může být postaveno a provozováno kdekoliv, kde je dostatek světelného záření.

Bakalářská práce má tři hlavní části. V první kapitole jsou popsány jednotlivé dílčí části a jejich vzájemné zapojení. Druhá část popisuje programovou stránku a ve třetí kapitole jsou vyhodnocena měření na vlastních čidlech.

1. Popis zařízení

1.1. Elektrická část

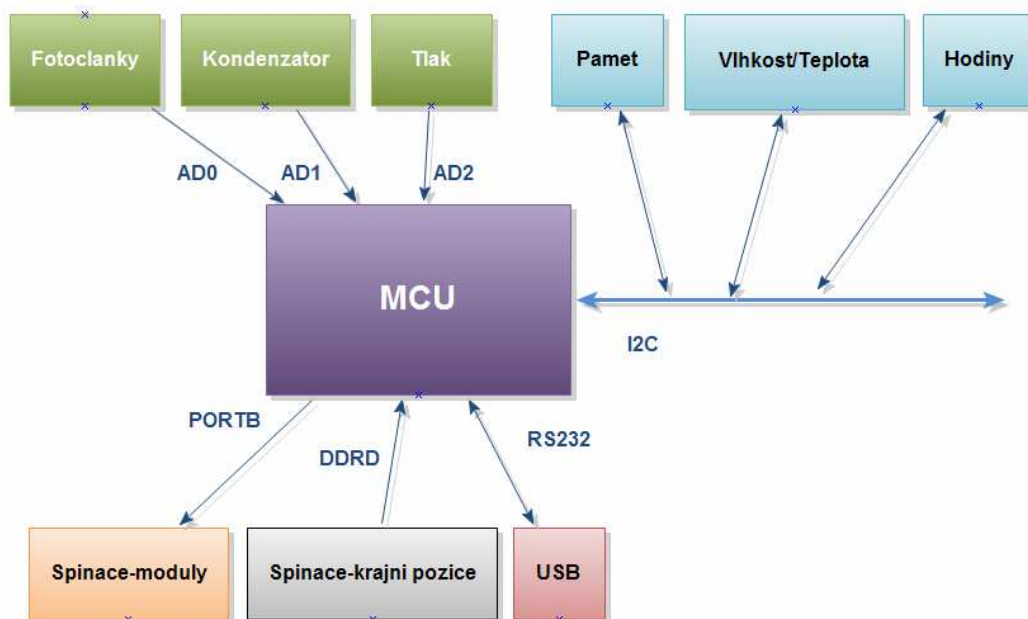


Obr. 1 Napájecí cesty

Na Obr. 1 je zjednodušeně zobrazeno vzájemné propojení modulů z hlediska napájení. Toto byl návrh, se kterým jsem začal pracovat. Hlavním zdrojem energie jsou fotočlánky. Ty dodávají napájecí napětí DC/DC převodníku a do kondenzátoru. Kondenzátor je připojen přes odpor kvůli omezení nabíjecího a případně vybíjecího proudu. Díky tomu nejsou ohroženy solární panely zpětným proudem a zároveň jde do kondenzátoru jen tolik energie, kolik je potřeba, aby nebyl ohrožen chod zbytku zařízení.

DC/DC měnič stabilizuje vstupní napětí na 5V. Měnič jsem použil kvůli nestálému množství dopadajícího záření a tím se měnícímu napětí, které by bylo dodáváno do řídicích a měřicích obvodů. Stabilizované napětí je pak dodáváno do mikroprocesoru a hodinového obvodu. Pomocí spínačů (SP-moduly) se přivádí napájení také do pomocných obvodů jako je paměť, snímač tlaku, čidlo vlhkosti...

Po připojení zařízení k PC se zařízení napájí z USB. Napájení do motoru zajišťuje spínač H-m, který je tvořen H-můstkem. Všechny spínače jsou ovládány pomocí mikroprocesoru.



Obr. 2 Signálové cesty

Mimo silových cest musí být moduly propojeny i datově. Zjednodušeně je to vidět na Obr. 2. Hlavní řídicí člen je MCU (mikroprocesor). Ten zpracovává jednotlivé vstupy a podle nich určuje další činnosti. Po zapnutí, tj. přivedení dostatečného napájecího napětí z DC/DC převodníku procesor začne monitorovat okolí pomocí AD převodníku. Napětí z fototranzistorů rozhoduje v kterém směru od panelu je více světla a tudíž, kam by se měl natočit. Pokud je na kondenzátoru dostatečné napětí, procesor připojí na určitou dobu jeden z motoru ke kondenzátoru. Spínače krajní polohy zabraňují přetočení motorů.

V pravidelných intervalech jsou zaznamenávány údaje z čidel do přídavné paměti. Čidla jsou zapínána jen v případě potřeby kvůli šetření energií. Většina modulů je připojena přes sběrnici I2C.

Vlastní zapojení jednotlivých modulů je v příloze A.

1.2. Mechanická část

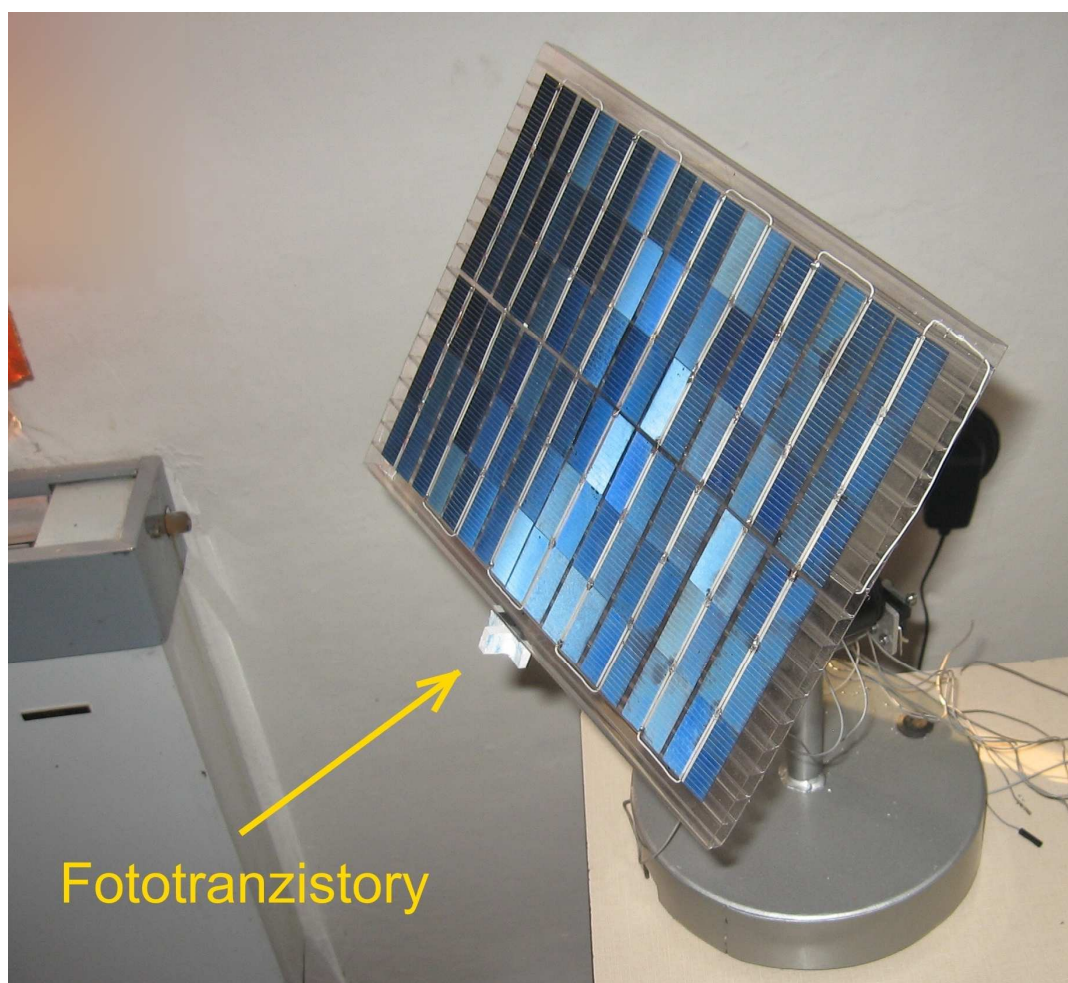
Zařízení váží zhruba 2 Kg, většina dílů je zhotovena z ocelového plechu a ocelových trubek. Prostor potřebný k funkci zařízení je 40x40x40 cm. Celou konstrukci je možné rozdělit na 3 základní části: solární panel, motorová část a podstavec s elektronikou.

Na Obr. 3 je zobrazen přední pohled na celé zařízení. Tmavě modrá část je solární panel. Jednotlivé solární řezy jsou přilepeny k plastové základně pomocí oboustranné lepicí pásky. Díky ní drží články pevně a přitom pružně. Jediná možnost, jak je později oddělit je odřezáním pásky pomocí žiletky. Elektrické pospojování je realizováno pomocí tenkého měděného drátku. Vývody poté vedou skrz plastovou základnu doprostřed ke kostře a dále do základny.



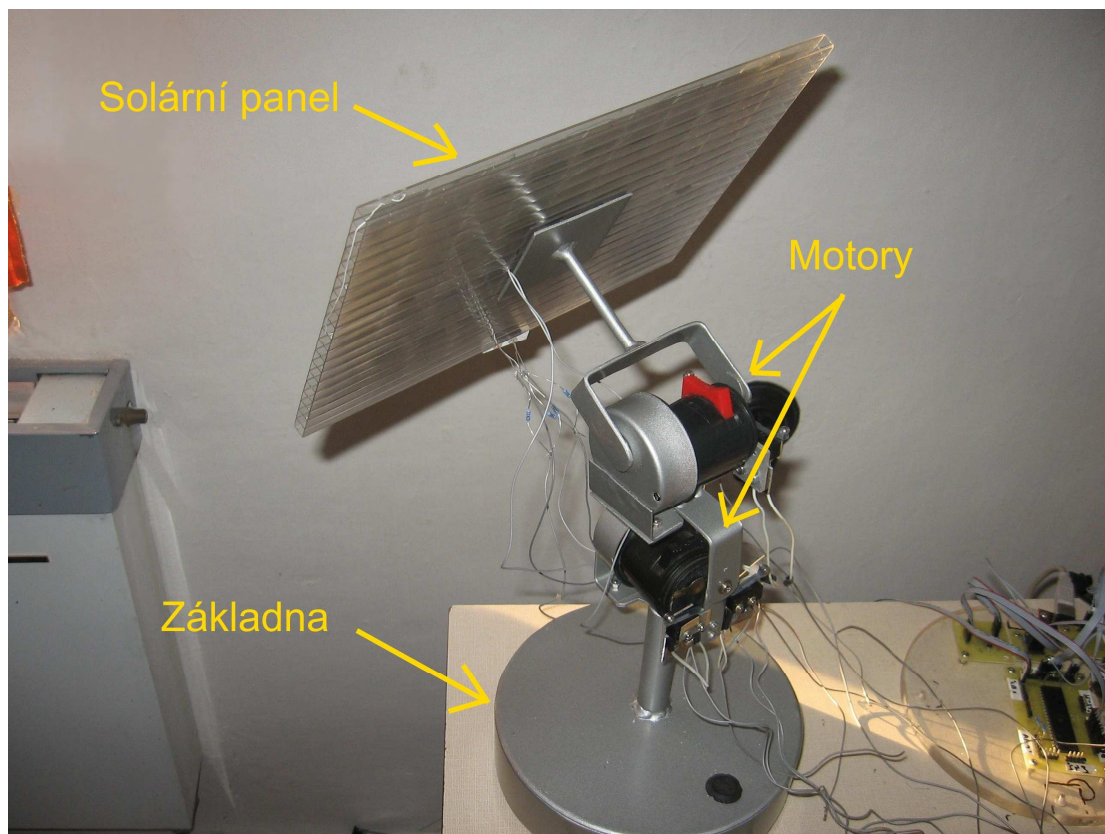
Obr. 3 Přední pohled

Jiný pohled na solární panel je na Obr. 4. Je vidět žebrování plastové základny. Díky této konstrukci je pevná a zároveň lehká. Také jsou ve spodní části vidět fototranzistory sloužící k určení směru, ze kterého přichází nejvíce světla. Mezi dvěma fototranzistory je vždy stínítko, které vrhá stín na snímač, který je směrem od zdroje světla. Díky tomu je u každého fototranzistoru vystavena jeho báze jinému množství světla.



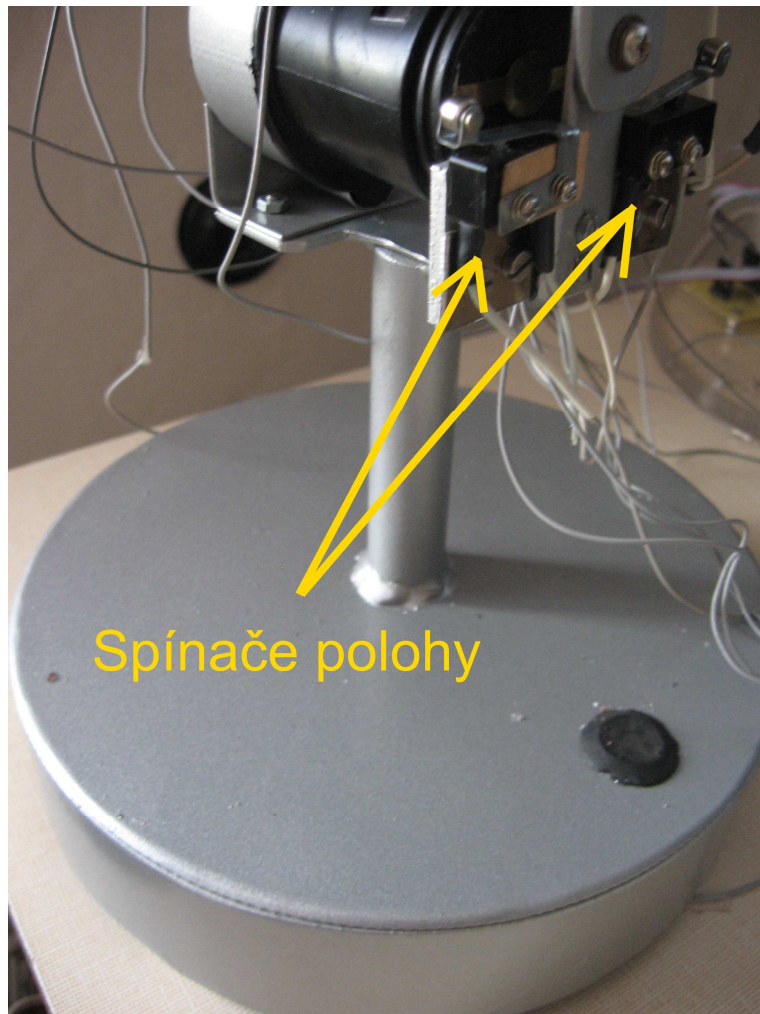
Obr. 4 Pohled ze strany

Solární panel je připojen k motoru pomocí krátké kovové tyče (Obr. 5). Na tyč je přivařena kovová destička, ke které je pomocí oboustranné lepicí pásky připojen plastový základ panelu.



Obr. 5 Pohled ze zadu

K zabránění přetočení motorů mimo požadovaný rozsah slouží spínače po stranách motoru (Obr. 6). Jak se otáčí osa motoru, postupně tlačí na plechový jazýček, který tvoří i určité utlumení nárazu. Když je tlak dostatečný, spínač sepne a díky tomu řídicí jednotka ví, kam je osa motoru natočena a přestane posílat příkazy k otočení v daném směru.



Obr. 6 Detail podstavce a spínače polohy

O vlastní natáčení se starají dva motory s převodovkou (Obr. 7). Jsou to dva stejné motory, které jsou navzájem spojeny pomocí plechu ve tvaru „U“. Tento plech je pevně spojen s osou jednoho a kostrou druhého. Více o funkci natáčení je popsáno v kapitole 2.11.



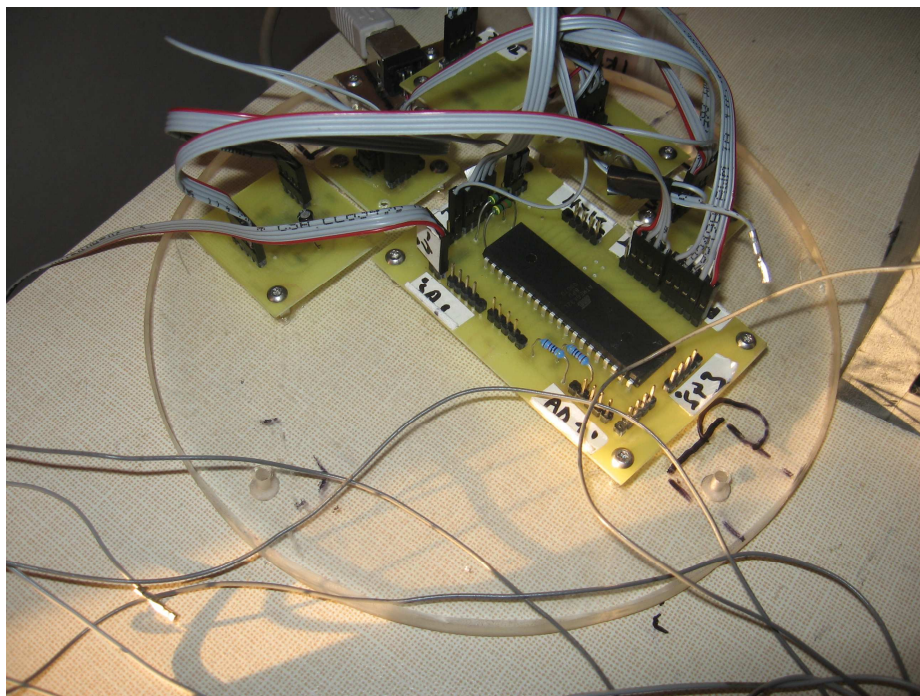
Obr. 7 Motory

Kulatá základna je dutá, aby mohla pojmout elektroniku, a jsou k ní přivařeny 4 plechy určené k přišroubování plastového podkladu s elektronikou. Vlevo dole na Obr. 8 je gumová průchodka pro přívod vodičů k motorům a solárnímu panelu. Vpravo nahoře je vyřezaná díra pro konektor USB.



Obr. 8 Podstavec zespodu

Obr. 9 zobrazuje desky plošných spojů s řídicí elektronikou přišroubované k plexisklové základně pomocí distančních šroubků. V základně jsou vyvrtány 4 díry pro vruty, s kterými se přišroubovává dospodu kovového stojanu.



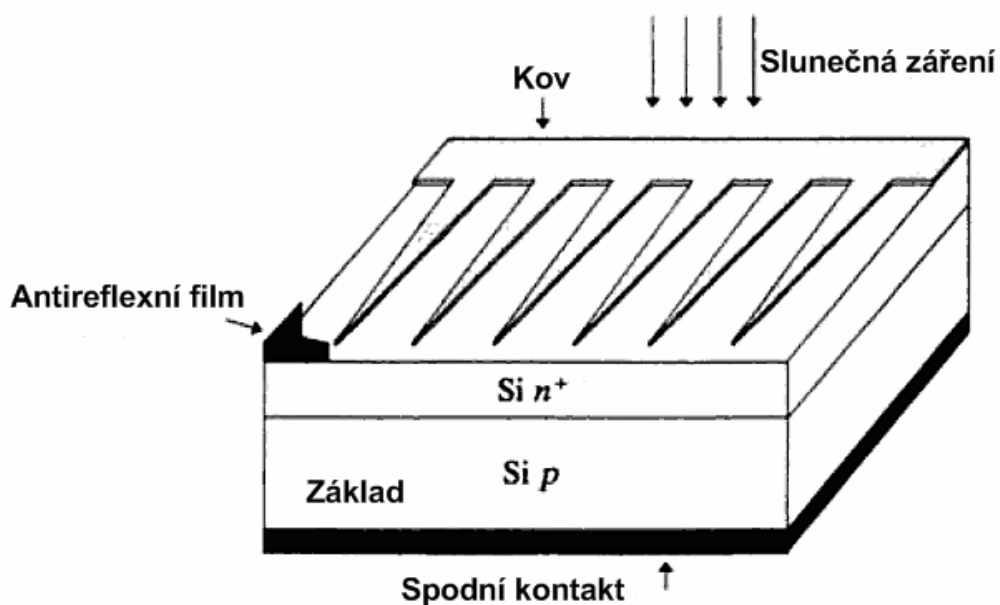
Obr. 9 Řídicí elektronika

2. Jednotlivé části

2.1. FOTOČLÁNKY

Solární články jsou zařízení, které mění sluneční energii přímo na elektrickou. K tomu je využíván fotovoltaický efekt.

Nejrozšířenější solární články jsou ve své podstatě vlastně velký p-n přechod vyrobený z křemíku (Obr. 10). Vyrábějí se difuzí příměsí typu n do p waferu (nebo naopak). Pokud je křemík typu p v těsném kontaktu s křemíkem typu n, pak proběhne difuze elektronů z oblasti jejich vysoké koncentrace (n část přechodu) do oblastí s nízkou koncentrací elektronů (p část přechodu). Když tedy elektrony proudí do p vrstvy, rekombinují vlastně s dírami. Tato difuze ovšem neprobíhá nekonečně dlouho. Díky elektrickému poli, které je tvořeno nepoměrem mezi nábojem na obou stranách přechodu způsobenému difuzí se rekombinace zastaví. Elektrické pole vytvořené napříč p-n přechodem tvoří diodu, která podporuje průchod náboje známého jako driftový proud. Oblast, kde elektrony a díry zrekombinovaly napříč přechodem, je nazývána vyprázdňená oblast, protože už dále neobsahuje žádné volné nosiče náboje.

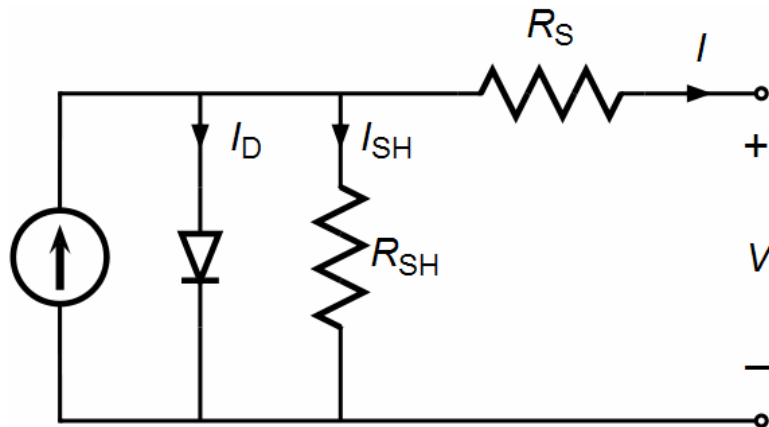


Obr. 10 Řez fotovoltaickým článkem

Díky elektrickému poli vlastně solární články mohou fungovat. Toto pole zabraňuje okamžité kombinaci nosičů náboje. Určitá část nosičů ale stejně zrekombinuje, a to vyjadřuje proud diodou D1 v náhradním schématu (Obr. 11).

Fotony, které dosáhnou vnitřku článku a mají energii rovnou nebo větší, než je energie zakázaného pásu jsou pohlceny v polovodiči a generují páry elektron díra. Tyto páry pak tvoří proud, který článek dodává do zátěže.

2.1.1. Náhradní schéma fotočlánku



Obr. 11 Náhradní schéma solárního článku [7]

Z obrázku nahoře je zřejmé, že proud dodávaný solárním článkem je roven proudu vytvářenému proudovým zdrojem zmenšenému o proud procházející paralelní kombinací diody a rezistoru.

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (1.1)$$

I [A] výstupní proud

I_L [A] fotogenerovaný proud

I_D [A] proud diodou,

I_{SH} [A] proud odporem

Proud tekoucí těmito prvky je určován příčným napětím:

$$V_j = V + IR_S \quad (1.2)$$

V_j [V] napětí na diodě a rezistoru

V [V] výstupní napětí

I [A]	výstupní proud
R_S [Ω]	sériový odpor

Ze Shockleyho diodové rovnice je proud odkloněný diodou:

$$I_D = I_0 \left(\exp \left[\frac{qV_j}{nkT} \right] - 1 \right) \quad (1.3)$$

I_0 [A]	zpětný saturační proud,
n	jakost diody (1 pro ideální diodu)
q [C]	elementární náboj,
k	Boltzmanova konstanta,
T [K]	absolutní teplota

Pro křemík při teplotě 25°C, $\frac{kT}{q} \approx 0.0259V$ (tzv. teplotní napětí)

Podle Ohmova zákona je proud odkloněný paralelním rezistorem:

$$I_{SH} = V_j \frac{V_j}{R_{SH}} \quad (1.4)$$

Zařazením toho všeho do rovnice (1.1) získáme charakteristickou rovnici solárního článku, která udává vztah mezi parametry solárního článku a výstupním proudem a napětím.

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (1.5)$$

2.1.2. Výroba

Velká část dnes používaných článků je vyráběná z monokrystalického (případně polykrystalického) dopovaného P křemíku. Polykrystalické křemíkové ingoty se vyrábějí se čtvercovým průřezem, vhodným pro výrobu solárních článků. Kulaté monokrystalické ingoty se často ořezávají na pseudočtvercový průřez, aby byla lépe využitá plocha solárních panelů. Ingoty se rozřežou na tenké destičky (maximálně 1/3 mm). Na těch se pak vytvoří leptáním textura (destička zmatní a lépe pohlcuje světlo). Destička se poté dopuje fosforem, čímž se vytvoří polovodivý P-N přechod,

vybaví se antireflexní vrstvou nitridu (článek získá tmavě modrou barvu), a vodivou pastou se sítotiskem se vyrobí metalizace na zadní i přední straně. Poté se článek vypálí (sintruje) – vytvoří se vodivé propojení metalizace s křemíkem.

Hotové články se spojují do série (a/nebo paralelně) pájenými plochými kovovými pásky a montují se do fotovoltaických panelů.

2.1.3. Solární panel

Solární panel je v podstatě soustava několika fotovoltaických článků. Navrhnout solární panel přesně pro danou aplikaci není jednoduché, protože parametry I_L a I_0 z rovnice 1.5 většinou nejsou známy a nemohou být přímo změřeny. Proto se často používá toto zjednodušení.

- Vliv paralelní rezistance je zanedbatelný
- Fotogenerovaný proud I_L a zkratový proud I_{ZK} jsou si rovny
- člen $\exp((V + IR_s)/V_t)$ je > 1 ; $V_t = nKT / q$
- Všechny články jsou identické a za všech okolností se chovají stejně
- Pokles napětí ve vodičích spojujících jednotlivé články je zanedbatelný

Pro soustavu článku můžeme napsat tyto rovnice:

$$I_G = IN_P \quad (1.6)$$

$$V_G = VN_S \quad (1.7)$$

I_G [A]	proud panelu
V_G [V]	napětí panelu
N_S	počet článků v sérii
N_P	počet článků zapojených paralelně

Tenhle zjednodušený model můžeme dosadit do rovnice (1.5)

$$I_G = \left[I_L - I_0 \left(\exp \frac{V_G / N_S + I_G R_S / N_P}{V_t} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_G / N_S + I_G R_S / N_P}{R_P} \right) N_P \quad (1.8)$$

Zjednodušením rovnice pomoci předchozích předpokladů dostaneme

$$I = I_{ZK} - I_0 \cdot \exp \left(\frac{V + I R_S}{V_t} \right) \quad (1.9)$$

Pokud $I = 0$, pak dostaneme pro napětí pro otevřený okruh rovnicí

$$V_o = V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ZK}}{I_0} \right) \quad (1.10)$$

tudíž

$$I_0 = I_{ZK} \cdot \exp \left(- \frac{V_o}{V_t} \right) \quad (1.11)$$

Složením předchozích rovnic dostaneme

$$I = I_{ZK} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_o + I R_S}{V_t} \right) \right] \quad (1.12)$$

V této rovnici už není problém všechny členy jednoduše změřit. A můžeme ji popsat chování celého panelu.

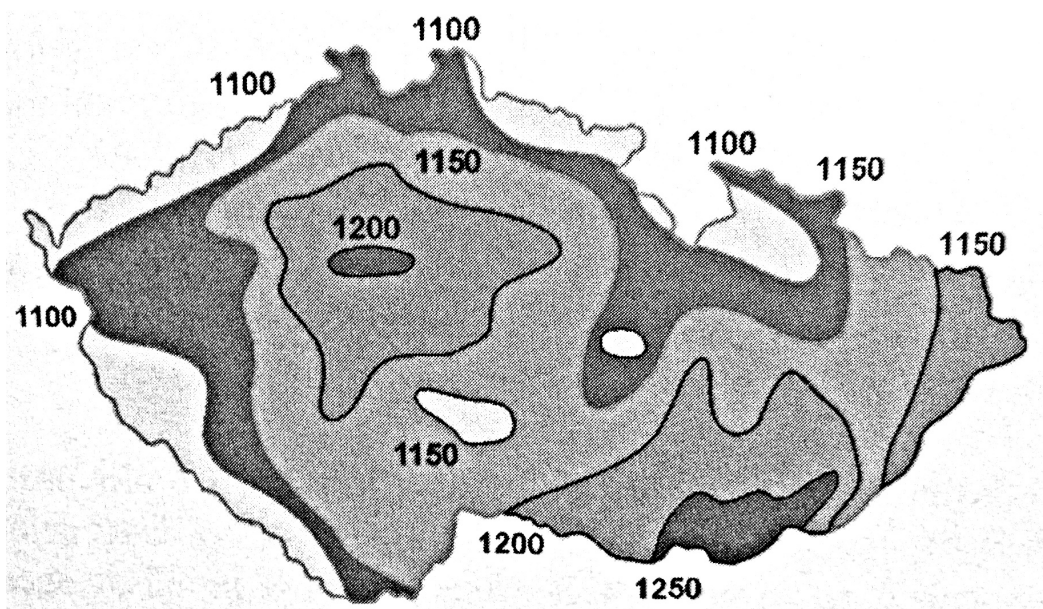
$$I_{ZKG} = I_{ZK} N_P \quad (1.13)$$

$$V_{OG} = V_o N_S \quad (1.14)$$

$$R_{SG} = \frac{R_S N_S}{N_P} \quad (1.15)$$

$$I_G = I_{ZKG} \left[1 - \exp \left(\frac{V_G - V_{OG} + I_G R_{SG}}{N_S V_t} \right) \right] \quad (1.16)$$

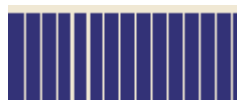
I_{ZKG} [A]	zkratový proud panelu
V_{OG} [V]	napětí na svorkách nezatíženého panelu
R_{SG} [Ω]	sériová rezistence



Obr. 12 Průměrné množství dopadajícího slunečního záření za rok na území ČR v kWh/m², záření dopadá na vodorovnou plochu [3]

V České republice nejsou úplně ideální podmínky pro využívání sluneční energie. Největším problémem je častá oblačnost, která zásadně snižuje maximální výkon solárních panelů. I přesto však nelze Slunce jako zdroj energie opomíjet. Jak je vidět z Obr. 12 Průměrné množství dopadajícího slunečního záření za rok na území ČR v kWh/m², záření dopadá na vodorovnou plochu za celý rok dopadne na m² energie přesahující 1000 kWh. To dělá zhruba 2,7 kWh/m² denně.

V mé konstrukci jsem použil řezy článků od firmy Solartec. Jsou to zbytky po výrobě větších panelů. Nabízejí se v sadách po 10 kusech. Na Obr. 13 je zobrazen jeden z těchto řezů ze strany přivrácené ke slunci. Z této strany se článek připojuje jako kladný pól. Ze spodu se připojuje jako záporný pól.



Obr. 13 Solární řez

Na stránkách výrobce se můžeme dočíst následující údaje:

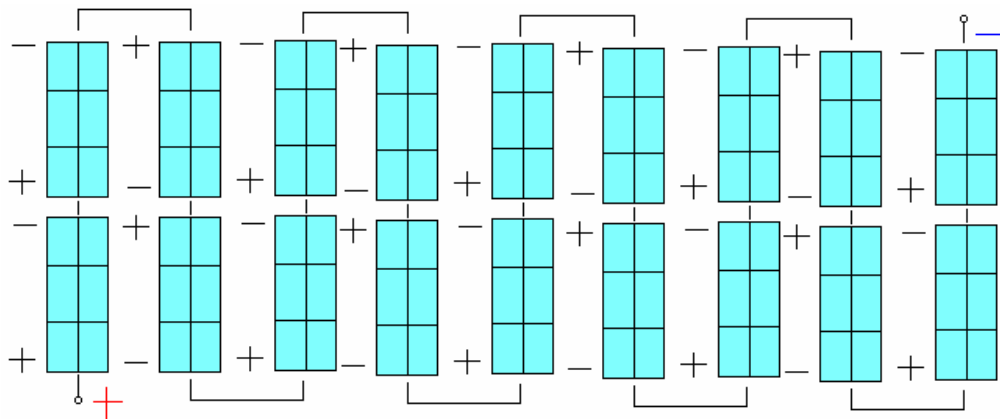
Rozměry 29,4×12,3 mm, 6 g.

Při osvětlení 50 W/m² a zatěžovacím odporu 68 Ω je napětí článku 0,28 V.

Při osvětlení 1000 W/m² Jsou udávány tyto parametry:

- Napětí naprázdno (U_{0C}) 0,57 V
- Proud nakrátko (I_{0C}) 90 mA
- Výkon (P_m) 40 mW

Pro naše zařízení je vzhledem k napájecímu napětí logických obvodů ideální napětí na výstupu panelu 5 V. Z toho budeme vycházet při návrhu pospojování jednotlivých článků. K dispozici jsem měl celkem 108 řezů. Celková plocha je zhruba 0,04 m². Vzhledem k tomu, že se v podstatě jednalo o zbytky při výrobě, neměly všechny řezy stejné parametry, a tedy nemělo cenu dělat přesný výpočet celého solárního panelu. Nemohli bychom použít zjednodušení, že všechny články mají stejnou charakteristiku. Jako základ jsem bral odběr 21 mA, ke kterému jsem došel po sečtení maximálních odběrů logických obvodů. To odpovídá zhruba odporu 220 Ω při 5 V. Udělal jsem si malé panely o 2 paralelně zapojených řezech a různě je kombinoval tak, abych při osvětlení 100W žárovkou ze vzdálenosti 30 cm dostal více než 5 V. Z měření na obrázku Obr. 33 a díky katalogovému údaji jsem věděl, že by to odpovídalo zhruba osvětlení 50W/m². Takový výkon je Slunce schopno poskytnout, i když je částečně zakryto mraky. Zkoušel jsem všechny různé kombinace, nakonec jsem se rozhodl zapojit 6 řezů paralelně a těchto bloků je celkem 18 v sérii (Obr. 14). Takto zapojený panel dává při nepřímém osvětlení denním světlem při malém zatížení napětí kolem 5 V.

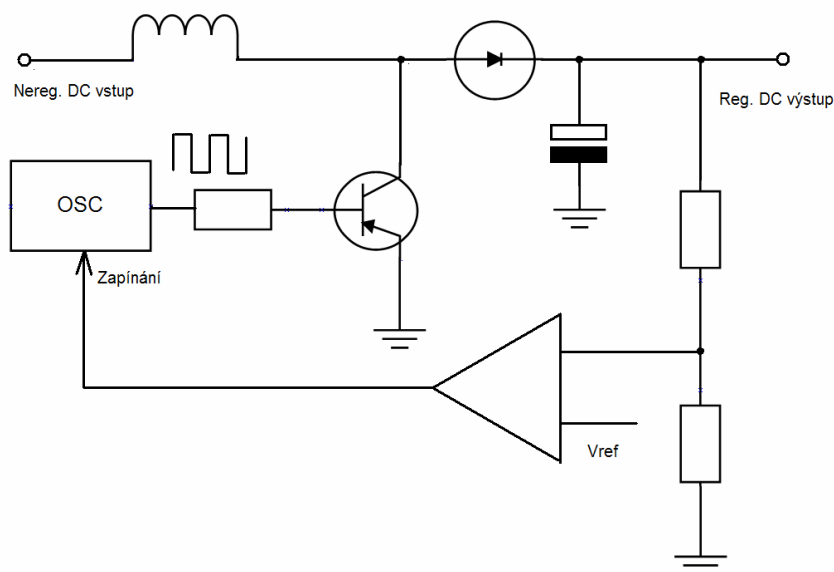


Obr. 14 Schéma pospojování řezů

2.2. DC/DC

Všechny lineární napěťové regulátory jako například 7805 mají spoustu nevýhod. Například výstupní napětí je vždy nižší, než vstupní a velká část energie je ztracena v ovládacím elementu. Vyzářená energie je zhruba rovna $(V_{VST} - V_{VYST})I$.

Existuje i jiná cesta, jak vytvářet regulované napětí. Ve spínaných regulátorech (Obr. 15) transistor pracuje jako saturovaný spínač, který pravidelně dodává plné, neregulované napětí v krátkých intervalech na tlumivku. Během každého pulzu narůstá proud cívkou a ta ukládá energii do svého magnetického pole.

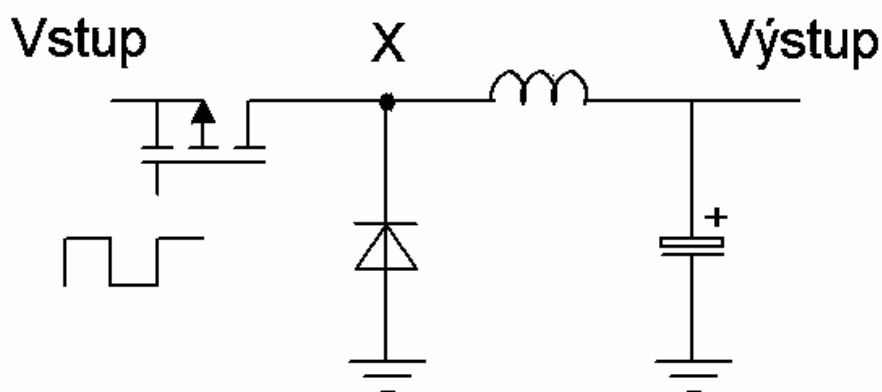


Obr. 15 Typické zapojení DC/DC převodníku (Step-down)

Tlumivka také pomáhá k vyhlazení výstupního napětí. Obvod zpětné vazby s komparátorem porovnává výstupní napětí s referenčním a podle toho mění frekvenci nebo délku pulzu oscilátoru.

Spínací regulátory mají několik atraktivních vlastností, které je dělají oblíbenými. Nízké ztráty i při velkém rozdílu mezi napětím na vstupu a výstupu. Spínací regulátory mohou generovat výstupní napětí vyšší, než je na neregulovaném vstupu. Mohou vygenerovat opačnou polaritu, než má vstup. Spínací regulátor lze navrhnout tak, aby pracoval přímo ze střídavého proudu a bez pomoci transformátoru. Díky tomu jsou moderní DC zdroje lehké. Jedním z příkladů je napájecí zdroj PC, který je dnes možné koupit i o výkonu kolem 1 kW. Transformátor pro srovnatelné zatížení by byl nesrovnatelně těžší a větší. Spínací zdroje mají však i nevýhody – například vytvářejí rušení a mohou ho posílat zpět do vedení. Při spínání jsou velmi namáhány kondenzátory a často se stává, že rychle ztrácí kapacitu. U moderních zdrojů tyto problémy byly z velké části potlačeny.

2.2.1. Step-Down regulátory



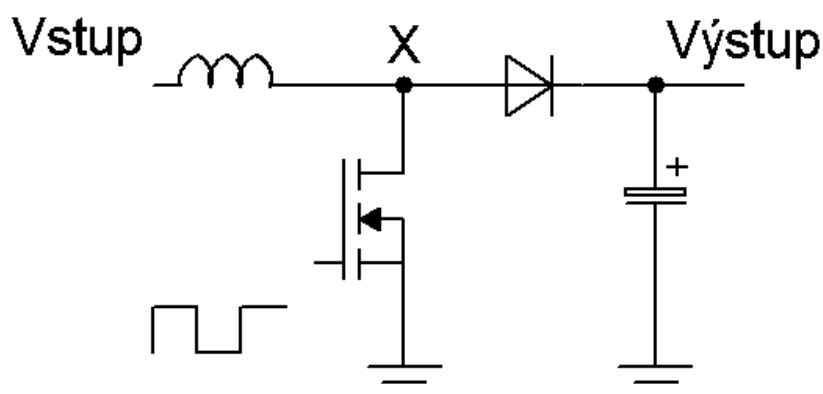
Obr. 16 Step down regulátor

Když se ze vstupu pomocí tranzistorového spínače propustí proud, teče ve směru od tranzistoru k výstupu, dioda je uzavřená. Výstupní kondenzátor průběh této energii vyhlazuje. Když se pak transistor uzavře, proud indukčností klesá a zachovává si stejný směr. Napětí je však už na tlumivce opačné, takže dioda uzavírá okruh. Střídou impulzů se reguluje výstupní napětí, které je vždy nižší, než vstupní. Odtud je také anglický název Step-Down. Zjednodušené zapojení takového regulátoru

ru je na Obr. 16. Samozřejmě kompletní obvod má zpětnou vazbu, která porovnává výstupní napětí, a tímto způsobem ovládá šířku impulsu nebo kmitočet.

2.2.2. Step-Up regulátory

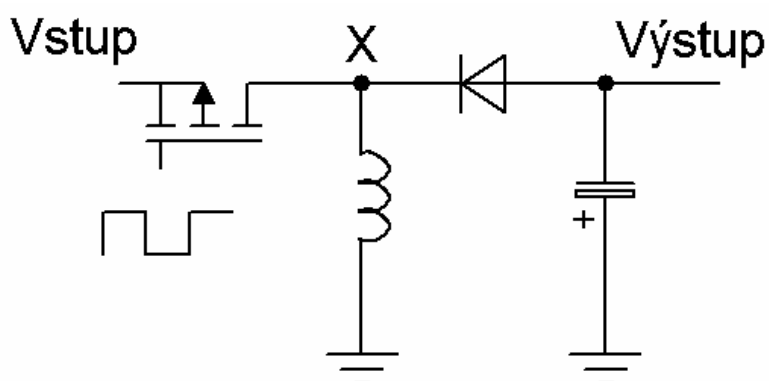
Potřebujeme-li větší výstupní napětí než je na vstupu, pak se používá zapojení step-up regulátor Obr. 17.



Obr. 17 Step up regulátor

Při sepnutí spínače proud tlumivkou narůstá. Když je spínač vypnut napětí stoupá tak, jak cívka obstarává konstantní proud. Napětí na cívce se sčítá s napětím zdroje. Dioda sepne a napětí se dostane ke kondenzátoru. Výstupní napětí může být daleko větší než vstupní.

2.2.3. Invertující měnič



Obr. 18 Invertující měnič

V invertujícím obvodu (Obr. 18) se během sepnutí proud lineárně zvyšuje směrem k zemi. Když je spínač vypnutý, tlumivka stáhne bod X na obrázku na negativní napětí, aby byl zachován průtok proudu. Výstupní napětí se může měnit v závislosti na velikosti definované ve zpětné vazbě.

Jak vidíme, spínací regulátory jsou docela šikovné prvky. Účinná a lehká konstrukce umožňuje výstavbu malých zařízení. Například step-up regulátory jsou ideální tam, kde je potřeba relativně vysoké napětí, jako například u fluorescenční nebo plazmové technologie. Spínací regulátory se nazývají také DC na DC převodníky. DC/DC měniče se hodí, pokud konstrukce používá baterie. Například pomocí alkalické baterie 9V, u které napětí ve skutečnosti začíná na 9.5 V a vytrvale klesá až k 6V. Takže nízkovýkonový +5 V spínaný regulátor zajistí konstantních 5 V s vysokou účinností po celou dobu životnosti baterie. To nelze říci o lineárních regulátorech, kdy vstupní napětí musí být mnohem vyšší, aby stabilizátor poskytl spolehlivé výstupní napětí, a samozřejmě napěťový rozdíl se rozptýlí jako teplo, což snižuje délku života baterie.

2.3. LT1073

Abychom dosáhli stabilního napětí, s co nejmenšími ztrátami, je nutné použít spínaný zdroj napětí. Rozhodl jsem se pro produkt firmy Linear Technology. V oblasti obvodů pro zdroje má tato společnost velmi širokou nabídku. Hlavním parametrem při výběru pro mě bylo minimální vstupní napětí, při kterém je schopen regulátor ještě pracovat. Proto jsem vybral LT1073. Výrobce u něj udává tyto parametry:

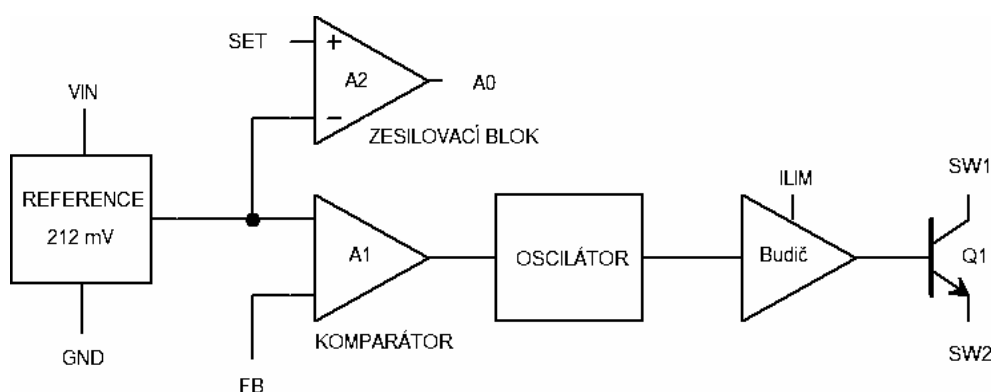
- Rozsah napájecího napětí 1 až 32 V
- Spotřeba obvodu 95 μ A
- Step-Up nebo Step-Down režim
- Detekce nízkého vstupního napětí na čipu
- Nastavitelný limit proudu
- Verze s pevným nebo nastavitelným výstupním napětím

- Pouzdro PDIP nebo SO-8

Díky tomu, že pracuje už od 1 V, pokryje velký rozsah možného napětí, které bude solární panel dodávat.

2.3.1. Princip fungování obvodu LT1073

Základ čipu LT1073 tvoří v podstatě spínač ovládaný vypínatelným oscilátorem. Tento typ architektury má velmi malý odběr a to hlavně díky tomu, že spínání probíhá jen, když napětí na zpětnovazebním vstupu poklesne pod referenční napětí.



Obr. 19 Blokové schéma obvodu LT1073

Fungování obvodu je možno ukázat na blokovém schématu na Obr. 19. Komparátor A1 porovnává napětí na vývodu FB s referenčním napětím 212 mV. Když úroveň FB poklesne pod 212 mV, A1 zapne oscilátor o frekvenci 19kHz. Budič zesiluje signál ke spínání tranzistoru Q1. Adaptivní budič báze tranzistoru zajišťuje spínací proud a poskytuje přesně tolik proudu, aby došlo k saturaci bez přebuzení tranzistoru, díky tomu je dosaženo vysoké účinnosti. Spínací cyklus zvyšuje výstupní napětí a tedy i napětí na vývodu FB. Když je napětí FB dostatečné, aby překlátilo A1, oscilátor je odpojen. Minimální velikost hystereze vestavěné do A1 zajišťuje stabilitu smyčky bez externí frekvenční kompenzace. Když je komparátor nepřeklopen, oscilátor a všechny obvody s velkým odběrem jsou vypnuty. To zajišťuje snížení klidového proudu na 95 μ A. Oscilátor je vnitřně nastaven na sepnutí dlouhé 38 μ s a vypnutí dlouhé 15 μ s, to předurčuje obvod pro step-up zapojení, kde $V_{výst} \approx 3 * V_{VST}$, například 1.5 V na 5 V. Jiné kombinace napětí pro step-up stejně jako pro step-down (buck) jsou také možné s malou ztrátou maximálně dosažitelného výkonu na výstupu.

A2 je univerzální zesilovací blok, který může sloužit jako detektor vybité baterie nebo budít obvod detekce nízkého napětí. Invertující vstup A2 je vnitřně zapojen ke 212mV referenci.

Odpor připojený mezi vývod I_{LIM} a V_{VST} nastavuje maximální spínací proud. Když spínací proud překročí nastavenou hodnotu, spínač je vypnut. Tato vlastnost je obzvláště výhodná, když je použito malých induktancí a vysokých vstupních napětí. Pokud je požadován interní proudový limit 1,5 A, I_{LIM} by měl být připojen přímo k V_{VST} . Zpoždění reakce okruhu proudového omezení je kolem 2 μ s.

Ve step-up režimu, SW2 je připojen k zemi a SW1 budí tlumivku. V režimu step-down, SW1 je připojen k V_{IN} a SW2 budí tlumivku. Výstupní napětí je nastaveno pomocí následující rovnice jak v režimu step-up i step-down, R1 je připojen mezi FB a GND, R2 je připojen mezi V_{VST} a FB.

$$V_{VST} = (212mV) \cdot \left(\frac{R2}{R1} + 1\right) \quad (2.1)$$

2.3.2. Výběr tlumivky

DC/DC převodníky pracují pomocí ukládání energie ve formě magnetického toku v tlumivce a pak přepínáním této energie do zátěže. Protože je to tok a ne náboj, co je uloženo, výstupní napětí může být vyšší, nižší nebo mít opačnou polaritu ke vstupnímu napětí výběrem vhodného spínacího zapojení. Aby mohla tlumivka fungovat jako účinný přenositel energie, musí splňovat tři požadavky. Prvně, indukance musí být dost malá na to, aby tlumivka byla schopna uložit dostatečné množství energie i v případě nízkého napětí a krátkého spínacího času. Zároveň indukance musí být dost velká na to, aby maximální proudový limit obvodu LT1073 a induktoru nebyl překročen v případě velkého vstupního napětí a dlouhého času sepnutí. Navíc, tlumivka musí být schopna uložit potřebný tok, tj., nesmí dojít k saturaci. V případě výkonu, který předpokládáme pro LT1073, jsou vhodné malé tlumivky se saturačním proudem mezi 300 mA a 1 A (podle aplikace). Poslední podmínka je, že tlumivka musí mít dostatečně nízký stejnosměrný odpor, aby přebytečná energie nezůstala ve formě tepla ve vinutích. K dalšímu zvážení je elektromagnetická kompatibilita (EMI). Toroidní a hrnečkové jádrové tlumivky jsou doporučeny v aplikacích, kde musí být hodnota EM rušení co nejmenší. Například, pokud jsou poblíž analogo-

vé okruhy nebo snímače. Typy s tyčovým jádrem jsou levnější volbou tam, kde EMI není důležitá. Výběr vhodné tlumivky pro požadavky aplikace vyžaduje nejprve určení minimálního a maximálního vstupního napětí, výstupního napětí a výstupního proudu. Ve step-up konvertoru, se induktivita přidává ke vstupnímu napětí k získání výstupního napětí. Výkon, který by měla tlumivka dodat je určen:

$$P_L = (V_{VYST} + V_D - V_{VST})(I_{VYST}) \quad (2.2)$$

V našem případě je P_L po dosažení 1 V jako vstupní napětí a proudu 20 mA, který předpokládáme jako průměrný, dostáváme výkon 0,09W

Maximální výkon na tlumivce:

$$P_L = E_L \cdot f_{OSC} \quad (2.3)$$

$$= \frac{1}{2} L \cdot i_{VRCHOL}^2 \cdot f_{OSC} \quad (2.4)$$

E_L [J] energie uložená v tlumivce

f_{OSC} [Hz] frekvence spínacího oscilátoru

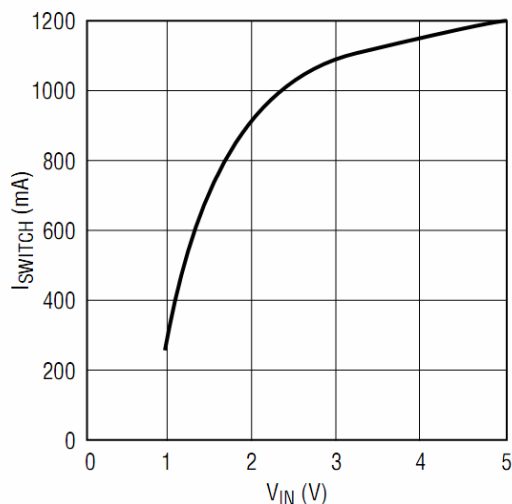
i_{VRCHOL} [A] maximální proud tlumivkou

,kde

$$i_{VRCHOL} = \left(\frac{V_{VST}}{R}\right) \left(1 - e^{-\frac{Rt_{ON}}{L}}\right) \quad (2.5)$$

R [Ω] ekvivalentní odpor spínače (1 Ω maximum) přidaného k DC odporu

t_{ON} [s] doba sepnutí spínače



Obr. 20 Maximální spínaný proud v závislosti na vstupním napětí

Při maximálním době sepnutí by i_{VRCHOL} neměl překročit maximální spínací proud ukázaný na Obr. 20. Některé kombinace vstupního/výstupního napětí mohou způsobovat problémy. V těchto případech je nutný rezistor mezi vývodem I_{lim} a V_{VST} , abychom měli spínací proud pod kontrolou. Já jsem toho využil a omezil maximální spínaný proud na 0,6 A pomocí odporu R_{LIM} .

2.3.3. Výběr kondenzátoru

Výběr správného výstupního kondenzátoru je téměř stejně důležité, jako výběr správné tlumivky. Špatná volba filtračního kondenzátoru může mít za následek snížení účinnosti a velké zvlnění výstupního napětí. Obyčejné hliníkové elektrolyty, i když levné a snadno dostupné, mohou mít nepříjemně vysoký sériový odpor ESR a velkou ESL (indukčnost). Na trhu existují hliníkové kondenzátory s nízkými ESR speciálně určené pro spínané DC / DC převodníky. Ty pochopitelně pracují mnohem lépe, než běžné kondenzátory. Tantalové kondenzátory poskytují ještě lepší výkon, ale jsou dražší. V aplikacích s velmi nízkým výkonem, kdy je důležitý každý „mikroampér“ je důležité, aby se počítalo s únikem proudu v kondenzátoru. OS-CON kondenzátory mají unikající proud v rozsahu 5 μ A do 10 μ A. Pokud je zátěž také v rozsahu mikroampér, kondenzátor s velkými úniky znatelně sníží účinnost zapojení. V tomto typu aplikace jsou tantalové kondenzátory nejlepší volbou, s typickými svodovými proudy v rozsahu 1 μ A až 5 μ A. Pro naše účely jsem vybral elektrolytický kondenzátor speciálně určený do spínaných zdrojů.

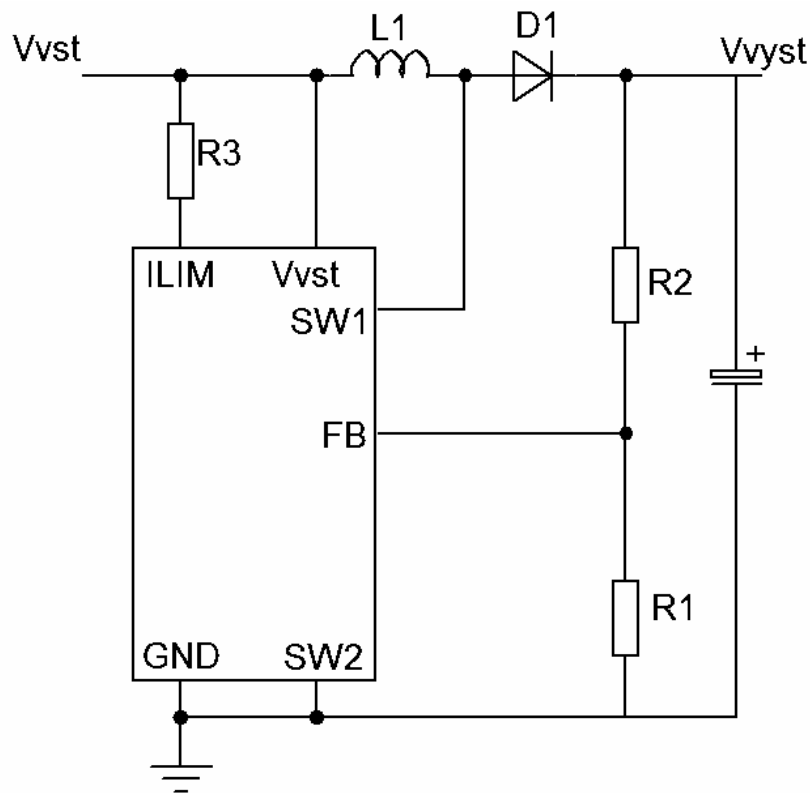
2.3.4. Výběr diody

Rychlost spínání, pokles napětí a unikající proud jsou tři hlavní prvky při výběru záchytné diody pro LT1073. Obyčejné usměrňovače například 1N4001 jsou nevhodné pro použití v jakékoliv aplikaci spínacího regulátoru. Přestože jsou určeny na proud 1A, spínací časy na 1N4001 jsou v rozsahu 10 μs až 50 μs . Pokud jsou tyto diody použity, je přinejlepším účinnost vážně snížena a při nejhorším obvod nemusí fungovat vůbec. Většina aplikací s LT1073 bude dobře fungovat s Schottkyho diodou 1N5818. Kombinace poklesu napětí 500 mV při proudu 1 A, rychlé spínací časy a zpětný proud 4 μA až 10 μA vyhovuje požadavkům LT1073. Při spínacích proudch 100mA nebo méně, může být použita signální dioda 1N4148. Tato dioda má unikající proud v rozmezí 1 nA a 5 nA při 25 °C a stojí méně než 1N5818. V situacích, kdy je zátěž nepravidelná a LT1073 běží většinu času naprázdno, může být někdy životnost baterie prodloužena použitím křemíkových diod například 1N4933, která dokáže zpracovat proud 1 A, ale únik je nižší než 1 μA . Efektivita o něco klesne ve srovnání s 1N5818 při zátěži, ale nižší odběr při běhu naprázdno může být důležitější. Já jsem chtěl použít 1N4148 vzhledem k minimálnímu odběru zařízení, ale bohužel jsem sehnal jen 1N5818.

2.3.5. Step-Up (Boost Mode)

Step-up DC/DC měnič dodává výstupní napětí vyšší, než je vstupní napětí. Step-up měniče nejsou chráněny proti zkratu, protože je stejnosměrně propojen vstup na výstup. Obvyklá step-up konfigurace pro LT1073 je zobrazena na Obr. 21. LT1073 nejprve stáhne SW1 k zemi, potom se připojí napětí $V_{\text{VST}} - V_{\text{CESAT}}$. Kde V_{CESAT} je saturační napětí spínaného tranzistoru mezi kolektorem a emitorem. Pak se proud hromadí v L1. Na konci sepnutí je v L1 proud:

$$i_{\text{PEAK}} = \frac{V_{\text{IN}}}{L} t_{\text{ON}} \quad (2.6)$$

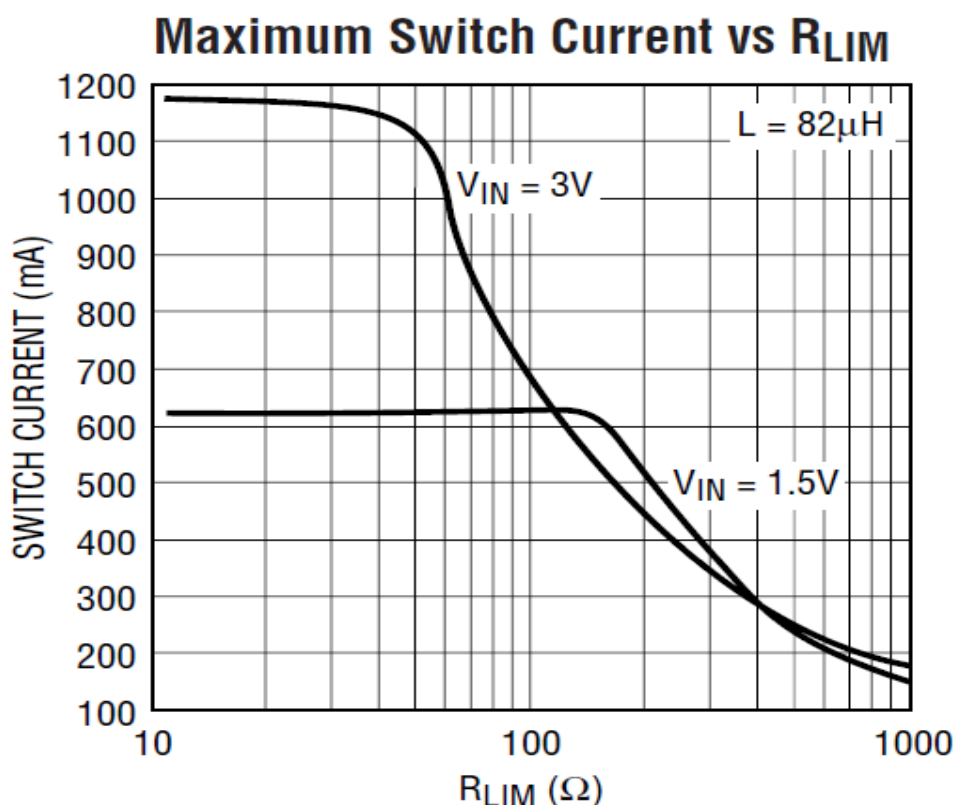


Obr. 21 Zapojení LT1073 jako Step-up měniče

Ihned po vypnutí spínače začne napětí vývodu SW1 stoupat, protože nelze okamžitě zastavit tok v L1. Když napětí dosáhne $V_{VYST} + V_D$ proud tlumivky teče přes D1 do C1, a zvyšuje V_{VYST} . Tuto činnost opakuje obvod LT1073 podle potřeby, aby se udrželo napětí na vstupu FB na interním referenčním napětí 212mV. R1 a R2 nastavuje výstupní napětí podle vzorce 2.1.

2.3.6. Využití omezení proudu

LT1073 lze naprogramovat na vypnutí při nastaveném proudu. To umožňuje měnit vstupní napětí v širokém rozsahu, aniž by byl překročen maximální proud obvodem nebo aby došlo k saturaci tlumivky.



Obr. 22 Závislost maximálního spínaného proudu na odporu R_{LIM}

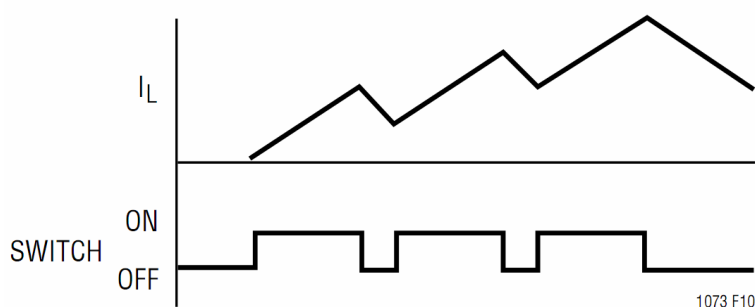
Vezměme si případ, kdy analýza ukazuje, že LT1073 musí pracovat při 800 mA vrcholovém proudu se vstupem 2 V. Pokud V_{VST} stoupne na 4V, vrcholový spínací proud podle Obr. 20 vzroste na 1.6A, to překračuje limit obvodu. S vhodným odporem bude spínací proud omezen na 800 mA, a to i v případě, že vstupní napětí roste. LT1073 to dělá odebráním malých částí spínacího proudu a průchodem tohoto proudu přes vnější odpor. Když napětí na pinu I_{LIM} poklesne o V_{BE} pod V_{VST} , oscilátor ukončí cyklus. Reakce této smyčky je cca $2\mu s$. Na Obr. 23 jsou vyobrazeny vhodné velikosti odporu R_{LIM} pro požadovaný proud.

Jinou situaci, kdy je I_{LIM} funkce užitečná je, když přístroj jde do režimu nepřetržitého provozu. Toto nastává ve step-up módu, když

$$\frac{V_{VYST} + V_{DIOIDA}}{V_{VST} - V_{SPIN}} < \frac{1}{1 - DC} \quad (2.7)$$

Když vstupní a výstupní napětí vyhovují tomuto vztahu, proud cívkou neklesne na nulu během vypnutí spínače. Pokud se přepínač znovu zapne, aktuální náběh začne od nenulové proudové úrovně v tlumivce, jak byla těsně před sepnutím

spínače. Jak je vidět na Obr. 23, proud tlumivkou se zvýší na vysokou úroveň ještě před tím, než komparátor vypne oscilátor. Tento vysoký proud může způsobit nadměrné výstupní zvlnění a vyžaduje větší výstupní kondenzátor a induktor. S I_{LIM} funkcí však spínací proud vypne při naprogramované úrovni.



Obr. 23 Průběh napětí na tlumivce

Výstupní zvlnění z LT1073 je obvykle 150 mV na 5 V_{VYST}, to lze výrazně snížit tím, že se blok zisku umístí před FB vstup. Toto účinně snižuje hysterezi komparátoru. Pomocí této techniky může být výstupní zvlnění sníženo na pouhých několik milivoltů.

2.4. MCU

Hlavním ovládacím prvkem je obvod ATMEGA32. Je to 8bitový mikrokontrolér založený na architektuře RISC. Může pracovat až na frekvenci 16 MHz a většina instrukcí je vykonána během jednoho hodinového taktu. Hrubý výkon se dá přirovnat k dříve používaným mikroprocesorům pro osobní počítače řady i386. V obvodu jsou integrovány mimo jiné 10bitový AD převodník, rozhraní TWI, rozhraní UART, watchdog a několik časovačů. V našem zapojení využijeme také tzv. sleep mody, které jsou schopny uvést mikrokontrolér do stavu snížené spotřeby. Toho je dosaženo vypnutím nepoužívaných bloků.

Základní vlastnosti:

- Napájecí napětí 2.7 – 5 V
- Pracovní frekvence 0 – 16 MHz

- Spotřeba, 4 Mhz, 3V, 25°C
 - Aktivní: 3.6 mA
 - Nečinnost: 1.0 mA
 - Vypnutý režim: 0.5 μ A

Tento mikroprocesor jsem si vybral hlavně s ohledem na širokou podporu poskytovanou výrobcem. K dispozici je velmi rozsáhlý datasheet, který popisuje všechny funkce čipu. Zdarma je nabízeno vývojové prostředí AVR Studio, a to plně dostačuje pro projekty, jako je tento. Navíc je možno nahrání programu do mikroprocesoru provést pomocí jednoduchého kabelu připojeného do LPT portu PC.

2.5. USB

Vzhledem k tomu, že dnešní počítače už z velké části nemají konektor pro protokol USART (COM port), který je obsažen v použitém MCU, rozhodl jsem se přidat obvod emulující toto rozhraní přes USB. Tím se zároveň vyřešil i problém s napájením zařízení během jeho připojení k PC.

FT232R je obvod umožňující připojit do USB zařízení se sériovým UART rozhraním. Tento obvod potřebuje minimální množství dalších součástek díky integraci EEPROM, krystalu a odporů USB rozhraní přímo do čipu. Byl navržen tak, aby efektivně pracoval s USB řadičem s co nejmenším využitím přenosového pásma USB.

Při napájení zařízení přímo z rozhraní USB existuje tu řada omezení, které mohou komplikovat návrh tak, aby splnil povinné požadavky USB 2.0. Při nedodržení těchto zásad může dojít za určitých podmínek k nepředpokládaným operacím. Dané požadavky jsou:

Zařízení USB v režimu spánku napájené z USB nesmí čerpat více než 0,5 mA z USB sběrnice. Proudový limit 500 uA zahrnuje proud 200 uA odebíraný přes 1.5 K Pull-up na USB D+. Zbývá tedy pouze proud 300 uA (0,3 mA) k napájení FT232 a externích obvodů.

Při zapnutí nesmí zařízení odebírat z USB více než 100 mA, dokud se zařízení úspěšně nenainstaluje na hostitelském PC. USB sběrnice však může dodávat až 500 mA z běžné USB sběrnice po nahlášení. Pokud je zařízení připojeno do sběrnice přes USB Hub, tak je limit pouze 100 mA.

Po změření proudu jsem zjistil, moje zapojení tyto podmínky splňuje

2.6. Vlhkost a teplota

SHT15 je kompaktní senzor relativní vlhkosti a teploty. Spojuje části čidla a prvky zpracování a poskytují plně digitální kalibrovaný výstup. Na Obr. 24 je zobrazeno pouzdro senzoru.



Obr. 24 Senzor Teploty a vlhkosti

Pro měření relativní vlhkosti je použito kapacitní čidlo, přičemž teplota se měří „band gap“ snímačem. „Band gap“ senzor teploty je vlastně polovodičová dioda, u které se využívá závislosti propustného napětí na teplotě. K výsledné teplotě se dá dojít z následujícího vzorce.

$$\Delta V_{BE} = \frac{KT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (2.8)$$

ΔV_{BE} [V]	rozdíl „band gap“ napětí při 2 různých proudech
K [J*K ⁻¹]	Boltzmanova konstanta
I_1 [A]	výstupní proud
I_2 [A]	výstupní proud
q [C]	náboj elektronu
T [K]	teplota

Použitá CMOSens® technologie přispívá k vysoké spolehlivosti a dlouhodobé stabilitě. Oba senzory jsou přímo připojeny na 14bit analogo-digitální převodník a sériové rozhraní obvodu. Každý SHT15 je jednotlivě kalibrován ve vlhkostní komoře. Kalibrační koeficienty jsou naprogramované do OTP paměti na čipu. Tyto koeficienty jsou interně používány pro kalibraci signálů z čidel. I2C sériové rozhraní a vnitřní regulace napětí umožňuje snadnou a rychlou integraci do systému. Kromě vlhkostního a teplotního snímače čip obsahuje zesilovač, A/D převodník, OTP paměť a digitální rozhraní.

Senzor pracuje stabilně do doporučeného rozmezí. Dlouhodobá expozice v podmínkách mimo normální rozmezí, zejména ve vlhkosti vzduchu > 80% RH (relativní vlhkosti), může dočasně rozhodit hodnotu naměřené RH (+3% RH po dobu 60h). Po návratu do normálního rozmezí se rozsah pomalu vrátí ke kalibrovanému stavu sám o sobě.

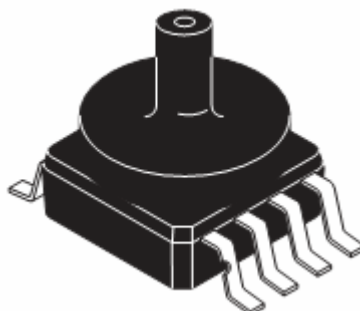
2.7. TLAK

Hmotnost vzduchu v atmosféře vytváří atmosférický tlak, který se měří obvykle v hektopascalech (hPa). Průměrný atmosférický tlak u hladiny moře se nazývá normální atmosférický tlak a má hodnotu 1013,25 hPa. Atmosférický tlak klesá s přibývajícím výškou. Atmosférický tlak je velice důležitý pro předpověď počasí. Absolutní hodnota atmosférického tlaku není tak důležitá jako jeho změna, respektive rychlost změny. Teplý vzduch má nižší hustotu, studený má naopak vyšší hustotu. Zvýšení tlaku signalizuje obvykle slunečné počasí, pokles spíše oblačno a deštivé počasí.

Rozdělení tlaku se na synoptických mapách znázorňuje pomocí izobar. Izobara je čára spojující na mapě místa se stejnou hodnotou tlaku vzduchu, přepočítanou na hladinu moře. Přístroj, který zaznamenává tlak, se nazývá barometr.

Závislost tlaku na výšce vyjadřuje tzv. barický stupeň, jehož hodnota závisí na výšce a teplotě a činí přibližně 8 m na 1 hPa ve výškách okolo 1 000 mnm, 15m/hPa v 5 000 mnm a 30m/hPa v 10 000mnm. Pro běžnou potřebu v našich nadmořských výškách lze říci, že absolutní tlak (tj. tlak v místě měření) lze přepočítat na tlak na hladině moře tak, že na každých 8m nadmořské výšky, ve které se nalzáme, připočteme 1 hPa.

V mém přístroji je použito čidlo MPXA6115A (Obr. 25). Je to teplotně stálý křemíkový tlakový senzor pro měření absolutního tlaku.



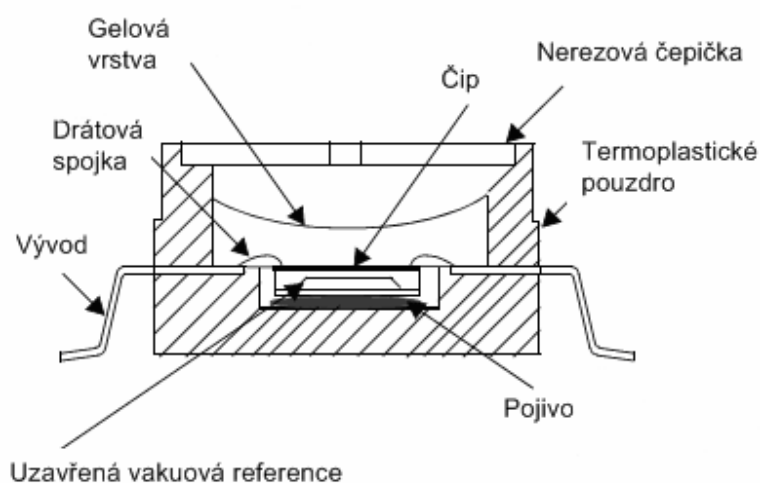
Obr. 25 Senzor tlaku

Zpracování signálu probíhá přímo na čipu. Senzor je teplotně kompenzovaný a kalibrován. V senzoru je integrovaný obvod s bipolárním OZ, rezistorovou sítí a poskytuje silný výstupní signál. MPXH6115A je vlastně piezoodporové čidlo. Obr. 26 zobrazuje blokový diagram vnitřního uspořádání senzoru.

Několik základních hodnot senzoru:

- 1.5% maximální chyba v rozsahu 0° to 85°C
- teplotní kompenzace v rozsahu: -40° až +125°C

Spotřeba typicky 6 mA, napájení 5V. Rozsah 15-115 kPa.



Obr. 26 Vnitřní průřez čidlem tlaku

2.8. Hodiny

Hodiny slouží k přidání časové značky k uloženým údajům. Použit je obvod DS1307. Mezi jeho přednosti patří: malá spotřeba, uložení dat v BCD kódu, hodiny / kalendář a 56 bajtů NV SRAM. Adresa a údaje jsou přenášeny sériově přes I2C, obousměrnou sběrnici. Hodiny a kalendář nabízí informace o sekundách, minutách, dnech, měsíci a roku. Datum konce měsíce se automaticky upraví pro měsíce, které mají méně než 31 dnů, včetně oprav pro přestupný rok.

Hodiny pracuje buď v 24 nebo 12hodinovém formátu s volitelným AM / PM indikátorem. DS1307 má zabudovaný obvod pro monitorování napájení, který po zjištění poklesu napájení pod stanovenou mez automaticky přepne na záložní zdroj. Časomíra pracuje i po přepnutí na záložní zdroj.

2.9. Paměť

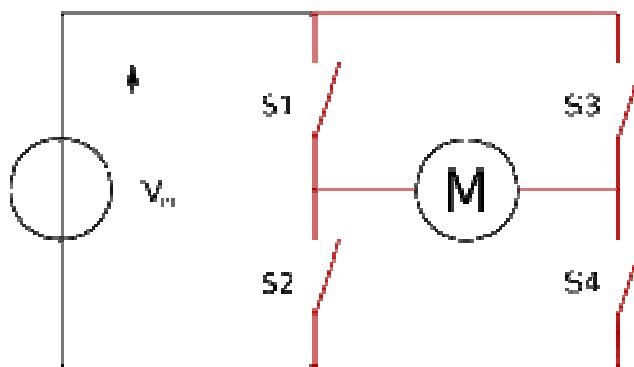
Jako paměť k uložení naměřených dat slouží FM24C64. Je to 64kbitová paměť typu FRAM. To znamená, že má vlastnosti paměti typu DRAM, ale uchovává si uložené hodnoty i bez přiloženého napájení. Doba uchování dat je maximálně 10 let. To jsou výhodné vlastnosti zejména v aplikacích, jako je tento projekt.

Vývoj FRAM začal v 80. letech a podílela se na něm především NASA a poté společnost Ramtron. Paměti se však ve větším množství začaly vyrábět až ke konci 90. let.

Základním stavebním prvkem DRAM pamětí je kondensátor a transistor. To samé platí pro FRAM paměti. Dielektrikum však u FRAM pamětí obsahuje ferromagnetický materiál.

2.10. H-můstek

V mém zapojení potřebuji ovládat naklánění panelu v obou směrech podle dopadajícího slunečního záření. K tomu se výborně hodí zapojení zvané H-můstek



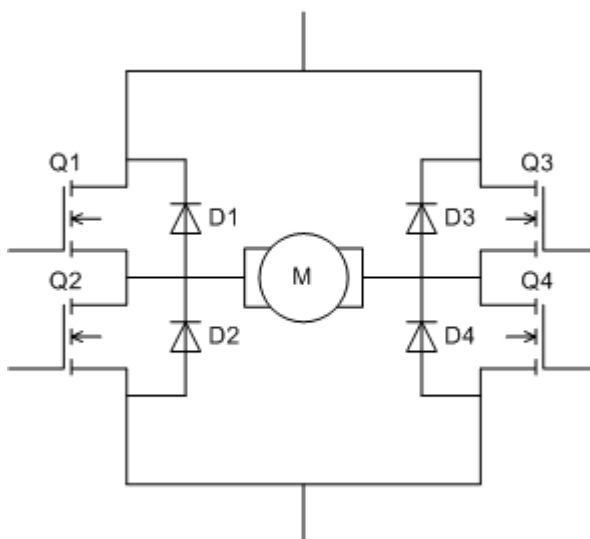
Obr. 27 Struktura H-můstku (červeně zvýrazněn)

H-můstek je elektronický obvod, který umožňuje aplikaci napětí napříč zátěží v obou směrech. Tyto obvody jsou často používány v robotice a dalších aplikacích, aby umožnily DC motorům běžet dopředu a dozadu. H-můstky jsou dostupné jako integrované obvody, nebo mohou být postaveny i z diskretních součástek.

Pojem "H-můstek" je odvozen od typického grafického znázornění takového obvodu (Obr. 27). Základ H-mostu tvoří čtyři přepínače (mechanické nebo polovodičové). Když přepínače S1 a S4 jsou sepnuty a S2, S3 jsou otevřené, bude na motoru „kladné“ napětí. Po otevření S1 a S4 a sepnutí přepínačů S2 a S3 bude toto napětí opačné, umožňující zpětný chod motoru.

Spínače S1 a S2 by nikdy neměly být sepnuty ve stejnou dobu, to by to způsobilo zkrat na zdroji vstupního napětí. Totéž platí pro spínače S3 a S4. Tento stav je znám jako průstřel.

Jako nejvýhodnější spínače v H-můstku se jeví tranzistory MOSFET. Nejúčinnější zapojení s tranzistory MOSFET je použití N-kanálových MOSFETů na obou stranách (Obr. 28), protože obvykle mají třetinu velikosti odporu v sepnutém stavu oproti P-kanálovým MOSFETům. To ovšem komplikuje obvod a ve většině případů proto postačí klasické zapojení H-můstku, kde jsou jak N, tak P-kanalové varianty tranzistorů. Pro toto zapojení jsem se rozhodl i já.



Obr. 28 Zapojení H-Můstku s Mosfet [1]

Pro účely spínání je nelepší použití MOSFETů s co nejmenším odporem v sepnutém stavu (r_{dson}). Ale je tu háček: čím menší je r_{dson} , tím větší je MOSFET. Čím větší je fyzické zařízení, tím větší bude jeho gate. Gate tvoří kondenzátor společně se source. S tímto kondenzátorem musíme počítat při návrhu. Ovlivňuje nám množství proudu nutného k dosažení sepnutého stavu a tudíž také spínací rychlost.

Jednou z důležitých vlastností je, že tranzistory MOSFET obsahují vlastní (nevyhnutelnou, vestavěnou) diodu mezi drainem a source. Tato dioda se chová jako zádržná dioda v H-můstkové konfiguraci a většina katalogových listů MOSFET tranzistorů udává parametry této diody. Tuto vestavěnou diodu je možné použít jako ochranu pro tranzistory a není nutné používat vnější, pokud vlastnosti diody splňují požadavky zapojení.

Avšak diody také mají určitý časový interval, než se dostanou do sepnutého stavu. K překlenutí tohoto časového okamžiku tak, aby se tranzistory nepoškodily, se doporučuje zapojit k přívodním svorkám k motoru kondenzátor.

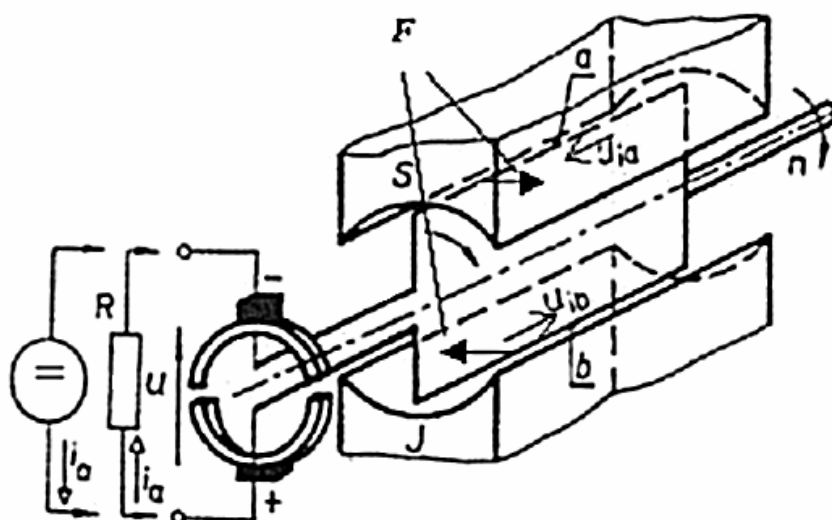
Je důležité vybrat diody s krátkým časem sepnutí, a to je důvod, proč se většinou používají Schottkyho diody.

2.11. Motory

O natáčení solárního panelu se stará dvojice motorů s převodovkou. Původně byly určeny ke grilu na otáčení masa. Každý má nosnost 5 Kg. Původním zdrojem

energie byl 1,5 V monočlánek. Z motorů je odstraněn držák na baterii a přímo ke kontaktům jsou naletovány napájecí kabely.

Stejnosemné motory nebo také stejnosemné stroje mají 2 hlavní části, stator a rotor. Na statoru, nepohyblivé části, jsou umístěny hlavní póly a vedlejší póly. Rotor (kotva) je složen z izolovaných plechů, na kterých je umístěno vinutí. Jednotlivá vinutí jsou připojena k měděným lamelám. Na lamely dosedají kartáčky a přenášejí na ně proud určený k pohonu motoru. Viz. (Obr. 29), který popisuje fungování motoru.



Obr. 29 Princip činnosti stejnosemného stroje [5]

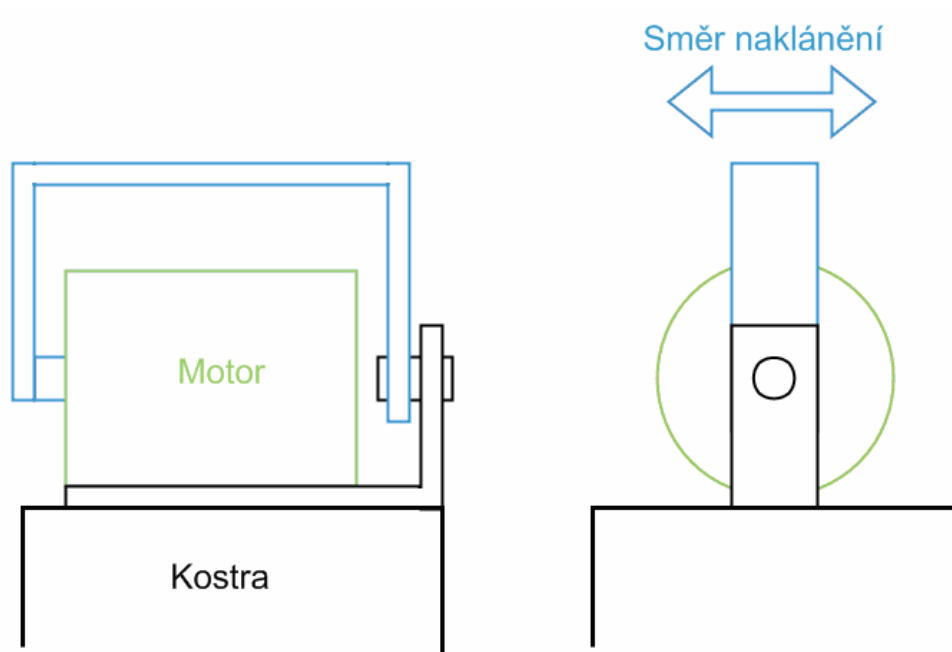
Připojíme-li ke kartáčům stejnosemné napětí, začne smyčkou protékat proud. Díky magnetům a jejich magnetickému poli začne na cívku působit síla F ve směru šipek.

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2.9)$$

F [N]	síla působící na závit
B [T]	magnetická indukce
l [m]	délka smyčky

Za polovinu otáčky si vodiče vymění pozice a komutátor musí změnit směr proudu, aby se cívka otáčela stále stejným směrem.

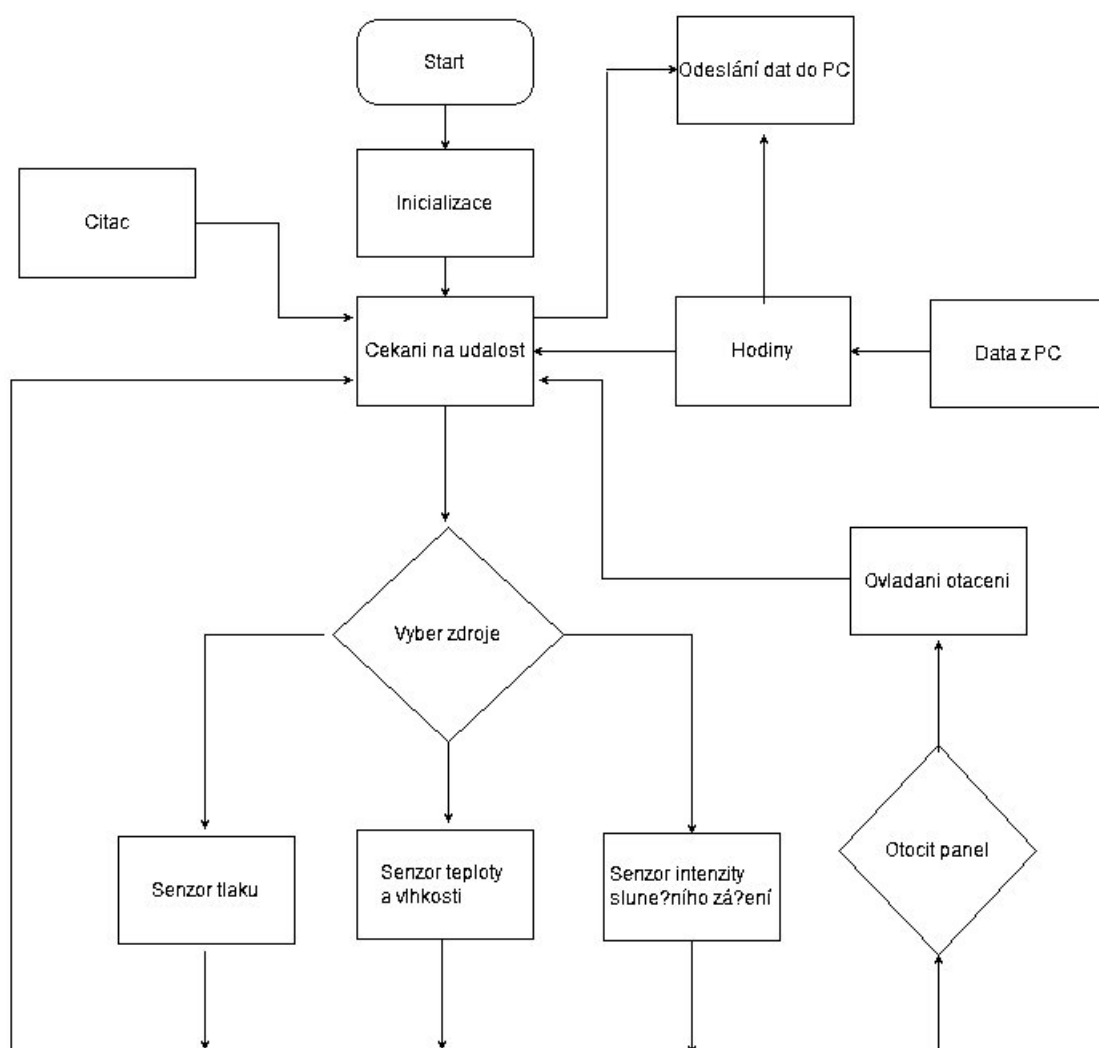
Konstrukční uspořádání elektromotorů, pro nastavení polohy solárních panelů za účelem maximálního dopadu sluneční energie daném časovém okamžiku, je na Obr. 30. Pohyb motoru je zobrazen modrou šipkou. Motor je pevně připojen ke kostře (černě). V ose rotoru je v kostře přivařený čep. Do něho je zasunuto vlastní pohyblivé rameno (modře), které má druhou stranu přidělanou k převodové soustavě motoru. Tímto způsobem je zajištěn pohyb v jedné ose. Pro pohyb i v druhé ose je k ramenu přivařen další motor v pravém úhlu. Jeho funkce je shodná s předchozím motorem.



Obr. 30 Princip otáčení podle jedné osy

3. Program pro mikroprocesor

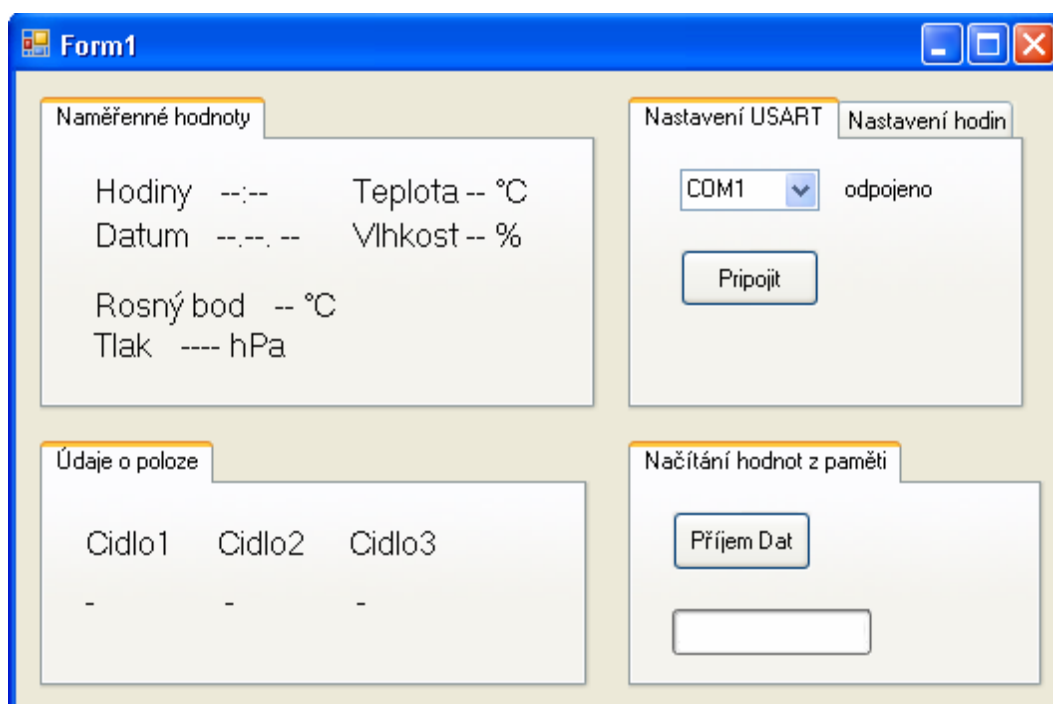
Program pro ovládání samotné meteorologické stanice je napsán v programovacím jazyce C++. Stará se o ovládání motorů, načítání z čidel a zajištění komunikace s PC. Všechny části jsou napsány v programu AVR Studio. Program je do MCU nahrán pomocí SPI rozhraní. S téměř všemi čidly se komunikuje pomocí rozhraní I2C. Jediná výjimka je senzor tlaku u kterého se měří výstupní napětí, které je funkcí tlaku. Na Obr. 31 je zobrazen vývojový diagram fungování programu.



Obr. 31 Vývojový diagram programu pro mikroprocesor

4. Program pro PC

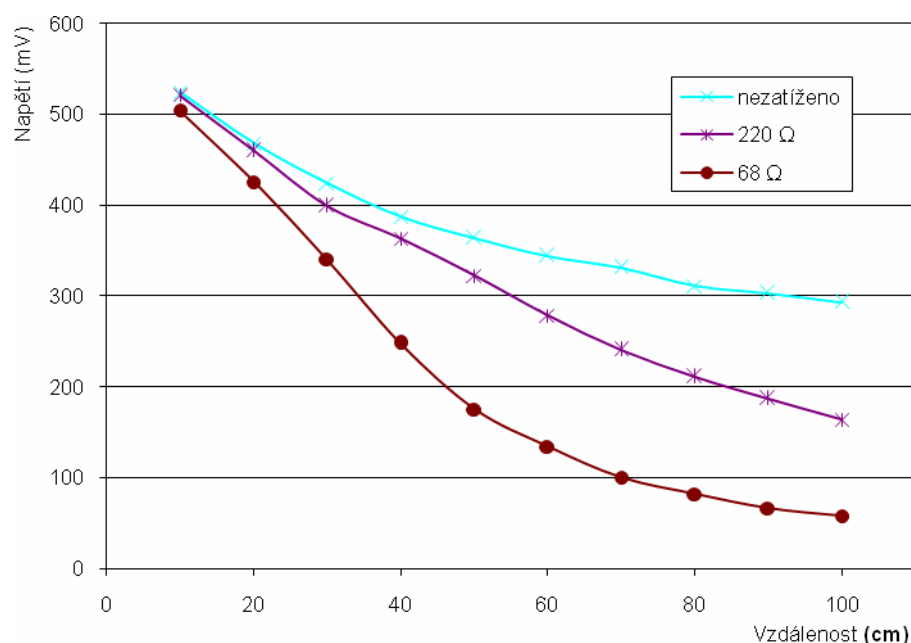
Program je napsán v jazyce C#. Na Obr. 32 je zobrazeno jeho ovládací okno. Vidíme naměřené veličiny a aktuální čas. Tlačítko „Připojit“ slouží k startu komunikace mezi PC a vlastní meteorologickou stanicí. Ještě před připojením meteorologické stanice je nutno mít vybraný správný COM port. Tlačítkem „Příjem Dat“ se načtou data ze stanice přes USB propojení a uloží se do souboru. Pomocí záložky „Nastavení hodin“ se upravuje čas a datum v hodinách uložených v meteostanici.



Obr. 32 Okno hlavního programu

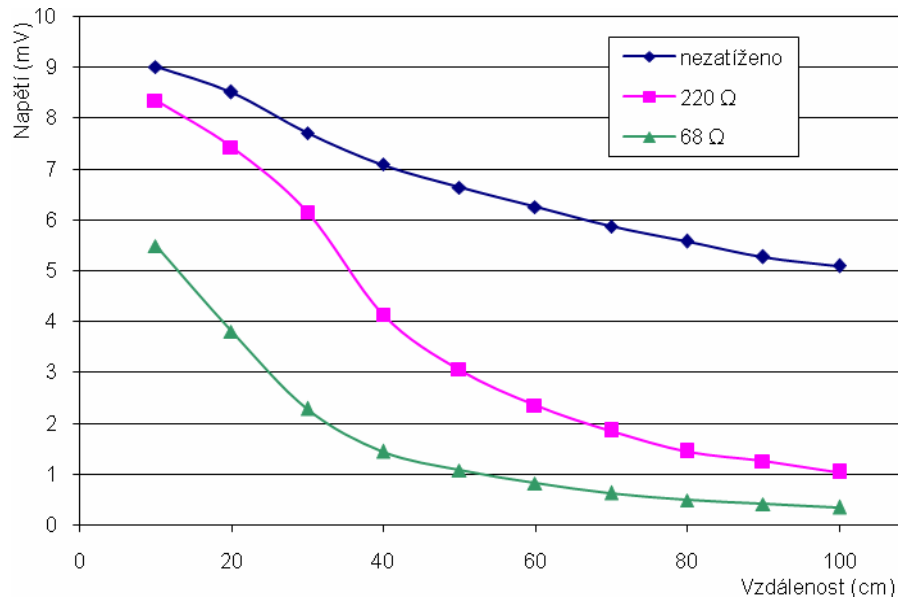
5. měření

Nejdříve jsem zkusil naměřit závislost množství dopadajícího světla na jeden řez solárního článku. Jako zdroj posloužila klasická 100W žárovka. Výsledky měření jsou na (Obr. 33). Výrobce udává, že při zatížení článku 68Ω odporem odpovídá napětí 0,28 V dopadajícímu světlu s energií $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Z grafu je zřejmé, že to odpovídá vzdálenosti žárovky zhruba 35 cm.



Obr. 33 Hodnoty naměřené pomocí 100W žárovky na 1 sol. řezu

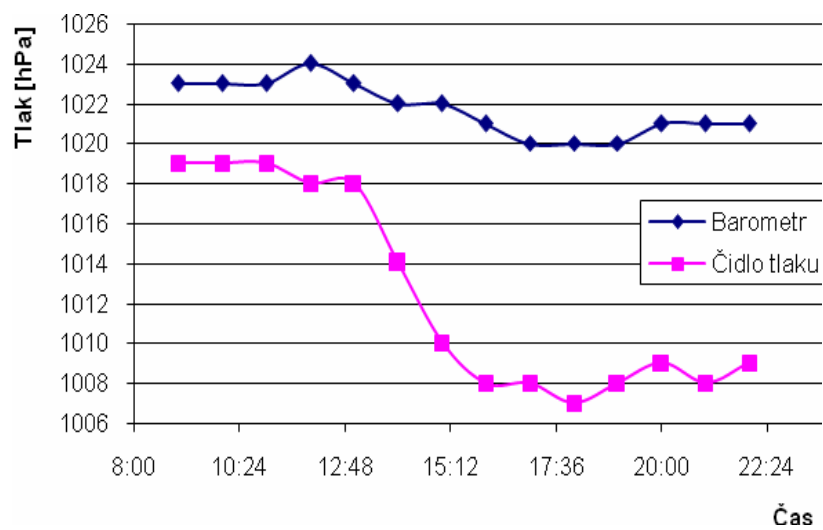
Po sestavení panelu jsem naměřil hodnoty zobrazené na grafu na Obr. 34. Nás zajímá hlavně zatížení odporem 220Ω , protože odpovídá předpokládané zátěži. Napětí se drží nad žádanými 5 V do vzdálenosti 35 cm.



Obr. 34 Hodnoty naměřené na sestaveném sol. panelu

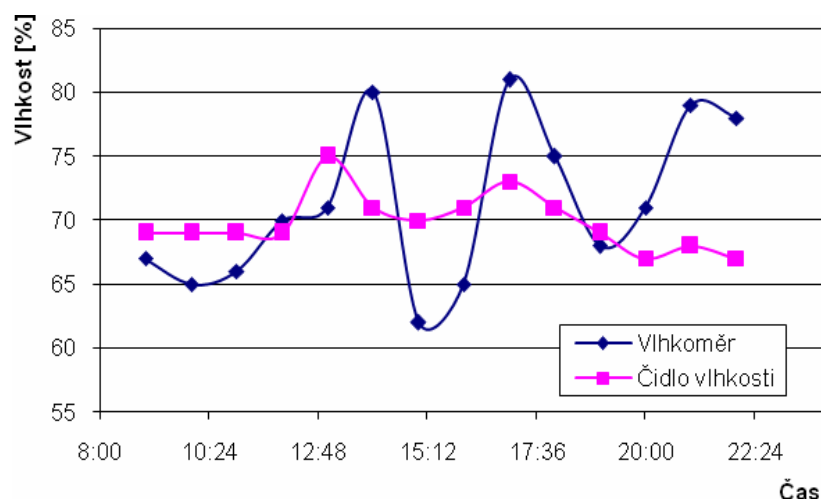
Vyzkoušení funkce zařízení a ukládání naměřených hodnot probíhalo v místnosti. Napájení zajišťovala 100W žárovka ze vzdálenosti 30 cm.

Naměřené hodnoty tlaku (Obr. 35) příliš neodpovídaly hodnotám zjišťovaným na kontrolním domácím barometru. Přisuzuji to nestálému napájecímu napětí senzoru tlaku a nedostatečnému rozlišení A/D převodníku.

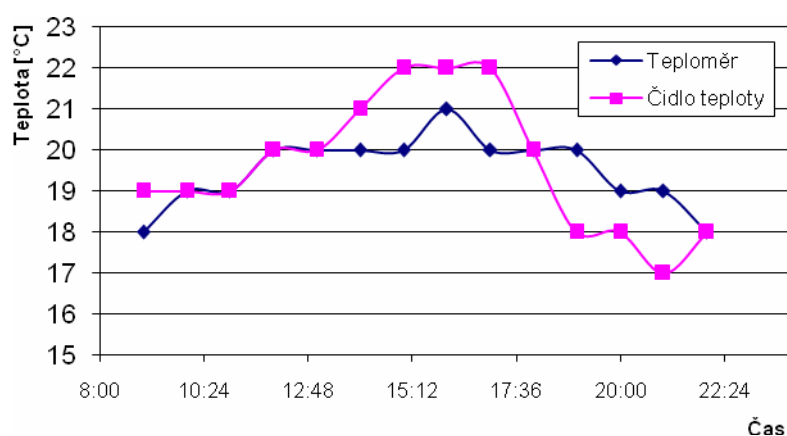


Obr. 35 Průběh tlaku během dne

Naopak průběh teploty a vlhkosti byl v dostatečné toleranci s měřeními, která jsem prováděl na domácí meteostanici. Průběhy jsou zobrazeny na Obr. 36 a Obr. 37.



Obr. 36 Průběh vlhkosti během dne



Obr. 37 Průběh teploty během dne

Poslední měření jsem prováděl na spodním motoru, na kterém leží největší moment, když se panel nachází ve spodní poloze. S pomocí potenciometru a stabilizovaného zdroje 5 V jsem zjišťoval při jakém proudu a napětí se rozjede nahoru. Odpor vyšel 9 Ω při napětí 2,5 V. To odpovídá proudu 277 mA. Čili k rozjezdu motoru ve spodní pozici je potřeba napětí 2,5 V a proud 0,28 A.

Všechny naměřené grafy jsou ve větší velikosti v příloze B.

Závěr

Zařízení je schopno fungovat samostatně a bez zásahu obsluhy. Důležitým elementem je ovšem dostatek světla. Měření teploty, vlhkosti a rosného bodu funguje bez problémů. Čidlo tlaku vykazuje odchylky a asi by bylo nutné použít přesnější AD převodník a napájecí napětí senzoru tlaku stabilizovat samostatně od zbytku zařízení. Vnitřní hodiny fungují bez problému na záložní napájecí zdroj, takže si zachovávají vždy aktuální čas. Uložené hodnoty do vnitřní paměti pro naměřené hodnoty se zachovaly i po dobu 1 měsíce, co jsem nechal zařízení bez přísunu energie. Proto by nebyl problém shromažďovat data ze senzorů i po delší časové období. Maximálně však 10 let. Ještě předtím, by ale zřejmě přestala fungovat mechanická část. Komunikace s počítačem je bezproblémová, nedochází ke ztrátě dat při přenosu. Přijaté hodnoty se v počítači dají uložit a následně zpracovat.

Solární panel se ukázal být vhodný zdroj pro takovéto zařízení s malou spotřebou. Menší problémem se ukázala být „měkkost“ solárních článků. To je ovšem velmi odlišuje od klasických zdrojů elektrické energie, jako jsou akumulátory a síťové napáječe. Nevýhody kompenzuje jejich nezávislost na elektrické síti a ekologický provoz.

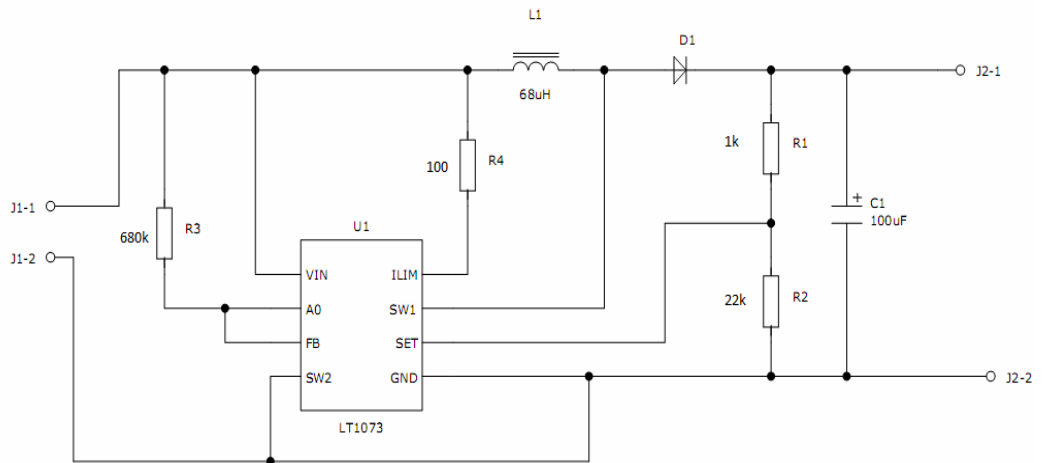
Vylepšení návrhu přicházející v úvahu jsou například: bateriová záloha, bezdrátový přenos dat, senzor rychlosti větru, ovládání zařízení pomocí GSM, zpracování programu pro dlouhodobou správu naměřených údajů, měření intenzity slunečního záření, měření dešťových srážek, řešení optimálního pracovního režimu motoru a voděodolná konstrukce. Všechna tato vylepšení by významně zvedla užitnou hodnotu zařízení. Bohužel tyto úpravy by si vyžádaly další čas, kterého se ke konci stavby už nedostávalo. Tyto další vylepšení však ani nebyli v zadání práce, takže jejich absence nevádí.

Seznam použité literatury:

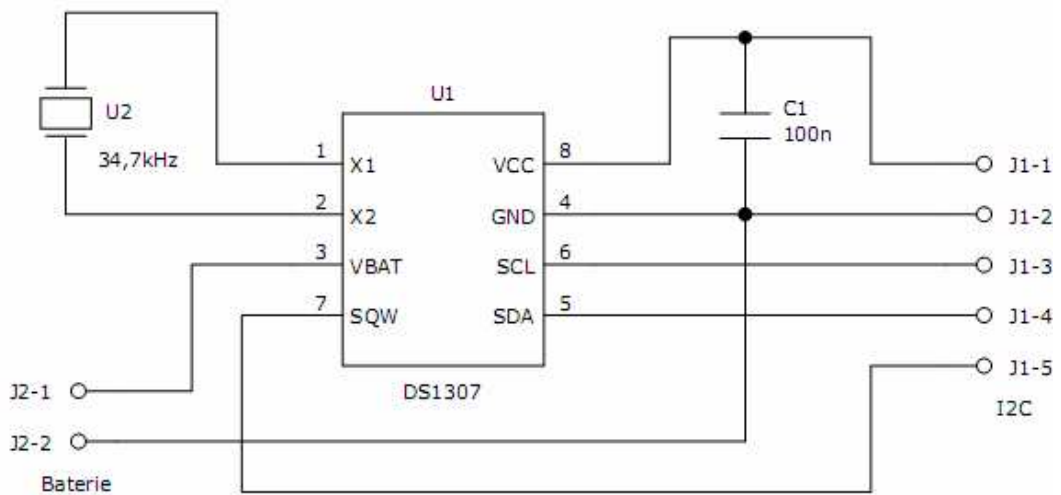
- [1] TANTOS, Andras. *H-Bridge secrets* [online]. c2004-2007 [cit. 2009-02-04]. Dostupný z WWW: <http://www.modularcircuits.com/h-bridge_secrets1.htm>.
- [2] KRIEG, Bernhard. *Elektrina ze Slunce : Fotovoltaika v teorii a praxi*. Ostrava : HEL, 1993. 223 s.
- [3] BENDA, Vítězslav, BROŽ, Karel. *Slunce ve školách a jak dál.....?*. [s.l.] : Integrovaná střední škola energetická Chomutov, [2005?]. 93 s.
- [4] NEBORÁK, Ivo, SLÁDEČEK, Václav. *Elektrické pohony*. Ostrava : Vysoká škola báňská, 2004. 123 s.
- [5] KOČMAN, Stanislav. *Stejnoseměrné stroje*. Ostrava : Vysoká škola báňská, 2002. 22 s.
- [6] KÜLLENBERG, André. *Ondre's homepage* [online]. 2004 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.ondre.de/index.php?section=electronics&PHPSESSID=qvaejoph47pq11k7cns8b90db6>>.
- [7] *Solar Cell* [online]. 13 August 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>.
- [8] *LT1073*. [s.l.] : Linear Technology Corporation, 2000. 16 s.
- [9] *ATMEGA32*. 13th enl. edition. [s.l.] : Atmel Corporation, 2008. 340 s.

Přílohy:

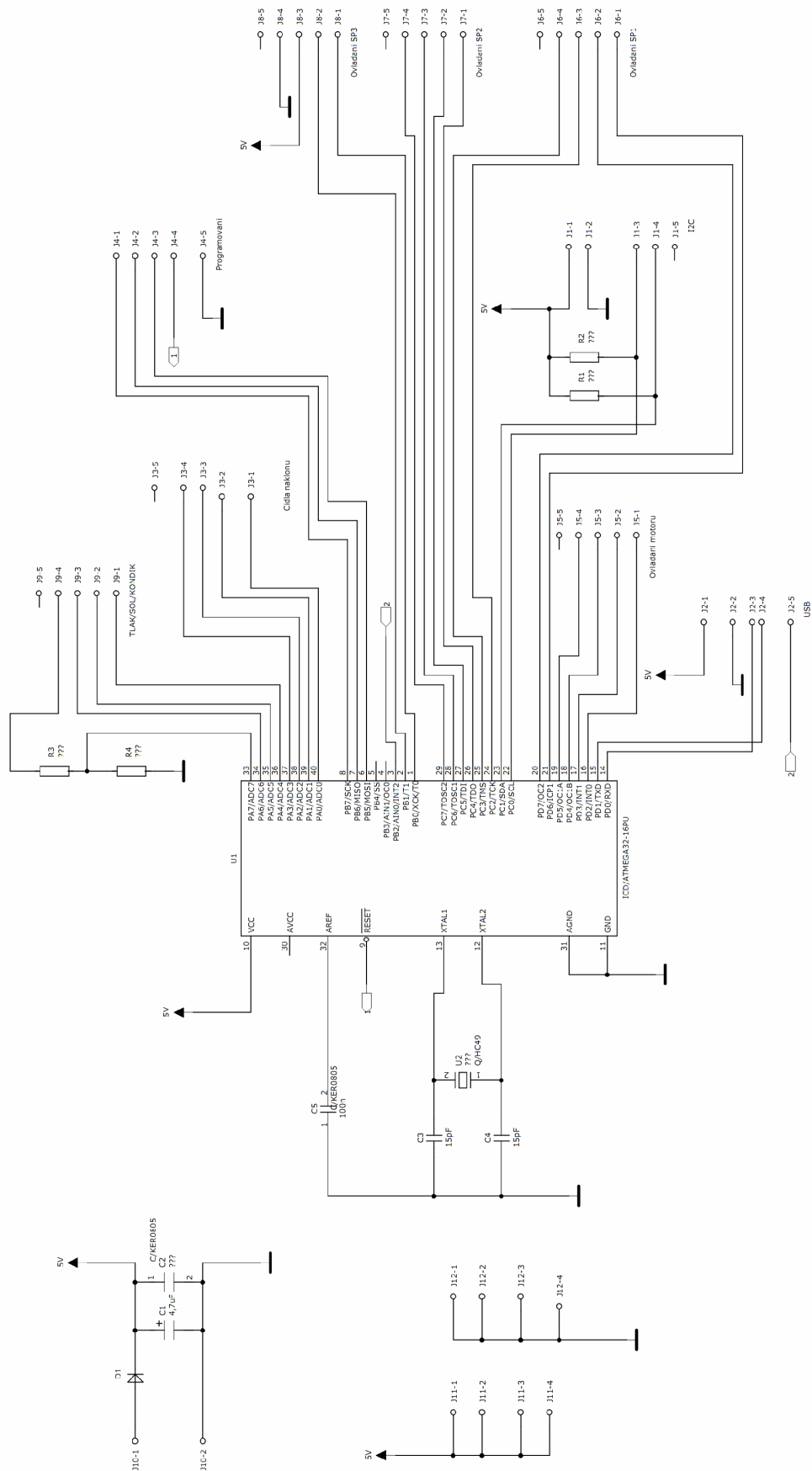
Příloha A:



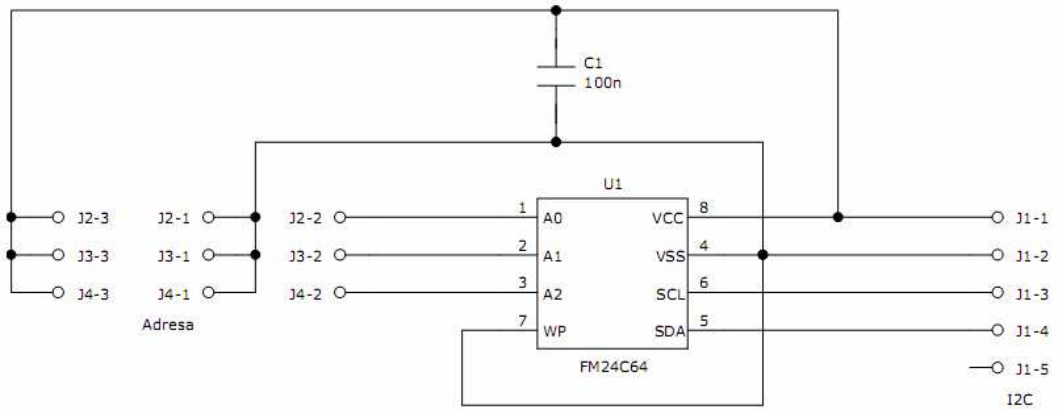
Obr. A1 Schéma použitého zapojení obvodu LT1073 jako step-up DC/DC měniče



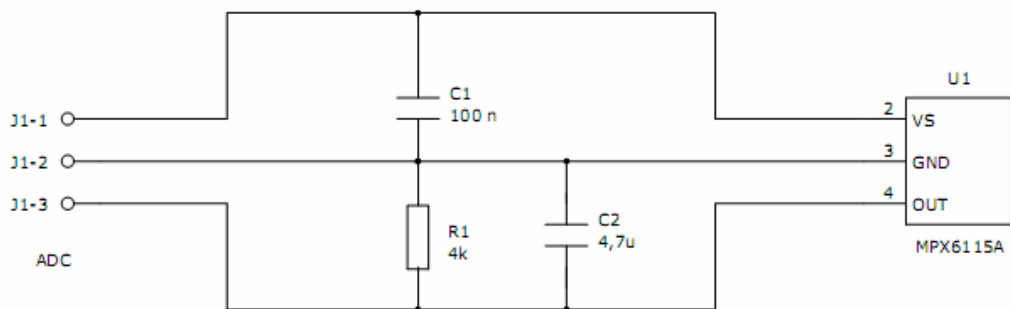
Obr. A2 Schéma zapojení obvodu hodin DS1307



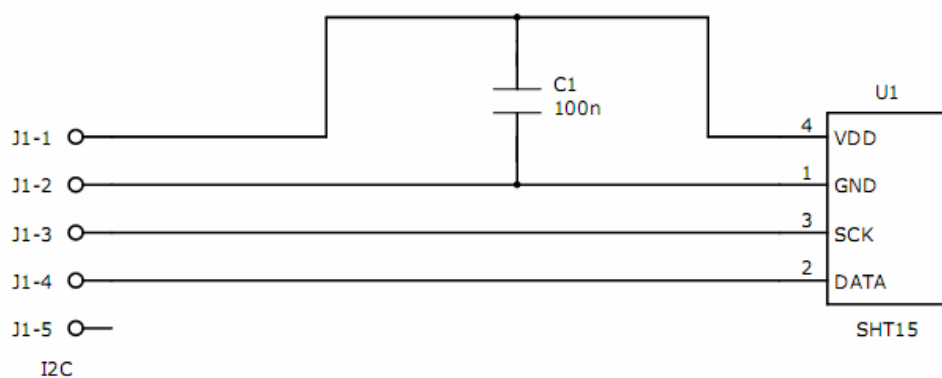
Obr. A3 Nejdůležitější část zařízení obsahuje mikroprocesor, k tomuto obvodu se připojují všechny ostatní moduly



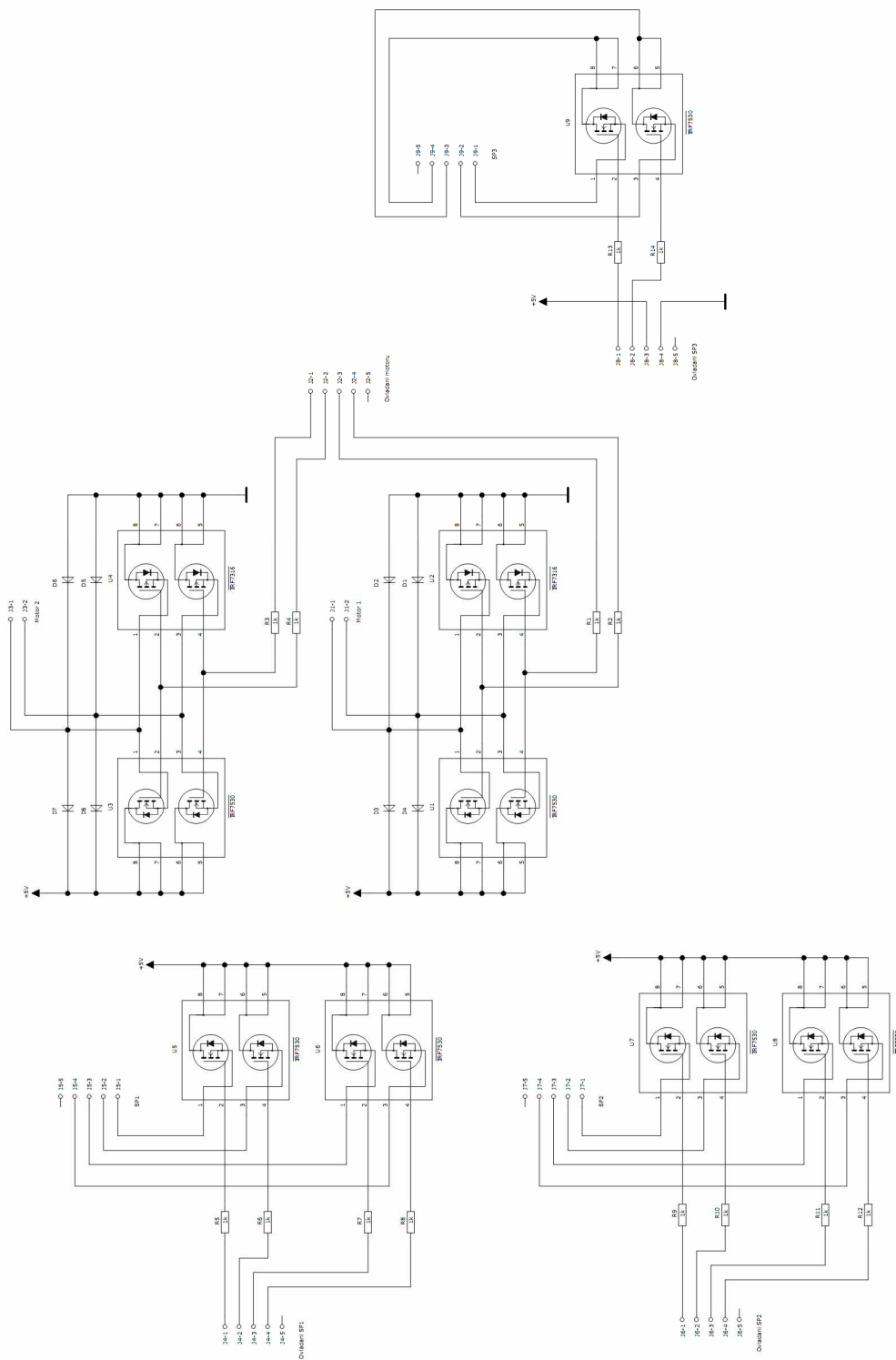
Obr. A4 Schéma zapojení paměťového modulu s obvodem FM24C64



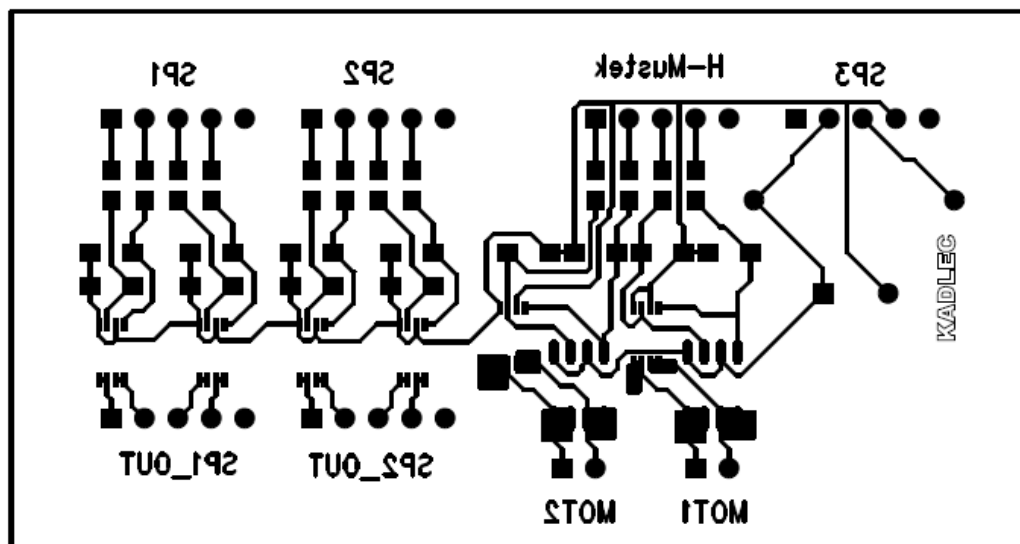
Obr. A5 Zapojení senzoru tlaku MPX6115A



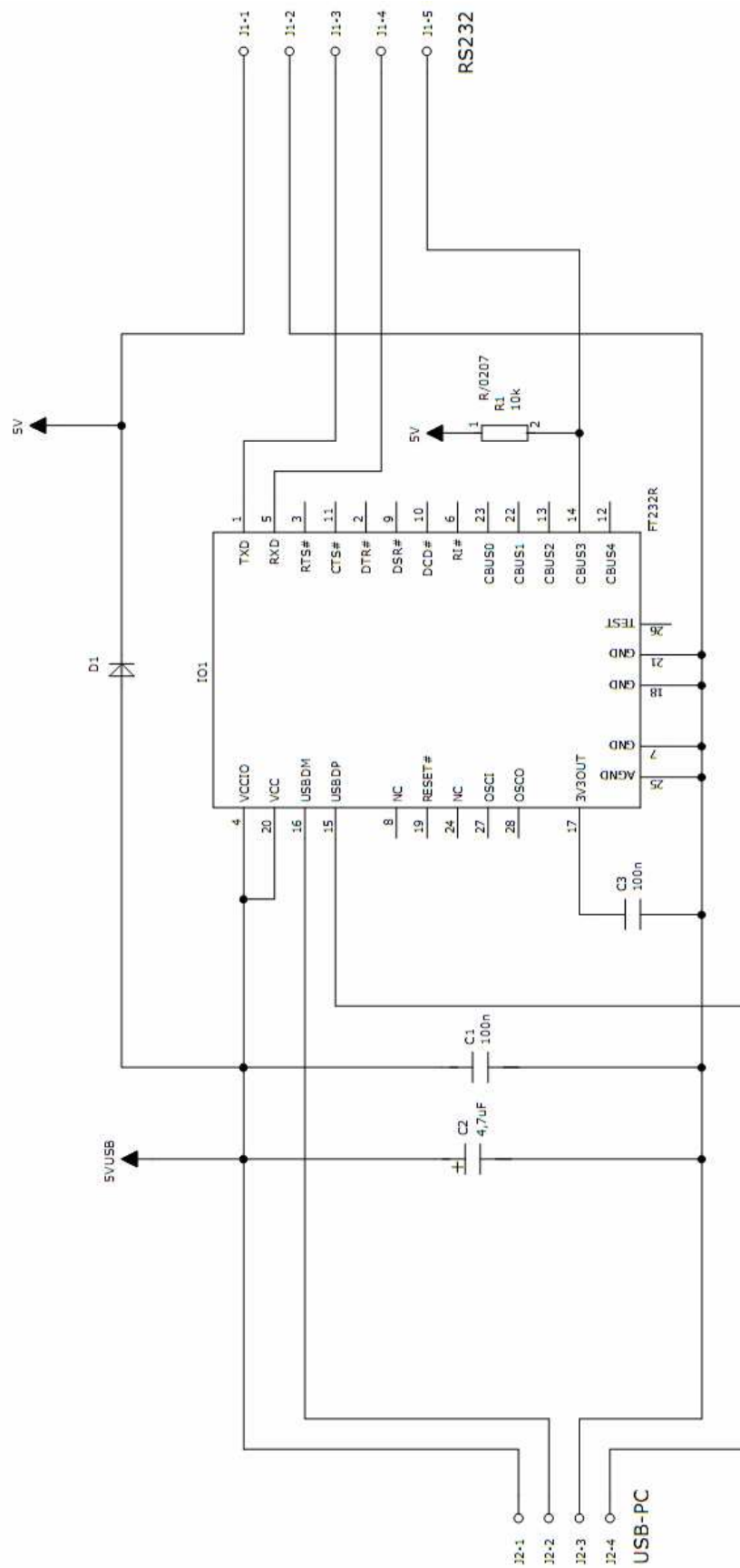
Obr. A6 Vlhkost a teplota, obvod SHT15 nepotřebuje téměř žádnou externí součástku



Obr. A7 H-můstek a spínače, tranzistory jsou v pouzdrech ve dvojicích

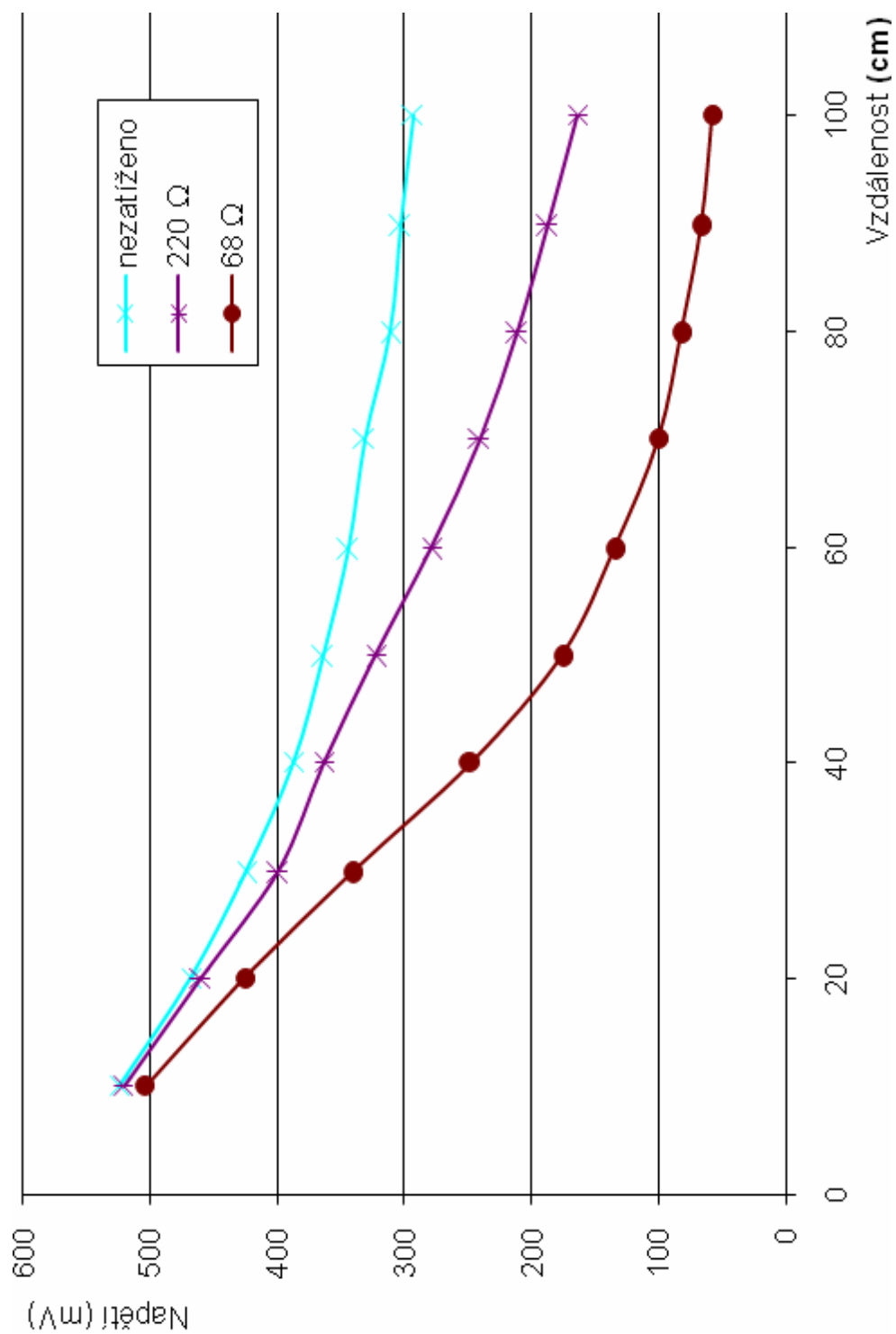


Obr. A8 Plošný spoj pro zapojení z Obr. A7

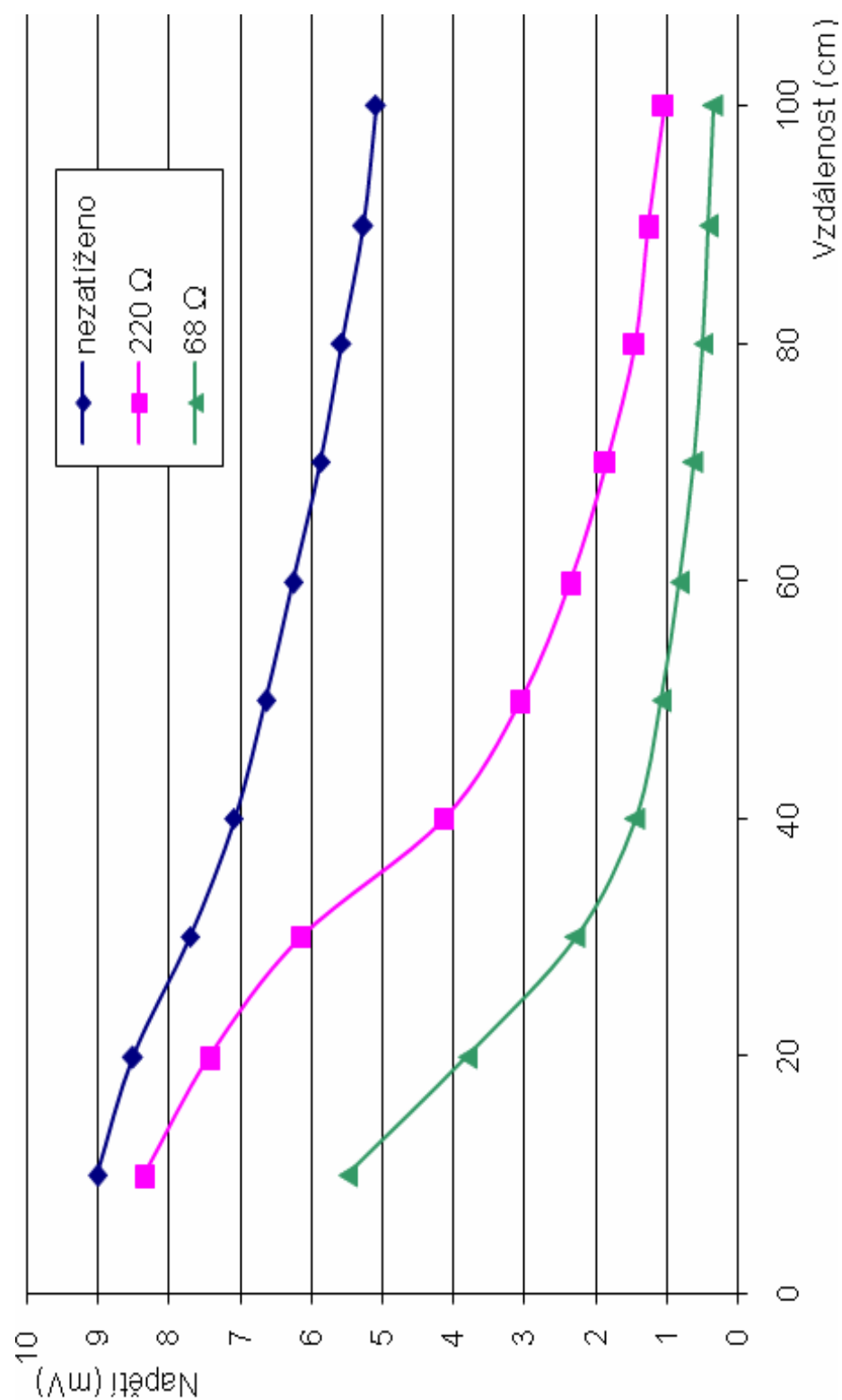


Obr. A9 RS232->USB, obvod FT232R se připojuje přímo ke sběrnici USB a RS232, to velmi zjednodušuje zapojení

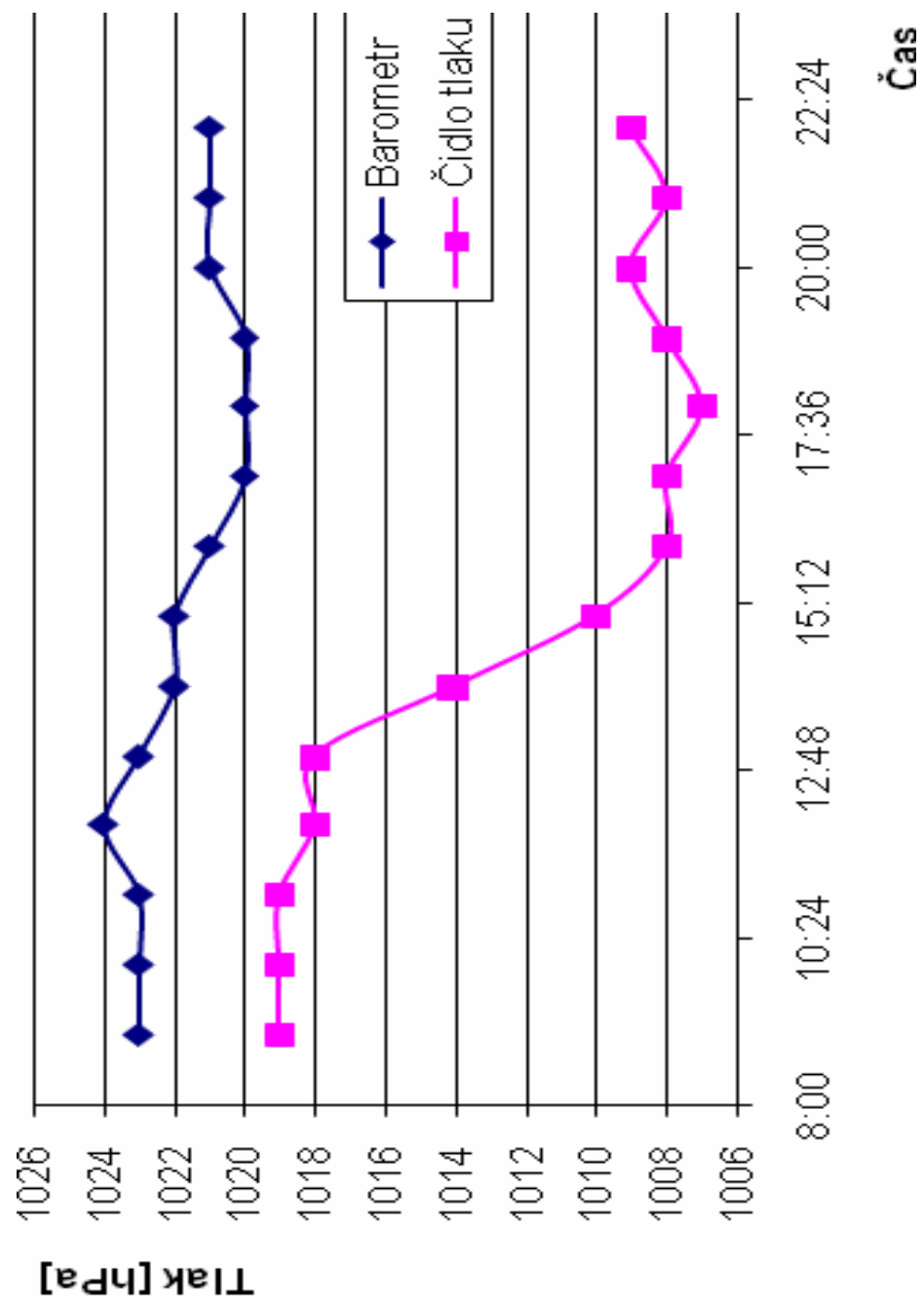
Příloha B:



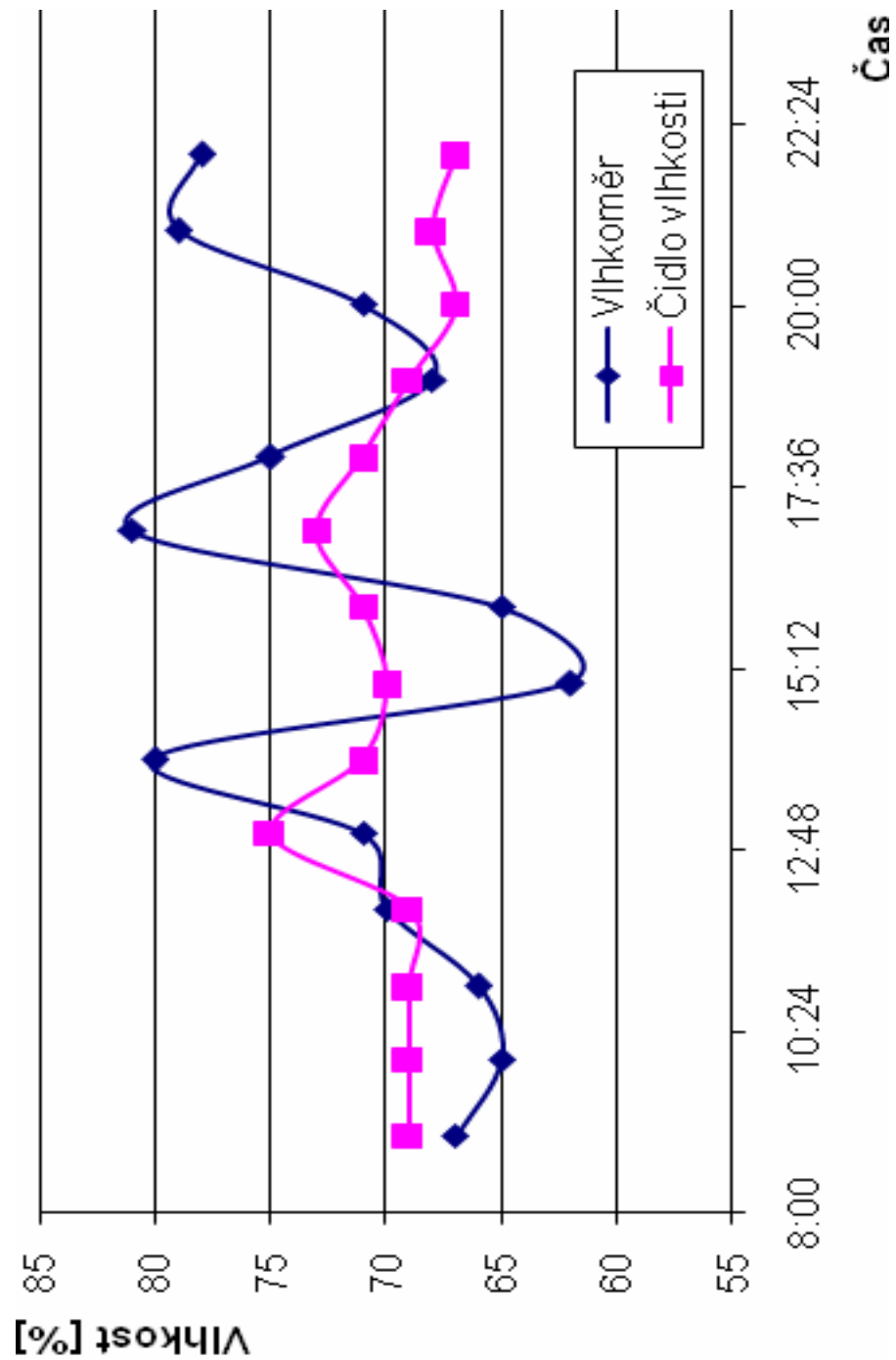
Obr. B1 Závislost výstupního napětí na vzdálenosti zdroje (1 sol. řez)



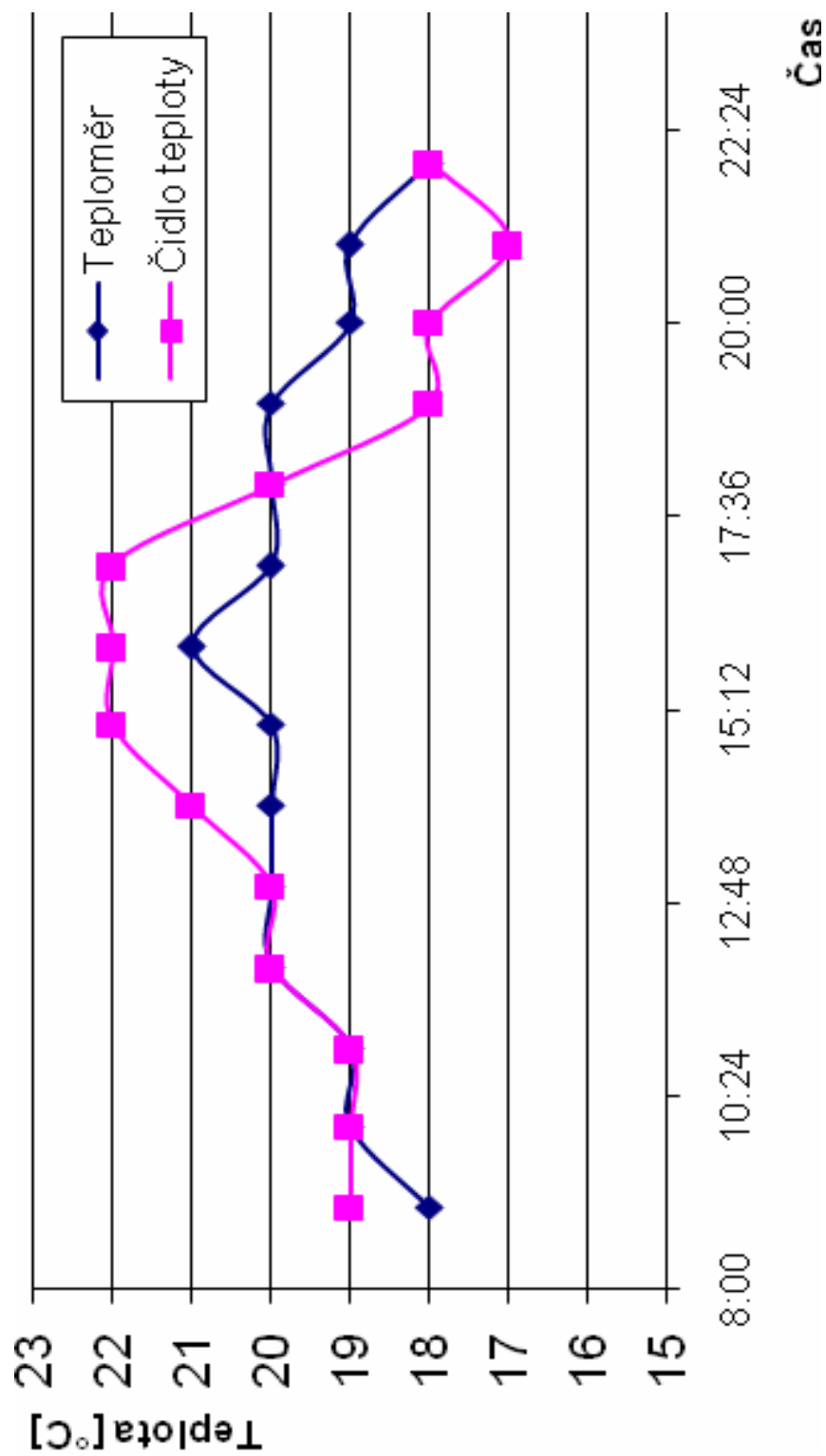
Obr. B2 Závislost výstupního napětí na vzdálenosti zdroje (solární panel)



Obr. B3 Průběh naměřeného tlaku na tlakovém čidle a domácím tlakoměru



Obr. B4 Průběh vlhkosti na čidle vlhkosti a domácím vlhkoměru



Obr. B5 Průběh teploty na teplotním čidle a teploměru