

**Univerzita Hradec Králové**  
**Fakulta informatiky a managementu**  
**Katedra informatiky a kvantitativních metod**

Chytré řešení alternativního zdroje energie pro chytré domy

Diplomová práce

Autor: Bc. Jakub Vít  
Studijní obor: Aplikovaná informatika

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Krejcar, Ph.D.

Hradec Králové

listopad 2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne 8. listopadu

Jakub Vít

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Krejcarovi, Ph.D. za cenné rady, podporu a odborné vedení diplomové práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací chytrého fotovoltaického zdroje energie. Popisuje proto jak princip činnosti fotovoltaického panelu a vlivy působící na jeho účinnost, tak i způsoby, jak dosáhnout vyššího energetického zisku. Na základě činnosti řídicího algoritmu je mikrokontrolérem ovládaná elektronika chytrého zdroje schopná zajišťovat optimální nastavení čelní plochy panelu vůči Slunci a měřit energetickou bilanci celého zařízení. Jednotlivá elektronická zařízení, která byla v rámci této práce sestavena, přímo využívají, nebo vycházejí z komponent vývojového kitu Arduino. V této práci je také navrženo a realizováno řešení zajišťující vizualizaci a ukládání naměřených dat. Vyhodnocení míry přínosu chytrého zdroje v praktickém provozu je provedeno na základě porovnání s naměřenými daty získanými z fotovoltaického panelu s pevným umístěním.

**Klíčová slova:** Arduino, fotovoltaika, obnovitelný zdroj, sledovač Slunce

## **Annotation**

**Title:** Smart solution of alternative energy source for smart houses

This thesis describes the design and implementation of smart photovoltaic power source. It describes the principle of solar irradiation to energy transformation and influences on its effectiveness, as well as ways to achieve higher energy gain. Based on the operation of the control algorithm the microcontroller-controlled electronics is capable of providing optimal adjustment of the front surface of the panel towards the Sun. It is also capable of measuring the energy balance of the whole device. All individual electronic devices that was built as a products of this thesis are directly using or are based on Arduino development kit. This work also designs and implements solutions that provide visualization and storage of measured data. Evaluation of the benefit of smart power source in practical operation is performed on the basis of comparison with the measured data obtained from the photovoltaic panel with fixed position.

**Key words:** Arduino, photovoltaics, renewable power source, Sun tracker

# Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Chytré domy a praktické využití chytrého zdroje</b>	<b>3</b>
2.1. Možnosti použití zdroje . . . . .	5
<b>3. Konstrukční řešení fotovoltaických zdrojů</b>	<b>6</b>
3.1. Fotovoltaický článek a princip jeho funkce . . . . .	7
3.2. Základní typy fotovoltaických článků . . . . .	9
3.3. Vlivy na účinnost fotovoltaických panelů . . . . .	11
3.4. Panely s proměnným nastavováním polohy . . . . .	15
3.5. Akumulátory . . . . .	20
<b>4. Návrh mechanické části chytrého zdroje</b>	<b>23</b>
4.1. Podstava a mechanismus azimutálního otáčení . . . . .	24
4.2. Horizontální naklápění panelu . . . . .	26
4.3. Umístění a připojení řídicí elektroniky . . . . .	27
4.4. Připojení akumulátoru . . . . .	28
<b>5. Návrh řídicí elektroniky chytrého zdroje a řídicí elektroniky stacionárního panelu</b>	<b>29</b>
5.1. Platforma Arduino a použité mikrokontroléry . . . . .	30
5.2. Senzorika a periferie . . . . .	33
5.3. Nabíjení akumulátoru . . . . .	45
5.4. Stacionární varianta bez naklápění panelu . . . . .	47
5.5. Webové rozhraní pro zobrazení dat . . . . .	50
<b>6. Řídicí software chytrého zdroje</b>	<b>53</b>
6.1. Kontrola stavu systému . . . . .	56
6.2. Vyčítání hodnot přepínače na plošném spoji . . . . .	58
6.3. Úprava orientace solárního panelu . . . . .	59
6.4. Návrh a implementace monitorování energetické bilance . . . . .	64
6.5. Sestavení a odeslání naměřených dat . . . . .	66

---

<b>7. Testování realizovaného řešení</b>	<b>67</b>
7.1. Metodologie testování . . . . .	67
7.2. Výsledky testů . . . . .	68
7.3. Shrnutí výsledků testů . . . . .	73
<b>8. Diskuze výsledků realizovaného řešení</b>	<b>75</b>
8.1. Možnosti pro další rozšíření . . . . .	77
<b>9. Závěr</b>	<b>78</b>
<b>11. Seznam použité literatury</b>	<b>82</b>
<b>A. Přílohy</b>	<b>I</b>
A.1. Pokyny k provozu . . . . .	I
A.2. Obsah příloženého CD . . . . .	II
A.3. Hardware webového serveru . . . . .	III
A.4. Schéma vzájemného propojení . . . . .	III
A.5. Odhad nákladů . . . . .	IV
A.6. Rozložení součástí řídicí elektroniky chytrého zdroje . . . . .	V
A.7. Schémata zapojení elektroniky chytrého zdroje . . . . .	VII
A.8. Schémata zapojení elektroniky panelu s fixní polohou . . . . .	XV
A.9. Schémata zapojení regulátoru napětí . . . . .	XVIII

# Seznam obrázků

1.	Schéma fotovoltaického článku.[11]	9
2.	Příklad vlivu teploty na voltampérovou charakteristiku panelu.[9]	13
3.	Průměrná roční doba slunečního svitu.[4]	14
4.	Porovnání pohyblivého uchycení panelů. a) S polárním nastavením. b) S azimutálním nastavením.[2]	18
5.	Ztráta vyrobené energie v porovnání s optimálním natáčením panelu.[2]	19
6.	Odhadovaný zisk při využití sledovačů Slunce.[14]	20
7.	Reálná konstrukce chytrého zdroje energie.	24
8.	Blokové schéma zařízení.	31
9.	Regulace proudu v průběhu dobíjení akumulátoru.	46
10.	Diagram řídicího algoritmu elektroniky pevně umístěného panelu.	49
11.	Úvodní stránka webového rozhraní s tabulkou hodnot.	52
12.	Diagram činnosti řídicího algoritmu chytrého zdroje.	54
13.	Změny v orientaci panelu v průběhu testovacího dne.	62
14.	Formát výstupního řetězce odesílaného na sériovou linku.	66
15.	Porovnání energetické bilance při jednotlivých měřeních.	69
16.	Měření C: Průběh napětí a proudu chytrého zdroje.	71
17.	Měření C: Průběh napětí a proudu panelu s pevnou polohou.	71
18.	Měření L: Průběh napětí a proudu chytrého zdroje.	72
19.	Měření L: Průběh napětí a proudu panelu s pevnou polohou.	72
20.	Vnitřní uspořádání elektroniky webového serveru.	III
21.	Propojení a komunikační rozhraní komponent sestavy chytrého zdroje.	III
22.	Spodní DPS chytrého zdroje: Rozmístění součástek a popis svorkovnic.	V
23.	Vrchní DPS chytrého zdroje: Rozmístění součástek a popis svorkovnic.	VI



# Seznam tabulek

1.	Porovnání rozdílných parametrů použitých mikrokontrolérů. . . . .	32
2.	Některé volitelné parametry ovlivňujících činností zařízení. . . . .	55
3.	Tabulka hodnot naměřených během testování chytrého zdroje. . . . .	70
4.	Odhad vynaložených nákladů na konstrukci jednotlivých zařízení. . . . .	IV

# Seznam ukázek kódu

1. Funkce zajišťující odpojení spínacích kontaktů relé při poklesu napětí akumulátoru. . . . 57
2. Funkce zajišťující nastavení panelu do optimální polohy. . . . . 60

# 1. Úvod

Následkem dlouhodobého technologického vývoje žijeme dnes ve světě, ve kterém jsme stále více závislí na nejrůznějších technologiích. Tato naše závislost se neustále prohlubuje v návaznosti na klesající ceny a rozšiřující se možnosti elektronických zařízení. Proto se můžeme stále častěji setkat s jejich použitím i v takových oblastech lidského života, které se po dlouhou dobu zdály být utopií nebo záležitostí daleké budoucnosti.

Moderním trendem současnosti se stávají realizace takzvaných chytrých domů a domácností. Tento trend se projevuje jednak u novostaveb, zároveň se prvky chytrých domácností využívají při rekonstrukcích.

Tato chytrá řešení bydlení, založená na moderním elektronickém vybavení, přináší celou řadu výhod svým obyvatelům, především se snaží usnadnit jejich každodenní životy. Jedná se o celou řadu více či méně složitých prvků, jejichž úkolem je ulehčit provádění rutinních činností spojených s chodem domácnosti a zároveň snižovat náklady na její provoz. Právě díky tomu je také kladen velký důraz na využití ekologických postupů a takových řešení, která jsou šetrná k přírodě.

Protože lze energii považovat za velmi důležitou komoditu, která je pro chod složité inteligentní domácnosti nezbytná, je nutné zajistit její přísun i v okamžicích, kdy tradiční dodávka není možná, nebo je omezená. Z toho důvodu je třeba přistoupit k takovému řešení, které by dokázalo plnit podpůrnou funkci v případě výpadku energie, nebo by zajistilo celkovou energetickou soběstačnost připojeného systému.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat model zařízení, které by dokázalo plnit úlohu samostatného zdroje energie v rámci chytré domácnosti nebo její části. Toto zařízení by mělo získávat energii z fotovoltaického panelu a bude ovládané mikrokontrolérem. Aby bylo možné o takovém zdroji hovořit jako o „chytrém“ zařízení, bude schopné měnit polohu fotovoltaického panelu tak, aby byl za ideálních podmínek nato-

---

čený vždy tam, kde se nachází Slunce. Zároveň dokáže měřit množství vyrobené energie a množství energie spotřebované na svůj vlastní provoz.

Práci lze pomyslně členit na čtyři hlavní části. V první z nich bude krátce představena myšlenka chytrého domu včetně některých jeho vlastností, které přenáší do běžného každodenního života. Dále v ní bude popsán způsob, jak by mohl být chytrý zdroj v domě využit, jak a na jakém principu bude získávat energii, a také jaké požadavky bude muset splňovat. Ve druhé části pak bude čtenář seznámen s hmatatelnou stránkou zařízení. A to tedy jak s jeho celkovou mechanickou konstrukcí a technickými řešeními, tak i s řídicí elektronikou. Třetí část práce pak bude dále popisovat řídicí program zajišťující chod celého zařízení. Bude také obsahovat popis práce s jednotlivými elektronickými komponentami, které budou využity. Tam, kde to bude možné, budou popsány způsoby, jak změnou některých parametrů v kódu programu mírně upravit chování zařízení v závislosti na způsobu jeho umístění a využití.

Ve čtvrté části pak bude popsána funkce zařízení, zhodnocena úspěšnost jeho návrhu a budou také navržena možná vylepšení. Na několika příkladech měření bude také provedeno hodnocení přínosu chytrého řešení na množství vyrobené energie oproti klasickému řešení.

## 2. Chytré domy a praktické využití chytrého zdroje

Jak je již z názvu práce patrné, možnost praktického využití tohoto zařízení je předpokládáno v oblasti chytrých domů. Takové moderní domy využívají nejrůznějších inteligentních řešení pro řízení chodu domácnosti a stávají se i v podmínkách České republiky čím dál běžnějšími. V praxi se především jedná o použití různých systémů domácí automatizace, jejichž hlavními přínosy typicky bývají úspory nákladů na provoz domácnosti, šetrnost k životnímu prostředí a automatizovaný chod běžných činností spojených s provozem domu.

Automatizovaná domácnost tak například může šetřit finanční prostředky pomocí chytré regulace vytápění domu. Toho lze dosáhnout pomocí kooperace několika systémů. Ideální příklad vznikne, představíme-li si například součinnost řízení hlavního zdroje vytápění, elektronicky řízených žaluzií, teplotních senzorů rozmístěných v jednotlivých místnostech i vně domu a pohybových čidel. Může tak vzniknout systém regulující teplotu v jednotlivých místnostech tak, aby bylo dosaženo tepelné pohody pro přítomné obyvatele. Minimálních nákladů je pak dosaženo tím, že citlivá regulace teploty není prováděna tam, kde se zrovna nikdo nepohybuje. A také tím, že nejsou zbytečně vytápěny nebo klimatizovány prostory, kde k regulaci teploty postačuje omezení, nebo zvýšení množství slunečního záření dopadajícího do místnosti.

Do systému chytrého domu mohou být také implementovány různé zabezpečovací prvky, jako pohybová čidla, kamery a požární čidla. Díky nim může centrální systém regulovat osvětlení uvnitř i vně, zajišťovat vstup do domu a sledovat pohyb v okolí.

Takový systém bývá tradičně řízen centrální řídicí jednotkou, jež zajišťuje propojení jednotlivých zasílovaných periférií. Z uvedeného vyplývá, že do centrální řídicí jednotky je připojeno množství elektronických prvků, jejichž počet je závislý na slo-

---

žitosti konkrétního systému. Do seznamu periférií systému domácí automatizace můžeme zařadit veškerou senzorku, akční členy, ale i rozšiřující vstupně–výstupní moduly a další podřízené řídicí jednotky. Co se týče senzorky, může se například jednat o senzory osvětlení, pohybu, teploty a vlhkosti. Z akčních členů je možné zmínit aktuátory zajišťující pohyb žaluzií, trasování vzduchu skrze rozvody ventilace a otevírání oken. Jako příklady dalších rozšiřujících prvků systému je možné uvést řadiče rozšiřujících sběrnic a bezdrátové komunikační moduly.

Nastavení systému tradičně probíhá skrze uživatelské rozhraní. To může být v závislosti na zvoleném systému realizováno jak jednoduchou instalační krabičkou s několika tlačítky a signalizačními diodami, tak i pokročilým webovým rozhraním nebo mobilní aplikací. Moderní systémy domácí automatizace také umožňují vzdálenou správu chytrého domu, skrze níž je možné sledovat aktuální dění v domě a nastavovat nejrůznější podmínky provozu.

Aby bylo možné všechny tyto funkce realizovat, musí být chytré domy přímo nabitý velkým množstvím elektronických komponent. Ty ke své funkci samozřejmě vyžadují neustálé připojení ke zdroji elektrické energie. Účel chytrého zdroje, jehož prototyp je navržen a realizován v této práci, je tedy zřejmý. Zajistit dodávku elektrické energie vybranému systému či několika systémům chytrého domu.

Chytré domy jsou mimo jiné konstruovány i s ohledem na dobré hospodaření s energiemi. Proto jsou v nich často využité moderní způsoby získávání energie za účelem snížení celkových nákladů na provoz domu. Mezi takové způsoby patří například rekuperace tepelné energie, tepelná čerpadla a využití obnovitelných zdrojů energie. V současnosti je v rozvinutých zemích trendem zvyšování zastoupení obnovitelných zdrojů energie v rámci celkové energetické koncepce. Za obnovitelné zdroje jsou obecně považovány všechny přírodní nefosilní zdroje energie. Konkrétně se jedná o energii slunečního záření, větru, vody, biomasy, bioplynu, okolního prostředí, geotermální energie a také o energii kapalných biopaliv. Pro představu, v roce 2013 činil podíl hrubé výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů na celkové hrubé výrobě elektrické energie v České republice 10,7%. Do roku 2020 je předpokládáno zvýšení tohoto podílu až na 14%. [1, 12]

## 2.1. Možnosti použití zdroje

Obecně je možné představit si dvě hlavní možnosti použití tohoto zařízení. První z nich je možnost připojení chytrého zdroje jako záložního bezpečnostního prvku k zajištění napájení vybraných komponent domácí automatizace. Nelze totiž předpokládat, že bude za všech okolností zajištěna trvalá dodávka elektrické energie přímo z rozvodné sítě. V případě výpadku hlavního přívodu napájení by po nezbytně nutnou dobu zajišťoval zdroj dodávku energie pro důležité prvky, jakými mohou být třeba centrální řídicí jednotka automatizace, případně řídicí jednotka zabezpečovacího systému. Po obnovení přívodu hlavního napájení by se zálohované systémy přepojily zpět a záložní zdroj pokračoval bez zátěže v nabíjení akumulátoru. Pro takové použití by samozřejmě bylo nutné zvážit, jaké systémy bude zdroj v navržené konfiguraci schopen napájet.

Jelikož se jedná o autonomní zařízení, které by k výrobě energie nemělo potřebovat žádné další podpůrné systémy, přímo se nabízí druhý způsob jeho využití. Ten by i více odpovídal vzhledem k velikosti a parametrům sestaveného zařízení. Představme si proto nějaký subsystém, který bychom rádi připojili k chytrému domu a který by splňoval následující kritéria: nízká prioritita jeho činnosti, nízké nároky na dodaný příkon, velká vzdálenost od chytrého domu a potřeba sledovat stav takového systému. Takových použití by jistě bylo možné najít mnoho. Ideálním příkladem může být následující situace. Představme si stavbu bez přívodu elektrické energie na opačném konci pozemku, než je chytrý dům. Abychom mohli takovou stavbu vybavit nějakým systémem propojeným s chytrým domem, bylo by ji nejprve nutné zasíťovat. To se ale nemusí vždy vyplatit, porovnáme-li cenu doprovodných prací s užitnou hodnotou, kterou zřízení takového systému přinese. Ideálním řešením takové situace může být právě autonomní fotovoltaický modul zajišťující trvalé napájení po celou dobu provozu automatizovaného zařízení. Pro komunikaci s centrální jednotkou chytrého domu, může být využito přenosu dat s pomocí jednoduchého bezdrátového komunikačního rozhraní.

Konkrétním příkladem použití, který by splňoval výše uvedená kritéria, by mohlo být například napájení automatizovaného skleníku. Skleník by mohl regulovat a monitorovat podmínky pro pěstování rostlin. Dodávku energie nutné k jeho provozu by pak mohl za vhodných podmínek zajišťovat právě chytrý zdroj.

### 3. Konstrukční řešení fotovoltaických zdrojů

Porovnáme-li dobu existence naší civilizace s odhadovanou životností Slunce, která činí zhruba pět miliard let, lze bezesporu tvrdit, že sluneční světlo pro nás představuje prakticky nevyčerpatelný zdroj energie. Množství energie vyzařované Sluncem má převážně stabilní hodnotu, pouze mírně kolísá v závislosti na momentální sluneční aktivitě, a to ve zhruba jedenáctiletých cyklech. Emitovaná intenzita slunečního záření je přibližně  $64000 \text{ kW/m}^2$ . Využití sluneční energie se v současné době těší velké oblibě a jeho role mezi obnovitelnými zdroji se bude ještě dále upevňovat. Při využívání sluneční energie je ale také nutné počítat s tím, že množství dopadajícího záření je podstatně ovlivňováno celou řadou faktorů, které budou blíže uvedeny v kapitole 3.3.

Sluneční záření je možné využívat několika způsoby, a to aktivně, či pasivně. Pasivní způsob jeho využití je jednoduchý a nepotřebuje žádné speciální součásti. Toho se využívá například při návrhu budov, kde vhodně navržené izolace, akumulární stěny, případně správně orientované prosklené plochy dokážou pracovat s dopadající sluneční energií, a mohou tak snížit náklady na vytápění a zvýšit uvnitř tepelný komfort.

Oproti tomu k aktivnímu využití slunečního záření je třeba dalších technických prostředků, které zajišťují přeměnu dopadajícího záření na jiné druhy energie. Například na teplo nebo elektrickou energii. Přeměna záření na teplo je prováděna pomocí solárních kolektorů. Dopadající energie v těchto zařízeních zajišťuje ohřev přenosového média, například nemrznoucí kapaliny či oleje. Ohřátá kapalina pak ve výměníku předává tepelnou energii k dalšímu využití. Tímto způsobem lze ohřívat užitkovou vodu a zajišťovat vytápění budov. Některé systémy také umožňují výrobu páry, čímž se potenciál dalšího využití této energie ještě rozšíří. Například o výrobu elektrické energie pomocí parogenerátorů.[2]



Pro přeměnu slunečního záření přímo na elektrickou energii je využíváno fotovoltaických článků. Některé jejich typy, vlastnosti a princip funkce budou blíže popsány v následující kapitole.

### 3.1. Fotovoltaický článek a princip jeho funkce

Transformace energie slunečního záření na elektrickou energii probíhá díky takzvanému fotovoltaickému jevu. Zásahu na jeho objevení má především francouzský fyzik Alexandr Edmond Becquerel, který jej pozoroval v první polovině devatenáctého století. Při svých laboratorních pokusech s kovovými deskami ponořenými v elektrolytu si totiž všiml zajímavého úkazu. Bylo-li zařízení vystaveno světlu, vznikl na elektrodách z různých materiálů rozdíl potenciálů a obvodem začal procházet malý proud. Jeho pozorování tak přivedlo na svět myšlenku přeměny světla na elektrickou energii. První opravdový fotovoltaický článek způsobilý pro hromadnou výrobu představil americký vynálezce Charles Frittz roku 1883. Jednalo se o seleniový článek o ploše  $30 \text{ cm}^2$  s účinností 1 %.[3, 5]

O konečné objasnění fotovoltaického jevu se však postaral až Albert Einstein roku 1905, kdy jej vysvětlil spolu s teorií relativity. Byla totiž formulována teze, že veškeré záření může mít charakter částice, ale i vlnění. Záření, včetně slunečního, je tvořeno částicemi zvanými fotony, které se v pevně daných kvantech<sup>1</sup> pohybují rychlostí světla. Stejně jako každé vlnění, lze i sluneční záření konkrétně popsat pomocí údaje o jeho frekvenci, případně vlnové délce. Energie záření je přímo úměrná jeho frekvenci.[13]

Fotovoltaický jev nastává, dosáhne-li energie záření minimálně úrovně pro excitaci elektronů daného materiálu. To znamená, že energie dopadajícího záření musí být větší, než je šířka zakázaného pásu. Fotony tak začnou vyrážet elektrony z vazeb, čímž vzniknou volné elektrony, které přecházejí z valenčního do vodivostního pásu atomu. Elektrony, které opustí vazbu, po sobě zanechají místo s kladným elektrickým nábojem, které nazýváme díra. Nemají-li elektrony dostatečnou energii na opuštění materiálu, jsou znovu přitaženy, usadí se zpět ve vazbách a jejich energie se promění v teplo.

<sup>1</sup>Nejmenší množství vyslaného záření, které nese přesně definované množství energie. Poprvé formulováno již roku 1900 německým vědcem Maxem Planckem.[13]

Pro přeměnu dopadajícího záření na elektrickou energii není vhodné, aby uvolněné elektrony opouštěly materiál, nebo ihned rekombinovaly. Je třeba zajistit, aby volné nosiče náboje procházely požadovaným směrem skrze elektrický obvod a teprve až následně rekombinovaly s volnými dírami. K tomu je využito specifických vlastností polovodičových materiálů, které vynikají svou schopností vést za určitých podmínek elektrický proud. Proto se pro výrobu elektřiny využívá vnitřního fotoelektrického jevu právě v polovodičovém materiálu.

Spojením dvou dopovaných polovodičových materiálů s různými druhy vodivosti vznikne takzvaný P–N přechod. Ten využívá rozdílných vlastností polovodičů typu P<sup>2</sup> a typu N<sup>3</sup>. V místě spojení těchto dvou materiálů vzniká vlivem prostorových nábojů vyprázdňená oblast bez volných nosičů náboje. Dopadající záření pak způsobí, že dojde k tvorbě volných elektronů, které se hromadí ve vrstvě N. Projevem tohoto procesu je vznik rozdílu potenciálů mezi oběma vrstvami. Díky schopnosti přechodu P–N propouštět nosiče náboje pouze jedním směrem lze po připojení do obvodu pozorovat vznik stejnosměrného elektrického proudu.[2, 5, 7]

Z výše uvedeného vyplývá, že solární článek si lze představit jako polovodičovou diodu s velkou plochou P–N přechodu. Velká plocha přechodu je nutná s ohledem na maximalizaci množství dopadajícího záření. Výkonové parametry článků se různí v závislosti na typu užitého polovodiče. Křemíkový článek například, je-li optimálně zatížen, má výstupní napětí kolem 0,5 V. Hodnota stejnosměrného proudu na výstupních kontaktech článku je pak závislá především na ploše přechodu a na typu dopadajícího záření. Schéma fotovoltaického článku je vidět na obrázku 1/s9.[3]

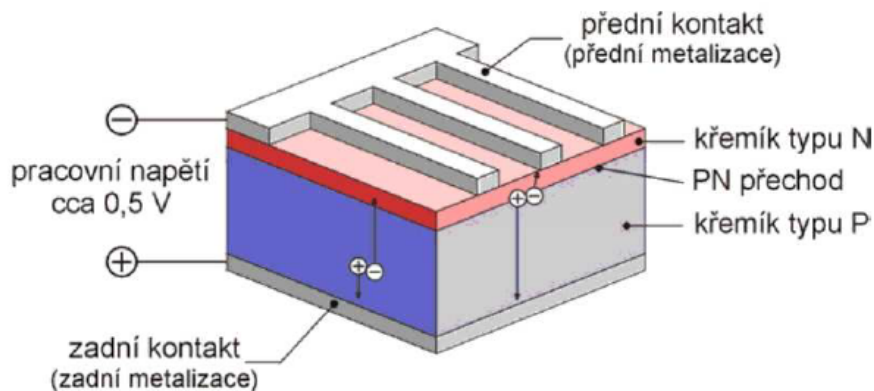
Aby bylo možné energii účinně využívat, je nutné články vhodně spojit do větších a konstrukčně odolnějších celků, které nazýváme fotovoltaickými panely. Sestava článků je zapojená tak, aby dosahovala požadovaného výstupního napětí a proudu. Běžně se používají panely se 36 nebo 72 články, které generují napětí 18 V a 36 V.

---

<sup>2</sup>Přidáním trojmocných příměsí (indium, bor) ke čtyřmocnému polovodičovému materiálu zůstanou po vytvoření všech vazeb některá místa neobsazená, neboť není v materiálu dostatek elektronů. Tomuto jevu říkáme děrová (positivní) vodivost.[7]

<sup>3</sup>Je-li polovodičový materiál dopovaný atomy pětímocných příměsí (např. fosfor, arsen), vzniknou po vytvoření vazeb s původním čtyřmocným polovodičem slabě vázané elektrony. Tedy materiál s výslednou elektronovou (negativní) vodivostí.[7]

To zaručuje nenáročnost na údržbu, dlouhou garantovanou životnost, stálost vlastností a schopnost odolávat nepříznivým vlivům počasí, kterými mohou být kroupy, sníh a silný vítr.[3]



Obrázek 1.: Schéma fotovoltaického článku.[11]

### 3.2. Základní typy fotovoltaických článků

Na trhu jsou stále nejvíce rozšířené solární články na bázi křemíku. Jedná se o v praxi prověřený nejedovatý materiál a také o jeden z nejrozšířenějších prvků na Zemi. Pro výrobu článků se obvykle používá křemík, který svou čistotou nevyhovuje pro použití při výrobě elektroniky. Jednotlivé typy článků se mezi sebou liší především způsobem a náročností výroby a také svými výslednými vlastnostmi. Například tvarem, barvou a účinností.[6]

Samozřejmě existují i fotovoltaické články pracující na odlišných principech, nebo takové, které dokonce nevyužívají polovodičových materiálů. Například se jedná o fotogalvanické články, organické polovodiče a články využívající vhodných nanostruktur, u nichž je možné nastavit šířku zakázaného pásu. Jejich nevýhodou jsou zatím poměrně malé dosahované účinnosti, stabilita výkonu a životnost. V praxi se tudíž příliš nepoužívají.[3]

### 3.2.1. Monokrystalické články

Jsou vůbec prvním druhem solárních článků, které byly v praxi široce použity. Vyrobeny jsou z ingotů monokrystalického křemíku, jež jsou získávány metodou pomalého tažení z taveniny čistého křemíku. Po dokončení procesu krystalizace se tyč čistého křemíku seřízne na požadovaný průřez, který určuje výsledný tvar solárního článku. Pro různé druhy použití mohou být vhodné jiné tvary článků. Do pravoúhlých konstrukčních modulů se například kvůli využití plochy nehodí půlkulaté články z tyčového ingotu. Platí také, že čím větší je plocha článku, tím větší je jeho výkon, ale také spotřeba vstupního materiálu. Ingoty jsou následně rozřezány na tenké plátky a vyleštěny. Nařezané plátky s příměsí typu P jsou dále opatřeny tenkou vrstvou polovodiče typu N, čímž vznikne požadovaný P–N přechod.

Než je výroba článku dokončena, zbývá ještě několik posledních kroků výroby, například je třeba opatřit článek kontakty pro připojení do obvodu. Dále je nutné zvýšit míru absorpce záření a vhodně omezit množství záření, které se od článku odráží zpět do okolí. Toho je dosaženo nanesením antireflexní vrstvy a také prostřednictvím mikroskopických struktur, které se na povrchu článku utvářejí chemicky, mechanicky nebo působením laseru.

Monokrystalické články vynikají dlouhodobou stabilitou výkonu a dobrou účinností až 21 %. Nevýhodou je však technologicky a energeticky náročná výroba a velká spotřeba křemíku.[3, 6]

### 3.2.2. Polykrystalické články

V současné době se jedná o velmi rozšířený typ článků. Je snadné je rozpoznat podle jejich modré hrubozrnné struktury. Výroba polykrystalických článků probíhá metodou blokového lití. Zahřátý křemík je odléván do forem, přičemž tak vzniknou čtvercové či obdélníkové polykrystalické bloky. Po nařezání na jednotlivé destičky tloušťky 0,3 mm dochází k nanesení vrstvy polovodiče s příměsí typu N, antireflexní vrstvy a k přidání kontaktů. Jejich výroba je jednodušší a levnější než u článků z monokrystalu. Umožňuje také vytvořit články větších rozměrů s účinností 13–16 %. Nevýhodou polykrystalických solárních článků však je to, že nedosahují takových výkonových parametrů jako jejich monokrystalická alternativa. [3, 6].

### 3.2.3. Amorfnní články

Panely na bázi amorfnního křemíku využívají tenkovrstvých výrobních technologií. Důvodem jejich vzniku byla převážně snaha o snížení energetické náročnosti a množství odpadu vznikajícího při výrobě. Mezi výhodné vlastnosti tenkovrstvých článků patří: pružnost, ohebnost, nižší vliv zastínění na výkon článku a volitelně i částečná průhlednost materiálu.[3, 6]

Princip výroby je založen na rozkladu sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře při teplotě 200 °C. Pomocí tohoto procesu lze na vhodnou podložku nanést tenké amorfnní struktury. A právě proto, že není struktura materiálu pravidelná, nedosahují amorfnní články takové účinnosti jako výše zmíněné typy.

Protože je amorfnní křemíková vrstva s vodivostí typu P velmi tenká, nedokáže zachytit příliš mnoho slunečního záření. Zároveň by v ní po doplnění o vrstvu N docházelo ihned k rekombinaci volných nosičů náboje. Struktura článku je tudíž postavena na bázi polovodiče typu PIN<sup>4</sup>. Díky přidání vrstvy typu I dochází k prodloužení doby života nosičů náboje a ke zvýšení množství pohlcovaného záření.

Nevýhodou tohoto typu článků je především nižší účinnost (5–7 %) a nestálost výkonových parametrů. Výkon článků v prvním roce používání značně klesá. Teprve poté dosáhne jmenovité hodnoty udávané výrobcem. Pro zvýšení účinnosti amorfnních článků lze použít jejich vícevrstvé varianty, které využívají několika přechodů PIN na sobě. Takové přechody lze dodatečně upravit pro lepší využití určitého spektra slunečního záření. Fotony s nízkou energií jsou pohlcovány první polovodičovou vrstvou, zatímco ostatní částice záření pronikají do hloubky k dalším vrstvám struktury článku.[6]

## 3.3. Vlivy na účinnost fotovoltaických panelů

Provoz fotovoltaických systémů ovlivňuje mnoho faktorů. Především se jedná o zeměpisnou šířku, roční dobu, stav atmosféry a orientaci panelu vůči Slunci. Většinu těchto faktorů sice nelze přímo ovlivnit, lze ale podle nich vybrat nejvhodnější místo pro umístění solárního systému.

<sup>4</sup>Jedná se o druh P–N přechodu, kde je mezi vrstvou P a N vložena ještě vrstva čistého nedotovaného polovodiče.

Tedy materiálu s pouze vlastní (intrinzičnou) vodivostí.[7]

### 3.3.1. Počasí a zemská atmosféra

Přestože na naši planetu dopadá ve výsledku jen malá část Sluncem emitované energie, stále činí střední intenzita záření dopadajícího na povrch zemské atmosféry zhruba  $1367 \text{ W/m}^2$ . Tato hodnota se jinak také nazývá solární konstanta. Intenzita záření dopadajícího až na povrch Země je především ovlivněna aktuálním stavem atmosféry. Část spektra záření je pohlcena plyny a částicemi, které jsou v atmosféře obsaženy, další část je odražena zpět do vesmírného prostoru. Intenzita zbývající energie po průchodu atmosférou se udává  $1100 \text{ W/m}^2$ .

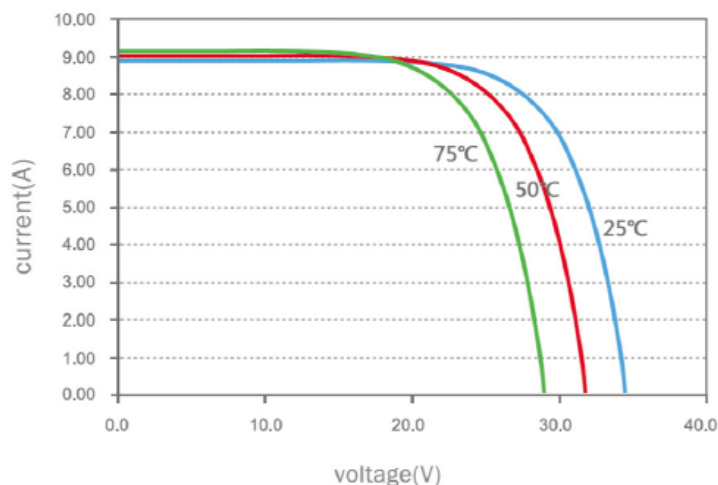
Průchod slunečního záření atmosférou má značný vliv na výsledné množství dopadající energie. Jak se během dne mění poloha Slunce nad obzorem, mění se i množství vzduchu, kterým musí záření projít mezi Sluncem a povrchem planety. Nejvyšší intenzity dopadající energie je dosahováno v okamžiku, kdy sluneční záření urazí skrze atmosféru nejkratší cestu. Pro tyto účely je definován takzvaný  $AM^5$  faktor. Nachází-li se panel mimo zemskou atmosféru, pracuje s  $AM=0$ , protože neexistuje žádná atmosféra, která by sluneční záření ovlivňovala. Je-li však panel umístěn na hladině moře se Sluncem v nejvyšším bodě kolmo k zemi, hovoříme o  $AM=1$ .  $AM$  faktor se zvyšuje tím více, čím je Slunce blíže k horizontu. Pro mnoho částí světa se používá jeho střední roční hodnota  $AM = 1,5$ .

Přestože může být poloha Slunce vůči panelu ideální, dopadající záření nemusí nabývat své maximální možné hodnoty. Záření je totiž ovlivněno průchodem atmosférou a lze ho dělit na přímou a rozptýlenou složku. Všesměrové difúzní záření je přítomné vždy, zatímco přímá složka nemusí být v závislosti na počasí v dopadajícím záření vůbec zastoupena. Velkou měrou se na tom podílí oblačnost. Mraky totiž odrážejí a rozptylují záření, což vede ke snížení celkové intenzity dopadajícího záření a právě k posílení zastoupení difúzní složky na úkor složky přímé. Jelikož jsou různé druhy fotovoltaických panelů odlišně citlivé na rozptýlené světlo, projeví se poměr zastoupení jednotlivých složek světla na jejich účinnosti rozdílně.

Protože je výstupní napětí fotovoltaického panelu ovlivňováno i teplotou, je potřeba volit takové umístění zařízení, aby bylo zajištěno jeho dostatečné chlazení. Příklad vlivu teploty na průběh výstupního napětí a proudu monokrystalického panelu je

<sup>5</sup> Air Mass faktor - definuje efektivní množství vzduchu, které stojí v cestě slunečnímu záření dopadajícímu na zem.

na obrázku 2/s13. Napětí vlivem zahřátí panelu klesá. S každým stupněm teploty se sníží jmenovitý výkon polykrystalických a monokrystalických panelů přibližně o 0,4–0,5 %).[6]



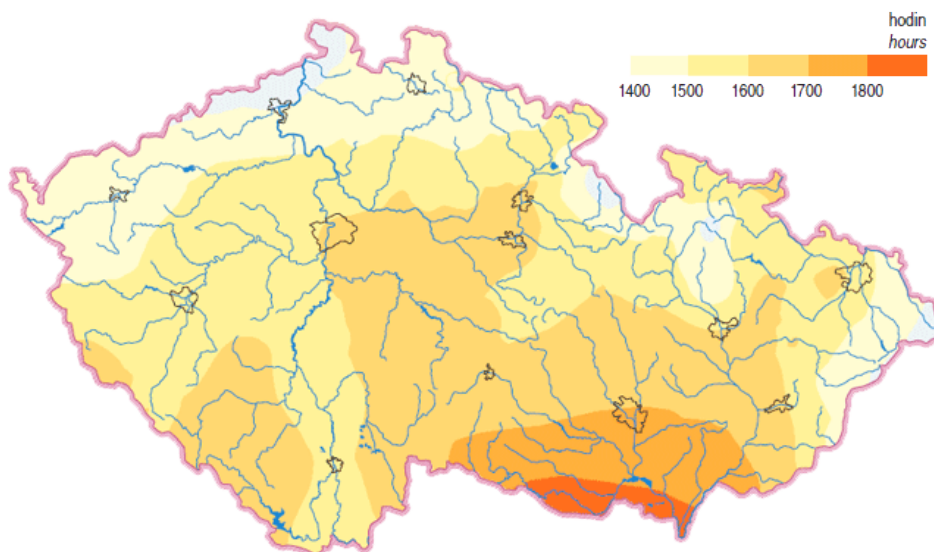
**Obrázek 2.:** Příklad vlivu teploty na voltampérovou charakteristiku panelu.[9]

### 3.3.2. Geografické umístění

Dle literatury [3] platí, že se v České republice průměrná délka slunečního svitu pohybuje v rozmezí 1350–1800 hodin za rok. Průměrnou délku slunečního svitu mezi lety 1961–2000 v jednotlivých krajích lze vidět na obrázku 3/s14. Jsme-li vázáni na konkrétní lokalitu pro umístění fotovoltaického systému, není možné množství dopadajícího záření ovlivnit. Lze si ale z průměrné doby svitu a množství dopadajícího záření udělat představu o vhodnosti a energetickém výnosu takové lokality.

### 3.3.3. Vhodná orientace panelu

Výhodnost fotovoltaického systému je závislá na množství dopadajícího záření a účinnosti jeho přeměny energie na elektrickou energii. Proto je všeobecně důležité snažit se minimalizovat všechny nepříznivé vlivy, které účinnost snižují. Jedním z postupů, kterými lze přispět k získání většího výstupního výkonu fotovoltaického systému, je zajištění vhodného nasměrování. Protože ideální poloha fotovoltaického panelu je kolmo ke zdroji dopadajícího záření, musí být zajištěno, aby bylo jeho nasměro-



**Obrázek 3.:** Průměrná roční doba slunečního svitu.[4]

vání s ohledem na denní pohyb Slunce co neoptimálnější. Minimalizují se tak odrazy a vzrůstá účinnost. U pevně ukotvených solárních systémů je třeba zvolit takovou orientaci, která zaručí dosahování největšího možného průměrného výkonu.

S pevně umístěnými panely bez sofistikovaného naklápění, nevyžadujícími žádnou složitou mechanickou konstrukci, se v naší zemi setkáváme nejčastěji. A to jak ve formě solárních elektráren na volných plochách na zemi, ale také na střeších, balkónech a fasádách domů. V České republice panují nejlepší podmínky pro využití solární energie na jižní Moravě a ve středních Čechách (viz obr. 3/s14).

Orientace čelní strany panelů musí být volena azimutálně směrem k jihu. Jejich sklon vůči zemi je nutné zvolit dle zeměpisné šířky tak, aby v poledne dopadaly sluneční paprsky na panel kolmo. Některé solární systémy s pevnou konstrukcí umožňují provedení změny sklonu panelů mezi zimním a letním obdobím. Pro změnu sklonu je tak většinou třeba využít specializované nářadí a nastavení je prováděno skokově pouze jednou za půl roku. Není-li možné sklon měnit, bývají panely optimalizovány pro zimní provoz. Výhodou pevných systémů je nenáročnost na mechanickou konstrukci. Používají se většinou tam, kde je výhodnější investovat finance do rozšíření množství panelů (za cenu nižšího dosahovaného výkonu na panel), nežli do složitější konstrukce umožňující naklápění. Nejsou-li panely ze zadní strany zakryté, je možné získat větší množ-



ství energie použitím oboustranných modulů, které dokáží využít i záření odražené od podkladu. Největšího zisku lze dosáhnout například na sněhu, betonu, či jiných površích s podobnými odrazovými vlastnostmi.

V místech, kde nelze dosáhnout optimálního nastavení polohy panelů, nebo jsou zastíněné, lze zvýšit celkovou účinnost volbou vhodného druhu panelů. Monokrystalické panely nejlépe pracují s přímým zářením, polykrystalické panely dobře využívají i jeho difúzní složku. Amorfnní panely zase mohou velmi dobře pracovat s širokým spektrem záření a nevyžadují přímý sluneční svit. Bohužel dosahují poměrně malé účinnosti.

Ideální sklon panelu by se měl pohybovat v rozmezí  $35^{\circ}$ – $45^{\circ}$  v závislosti na ročním období. Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, celoročně provozované systémy se nejčastěji montují se sklonem  $45^{\circ}$ . [2, 6]

### 3.4. Panely s proměnným nastavováním polohy

Pro zvýšení účinnosti přeměny slunečního záření na elektrickou energii lze přispět použitím vhodné mechanické konstrukce, která umožňuje průběžně měnit orientaci čelní plochy panelu v souladu s pohybem Slunce po obloze. Zařízení, které tyto korekce polohy provádí, nazýváme sledovač, případně anglickým označením tracker. V praxi se používají různé varianty, které se odlišují způsobem vyhodnocování polohy zdroje záření, mechanickou a elektronickou složitostí konstrukce a také množstvím stupňů volnosti. [2, 8]

Změnami nastavení panelu vůči slunci je dosahováno jeho vhodného pracovního bodu tak, aby v závislosti na okolních podmínkách panel vykazoval nejvyšší výkon. Průběh výstupního napětí a proudu fotovoltaického panelu je patrný na příkladu voltampérové charakteristiky na obrázku 2/s13. Systémy, jež konstrukčně umožňují sledování polohy Slunce, mohou dle zdroje [2] přinést teoretický nárůst účinnosti panelu až o 57 % oproti statickým variantám. To však ale platí pouze tehdy, pokud zanedbáme přítomnost atmosféry. Díky vlivům, uvedeným v kapitole 3.3.1 nelze ale takové účinnosti prakticky dosáhnout.

Tvrdit, že je systém pro natáčení panelu účinný, lze tehdy, je-li splněna podmínka daná následující rovnicí:

$$\varepsilon = (E_t - E_f) - E_c \gg 0$$

Kde  $E_t$  je množství energie vyprodukované panelem s naklápěním,  $E_f$  je množství energie vyrobené staticky umístěným panelem a  $E_c$  představuje objem energie spotřebované na zajištění správné polohy panelu. Aby bylo tudíž možné použití sledovače vyhodnotit jako přínosné, je třeba stanovit si vhodně parametr  $\varepsilon$  v rozmezí 20–50 % z energie získané panelem bez natáčení.[8]

### 3.4.1. Možnosti sledování zdroje záření

Aby bylo možné nastavit solární panely aktivní plochou kolmo k dopadajícím slunečním paprskům, je třeba znát aktuální polohu Slunce na obloze. K tomu je v praxi využíváno několika technických řešení, která budou zmíněna dále. Mezi sebou se jednotlivé způsoby liší konstrukční složitostí a přesností určení polohy.

**Pasivní sledování polohy Slunce:** Sledovače postavené na tomto principu jsou konstrukčně jednoduché, ale také nepříliš přesné. Využívají například teplotní roztažnosti tekutiny s nízkým bodem varu. Mechanická konstrukce solárního panelu je umístěna ve vyvážené poloze na ose otáčení. Na protilehlých stranách panelu jsou připevněny spojené nádrže s freonem<sup>6</sup>, opatřené clonkami. Díky tomu je zajištěno, že přímé sluneční záření dopadá především na nádrž, která je od Slunce nejdále. Zahřátím freonu v nádrži dochází k jeho vypařování a přechodu do druhé nádrže, která je chladnější. Kondenzací freonu ve druhé nádrži se postupně mění těžiště panelu a ten se tak samovolně natáčí. S každým novým nalezením rovnovážné polohy by mělo být dosaženo co nejmenšího úhlu dopadajícího záření. Zařízení je také vybaveno tlumiči, které zmírňují rázy způsobené větrem a naklápěním panelu.[2]

<sup>6</sup>Freony jsou uměle vytvořené látky s nízkým bodem varu. Jako plyny mají hustotu mírně vyšší než vzduch. V kapalném stavu je pak jejich hustota až 1,5 krát vyšší, než je hustota vody.[10]

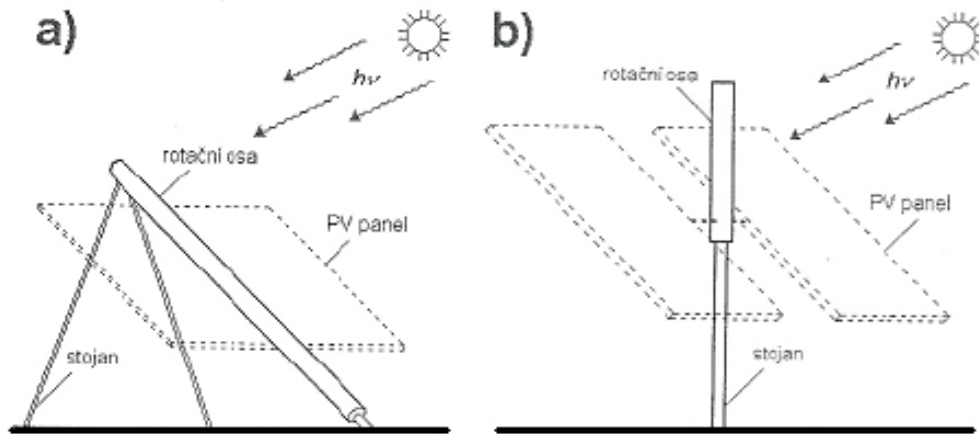
**Senzorika vyhodnocující intenzitu záření:** Některé aktivní sledovače mohou být vybaveny elektronickým řízením s různou úrovní složitosti. Tato elektronická zařízení ke zjištění polohy Slunce převážně využívají světlocitlivé komponenty, jako jsou fotovoltaické články, fotorezistory, fotodiody, fototranzistory, ale i integrované obvody. Všechny tyto součástky mohou generovat informaci o intenzitě světla, které na ně dopadá. Proto, jsou-li fotosenzory vhodně rozmístěny, je možné získat informaci o poloze Slunce prostým porovnáním míry jejich osvitů. Senzor, na němž je intenzita dopadajícího záření největší, je nejbližší Slunci. Pro natočení sledovače kolmo ke Slunci musí řídicí jednotka vydat pokyn pro otáčení celé konstrukce tak, aby naměřená intenzita osvitů na všech snímačích byla rovnoměrná. Zařízení s tímto druhem řízení jsou za ideálních podmínek schopna dosahovat velké přesnosti nastavení polohy. Jejich nevýhodu však představuje poměrně velká složitost řídicí elektroniky a z toho vyplývající vyšší cena.[2]

**Využití mapy slunečního pohybu:** Některá zařízení mají pohyblivou konstrukci uzpůsobenou takovým způsobem, že je jejich poloha pro každý okamžik celého dne předem definovaná. Je tak dosaženo toho, že v každé chvíli je panel orientován tam, kde zařízení předpokládá polohu Slunce. Tento typ zařízení zpravidla využívá sofistikovanou řídicí elektroniku, do níž je nutné naprogramovat řídicí algoritmus. Ten na základě vstupních podmínek dokáže vypočítat přesnou trajektorii pohybu Slunce pro každý den a všechna roční období. Jako vstupní údaje slouží především zeměpisná poloha celého zařízení, čas a datum.[2, 8]

Protože řídicí systém tohoto typu nereaguje na aktuální okolní podmínky, nemá na něj vliv počasí, ani intenzita slunečního záření. I za oblačného dne dokáže tudíž spolehlivě natáčet panel do správné polohy. Je také možné použít jeden řídicí obvod k synchronnímu ovládní pohybu několika sledovačů. Nevýhodou systémů tohoto typu jsou omezené reakce na okolní podmínky (panel je nastavován, i pokud Slunce zrovna nesvítí) a složitá konstrukce. Pro nastavování polohy proto bývají využívány krokové motory a servomotory, aby bylo možné zprostředkovávat zpětnou vazbu o přesné orientaci panelu.[8]

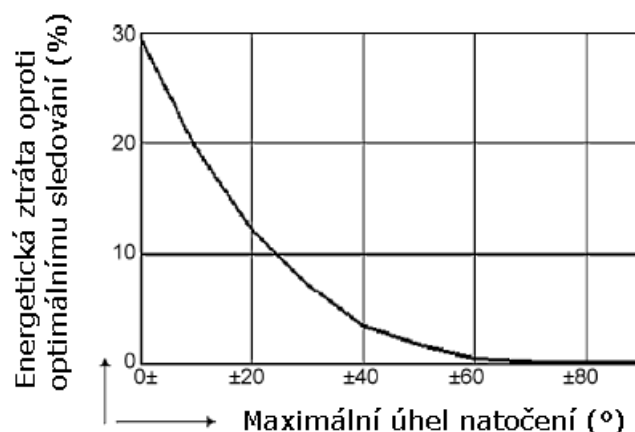
### 3.4.2. Jednoosé solární sledovače

Jako alternativa k pevně ukotveným solárním zařízením existují systémy nastavitelné v jedné ose. Ty sledují pohyb Slunce z východu na západ, přičemž sklon fotovoltaického panelu vůči zemi je u těchto zařízení nastaven pevně. Zajišťují tak v závislosti na aktuální poloze Slunce natáčení či naklápění panelu vhodným směrem. Prakticky se používají dvě varianty, které se od sebe liší orientací osy natáčení. První z nich využívá azimutální orientace. Tedy otočné vertikální osy, na níž je upevněn panel s definovaným sklonem. Druhá varianta je založena na naklápění panelu kolem nakloněné osy. Ta je orientována ve směru sever–jih se sklonem odpovídajícím zeměpisné šířce. Na porovnání (viz obr. 4/s18) obou mechanismů jsou patrné rozdíly těchto řešení. Dle zdroje [2] je provedení s azimutálním natáčením vhodnější zejména do míst s větší zeměpisnou šířkou, protože tam nedochází k velkým změnám výšky Slunce nad obzorem.



**Obrázek 4.:** Porovnání pohyblivého uchycení panelů. a) S polárním nastavením. b) S azimutálním nastavením.[2]

Maximální úhel natočení panelu (počítáme-li s jeho konstantním sklonem vůči zemi) by měl vzhledem k pohybu Slunce teoreticky pokrývat celých  $\pm 90^\circ$  při orientaci panelu na jih. Ten je označen azimutem  $0^\circ$ . S přihlédnutím k vlivu atmosféry na sluneční záření především v ranních a večerních hodinách viz 3.3.1, se dle zdroje [2] sledování Slunce v rozsahu větším nežli  $\pm 60^\circ$  na množství vyrobené energie příliš neprojeví (viz obr. 5/s19).



Obrázek 5.: Ztráta vyrobené energie v porovnání s optimálním natáčením panelu.[2]

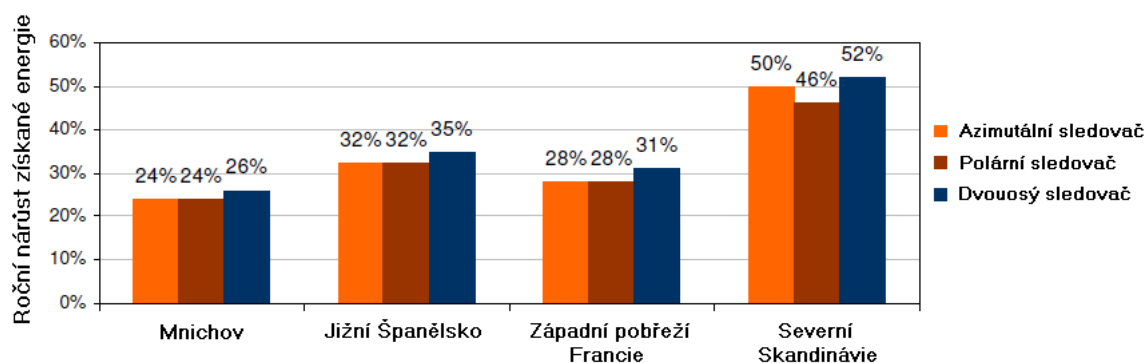
### 3.4.3. Dvouosé solární sledovače

Konstrukce dvouosých sledovačů umožňuje měnit polohu fotovoltaických panelů ve dvou stupních volnosti. Díky tomu je možné respektovat jak aktuální azimut, tak i výšku Slunce nad obzorem. Jejich konstrukce je však složitější, než u řešení zmíněného v kapitole 3.4.2 a celkové náklady na jejich realizaci jsou tudíž vyšší. Nastavování ve dvou osách totiž vyžaduje složitější mechaniku (motory, převodovky) a také řídicí elektroniku. Z dlouhodobého hlediska však nejsou náklady na použití sledovačů závislé jen na jejich pořizovací ceně. Záleží také na složitosti použité konstrukce, na její dlouhodobé údržbě a také na množství spotřebované energie, která je na změnu polohy panelů vynaložena.

V minulosti se fotovoltaickými systémy se sledovači Slunce zabývalo mnoho odborníků. Konkrétní představu o jejich přínosu lze získat například z výsledků prezentovaných ve zdroji [14]. Tato práce se zabývala především zpracováním dat ze systému PVGIS<sup>7</sup>, ze kterých bylo vyhodnoceno množství energie, jež může být na různých místech Evropy vyrobené pomocí pevně umístěných a proměnlivě naklápěných fotovoltaických panelů. Z výsledků byl zřejmý minimálně 24% přínos oproti pevně umístěným panelům v případě, že bylo použité zařízení pro sledování polohy Slunce. Zajímavé je také porovnání rozdílu v přínosu jednoosých a dvouosých sledovačů na množství vyrobené energie (viz obr. 6/s20). Vyplývá z něj, že dvouosý sledovač již nepřináší znatelné

<sup>7</sup>Photovoltaic Geographical Information System - poskytuje mapy slunečního záření dopadajícího na horizontální či nakloněnou plochu na povrchu Země.

navýšení množství vyrobené energie a je tedy dobré promyslet jeho využití s ohledem na náklady na údržbu a provoz.[14]



Obrázek 6.: Odhadovaný zisk při využití sledovačů Slunce.[14]

### 3.5. Akumulátory

Není-li vyrobená energie dopadajícího zařízení určena k přímé spotřebě, je potřeba zvolit vhodné řešení pro její skladování tak, aby mohla být později v případě potřeby využita. Existuje celá řada možností, jakými lze energii uchovávat. U některých větších fotovoltaických systémů je možné využít pro skladování přebytků elektrické energie principu přečerpávacích elektráren. Lze ale také využít nespotřebovanou energii a pomocí elektrolýzy vody vyrábět vodík, který lze následně velmi dobře skladovat v tlakových lahvích. Malé autonomní systémy ale pro ukládání přebytků energie využívají převážně chemické akumulátory. Jejich nejpoužívanější druhy budou uvedeny v následujícím textu.

#### 3.5.1. Olověné baterie

Tento druh akumulátorů je velmi dobře známý a v praxi velmi často používaný. Často se s tímto typem akumulátoru setkáváme například v automobilech a záložních zdrojích. Pro různé účely použití existují optimalizované druhy olověných akumulátorů. V automobilech jsou použity startovací akumulátory optimalizované pro vysoké krátkodobé odběry proudu, které však nejsou konstruovány na dlouhodobé vybíjení. Z tohoto důvodu se příliš nehodí pro cyklický provoz specifický pro fotovoltaické sys-

témy. Existují však také akumulátory konstruované pro dlouhodobé cyklické zatěžování, které lépe odolávají hlubšímu vybití. Označují se zpravidla jako trakční, či deep cycle akumulátory a jsou často využívány například v lodích, karavanech a vysokozdvihných vozících. Někteří výrobci, viz zdroj [15], také konstruují olověné baterie přímo určené pro fotovoltaické systémy.

Olověné akumulátory se mohou vyskytovat v několika různých variantách, které se od sebe liší vnitřní konstrukcí jejich článků. Mohou tak využívat jak klasické zaplavené elektrody, tak i technologii AGM<sup>8</sup>, ale také elektrolyt ve formě gelu. Poslední dvě varianty vynikají nižším samovybitím, bezúdržbovostí a schopností dodávat vyšší proudy.

Pro malé fotovoltaické systémy jsou vhodné uzavřené akumulátory se šesti či dvanácti články a napětím 12 V a 24 V. Pro větší systémy je pak výhodné složit baterii ze samostatných článků s napětím 2 V. Je tudíž možné sestavit baterii s parametry zvolenými přesně pro konkrétní použití s tím, že jednotlivé články je možné samostatně kontrolovat a servisovat. V případě poruchy některého z článků jej tak lze bez větších problémů vyměnit za jiný.

Bez ohledu na to, o jaký typ olověné baterie se jedná, platí, že hlavní podíl na snížení její životnosti má cyklické hluboké vybíjení. Je proto dobré vybírat baterii s dostatečnou kapacitou tak, aby při plánovaném způsobu využití neklesala úroveň jejího nabití dlouhodobě pod 80 %. I u olověné baterie optimalizované pro cyklické zatěžování dochází při dlouhodobém vybíjení na 20 % kapacity k více než pětinasobnému poklesu počtu nabíjecích cyklů v porovnání s vybíjením pouze na 80 %.[15]

Použití tohoto typu akumulátorů je výhodné s ohledem na jejich příznivou cenu, prověřené vlastnosti a dobře zvládnuté technologie výroby a nabíjení. Na druhou stranu mají tyto akumulátory také několik nevýhod. Především mají vysokou hmotnost a velké zástavbové nároky, protože se jejich energetická hustota pohybuje na úrovni 35 Wh/kg. Jako každé akumulátory také představují nebezpečí pro životní prostředí, především díky použití olověných elektrod a kyseliny sírové coby elektrolytu.[2, 3, 15]

---

<sup>8</sup>Zkratka Absorbed Glass Mat označuje akumulátory, jejichž elektrolyt je nasáklý, a tudíž vázaný v porézním materiálu mezi elektrodami.

### 3.5.2. Baterie s alkalickým elektrolytem

Mezi alkalické akumulátory patří především nikl–metalhydridové (Ni–MH), nikl–kadmiové (Ni–Cd) a nikl–zinkové (Ni–Zn) akumulátory. V praxi se tyto druhy akumulátorů příliš nepoužívají, přestože disponují některými příznivými vlastnostmi. Především dobře snášejí dlouhodobé vybití a při vybíjení na úroveň 60–80 % kapacity vynikají i delší životností oproti olověným akumulátorům. Jejich nevýhodou je především vyšší samovybíjení a takzvaný paměťový efekt. Vlivem dlouhodobého neúplného vybíjení totiž akumulátor postupně ztrácí část svojí kapacity. Pro sestavení alkalického akumulátoru s požadovaným napětím je také nutné použít větší množství do série zapojených článků. Napětí každého z nich je totiž jen 1,2 V.

### 3.5.3. Lithiové akumulátory

Rozmach lithium–iontových baterií zasáhl i odvětví záložních zdrojů. Tento druh akumulátorů vyniká především svou energetickou hustotou, nízkým samovybíjením a absencí paměťového efektu. Díky vyšší energetické hustotě (až 200 Wh/kg) mají při stejném objemu energie jen asi pětinovou hmotnost oproti olověným akumulátorům. Lithiové baterie však obecně špatně snášejí přebíjení i hluboké vybití. Je proto nutné používat vhodné elektronické obvody, které zajistí šetrné zacházení.[3, 16]

Velmi oblíbené se v poslední době díky své ceně, energetické hustotě až 110 Wh/kg a stabilním vlastnostem stávají lithium–železo–fosfátové akumulátory s elektrodami typu  $\text{LiFePO}_4$ . Přestože je jejich energetická hustota a napětí článku nižší než u jiných typů lithiových akumulátorů, jsou zajímavé svými výhodnými vlastnostmi. Především jsou náklady na jejich výrobu nižší a mají teplotně stabilnější parametry. Nejsou také tolik náchylné na samovybíjení a disponují větším počtem nabíjecích cyklů. Akumulátory tohoto typu se také chovají velice příznivě v mezních situacích. Vykazují totiž mnohem stabilnější vlastnosti jak při zkratu, přebíjení, tak i při mechanickém poškození.[20]



## 4. Návrh mechanické části chytrého zdroje

Jedním z prvních kroků při přemýšlení o budoucí podobě zařízení bylo stanovení několika dílčích požadavků, které by mělo splňovat. Především se jednalo o jeho velikost, druh materiálu použitého na realizaci konstrukce, způsob, jakým bude zajištěna změna polohy panelu a kde a jak budou uchyceny jednotlivé komponenty.

Nároky na robustnost konstrukce zařízení a jeho velikost jsou především závislé na rozměrech použitého fotovoltaického panelu. Chytrý zdroj pro výrobu energie využívá monokrystalického fotovoltaického panelu s výkonem  $40 \text{ Wp}^1$ , který je usazen v rámu o rozměrech  $56 \times 54 \text{ cm}$ . Podle velikosti panelu byla navržena konstrukce tak, aby poskytovala dostatečnou pevnost, stabilitu, volnost pohybu, a pomohla tak zajistit maximální množství světelného záření, jež dopadá na plochu solárního panelu. Protože bude zařízení umístěno ve venkovním prostředí, je nutné počítat s mnoha možnými neblahými vlivy, které mohou působit na jeho provoz. Konstrukce zařízení pak musí být na tyto vlivy dimenzována. Bylo proto třeba použít při realizaci taková řešení a materiály, které by měly zaručit odolnost a dlouhou životnost sestaveného zařízení. Přeci jen ale bude při hledání vhodného prostoru pro umístění zařízení dobré situovat jej na takové místo, aby bylo před nepřízní počasí a povětrnostními vlivy alespoň částečně chráněno.

Zařízení fyzicky sestává ze dvou hlavních modulů, z nichž každý zajišťuje část z pohybu panelu. Na horní otočné části je upevněn fotovoltaický panel s řídicí elektronikou a mechanismem naklápění, podstava pak zajišťuje stabilní pozici panelu a je na ní uchycen celý mechanismus azimutálního otáčení. Vzájemné spojení obou částí je zajištěno prostřednictvím hřídele, která vystupuje z podstavy a na níž je horní mo-

---

<sup>1</sup>Watt-peak je jednotka udávající nominální výkon fotovoltaického systému. Vychází z laboratorního měření parametrů při předem definovaných podmínkách (teplota  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , intenzita osvětlení  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ).[3]

dul s panelem usazený. S ohledem na usnadnění transportu lze obě dvě části povolením upevňovacích šroubů vzájemně oddělit. Předtím je však nutné rozpojit kabelový svazek, který horní část a podstavu také spojuje. Podrobněji jsou jednotlivé části popsány v následujících podkapitolách. Vzhled zařízení, jeho konstrukce a jednotlivé mechanismy jsou patrné na obrázku 7/s24.



**Obrázek 7.:** Reálná konstrukce chytrého zdroje energie.

#### 4.1. Podstava a mechanismus azimutálního otáčení

Základna čtvercového půdorysu o straně délky 65 cm je vyrobena ze železných profilů s průřezem  $40 \times 40$  mm. Tento materiál a jeho rozměry byly vybrány jako výhodné s ohledem na dostatečnou pevnost, při současném zachování přijatelné hmotnosti a možnosti poměrně snadno zařízení transportovat. Celá konstrukce je opatřena dvěma vrstvami nátěru tak, aby se zvýšila její odolnost vůči vlivům okolního prostředí.

V každém rohu je podstava opatřena závity s nastavitelnými nožkami, jimiž je možné celé zařízení částečně vyrovnat do optimální polohy. V případě potřeby lze samozřejmě nožky nahradit delšími, a získat tak větší nastavovací rozsah. Ze středu jedné ze stran základny je vyvedeno rameno, na jehož konci se nachází uložení otočné hřídele pro připevnění druhé části zařízení s panelem a elektronikou. Tuto stranu základny lze považovat za čelní stranu zařízení. Osa otáčení hřídele je kolmá k zemi a její pohyb je vymezen pomocí ložiska a silonového elementu. Ve spodní části tohoto uložení je připevněna sestava motoru s převodovkami, která zajišťuje pohon otáčení fotovoltaického panelu z východu na západ. Motor je v sestavě uchycen tak, že osa otáčení jeho výstupní hřídele je rovnoběžná se zemí. Součástí pouzdra motoru je i šneková převodovka, která zajišťuje samosvornost otáčecího mechanismu. Protože jsou výstupní otáčky hřídele pro konečné využití stále příliš vysoké, je do sestavy zařazena ještě planetová převodovka, která převodový poměr dále snižuje. Posledním článkem tohoto mechanismu je úhlová převodovka, skrze niž je osa otáčení výstupní hřídele otočena o  $90^\circ$  směrem vzhůru. Kompletní sestava motoru s převodovkami je sestavena dohromady prostřednictvím plastových pouzder. Ta jsou vzájemně stažena do jednoho celku pomocí čtyř závitových tyčí. Obdobným způsobem je pak celá sestava přichycena k uložení vertikální hřídele.

Takto sestavený mechanismus umožňuje pohodlné natáčení výstupní hřídele bez omezení rozsahu pohybu. Je-li ale na výstupní hřídeli připevněn modul s fotovoltaickým panelem, byl by neomezený rozsah otáčení nevhodný. A to hned ze dvou důvodů. Z praktického hlediska (viz kapitola 3.4.2) není totiž rozsah otáčení větší než  $160^\circ$ – $180^\circ$  pro správnou funkci zařízení nutný. Limitujícím faktorem pro rozsah otáčení je také především kabelový svazek, který propojuje řídicí elektroniku zařízení s baterií, webovým rozhraním a motorem pro otáčení dle vertikální osy. Z těchto důvodů je pracovní rozsah otáčecího mechanismu limitován pomocí koncových snímačů polohy, jejichž funkce je blíže popsána v kapitole 5.2.9. Vyžadují-li to okolní podmínky, je možné rozsah otáčení panelu upravit vhodnou změnou dorazu koncových snímačů.

Konstrukce podstavy s pouze jedním ramenem pro uchycení mechanismu otáčení usnadňuje pohyb kabelového svazku. Díky tomuto řešení se tudíž svazek tolik nezachytává o konstrukci zařízení a snižuje se riziko jeho poškození.

## 4.2. Horizontální naklápění panelu

Modul zajišťující změnu sklonu panelu vůči zemi je usazen na hřídeli, která vystupuje z podstavy. K jeho zajištění na hřídeli jsou určeny tři šrouby v objímce v jeho spodní části. Celý modul je složen z několika podstatných částí. Hlavní nosnou částí je vertikální trubka o průměru 30 mm nasazená přes rozšířenou objímku na výstupní hřídel podstavy. Hřídel je na druhém konci doplněna o uchycení pro otočný čep, který slouží pro upevnění držáku panelu.

Držák panelu je vyroben svařením z několika kusů železného pásu různých délek o rozměrech  $40 \times 3$  mm, který spojuje dvě protilehlé strany rámu panelu. Panel je uchycen na držák čtveřicí šroubů s využitím montážních otvorů, jen jsou v rámu panelu už při dodání od výrobce. Na horní straně držáku je na jednom z těchto šroubů připevněn senzor, který slouží k určování polohy Slunce. Ve středu držáku se nachází uložení čepu, podél jehož osy otáčení se celý držák naklápí, a mění tak sklon fotovoltaického panelu vůči zemi. Nosná vertikální trubka je s držákem spojena pomocí šroubu, který prochází uchycením na konci trubky a tvoří osu otáčení čepu držáku.

Aby bylo možné průběžně měnit sklon držáku panelu, bylo třeba vybrat vhodný prvek, který tuto úlohu dokáže plnit. Funkci mechanismu naklápění totiž značně ovlivňují okolní vlivy prostředí, jako např. poryvy větru, nánosy sněhu a déšť. Z tohoto důvodu byl pro pohon naklápění vybrán stejnosměrný motor se šnekovou převodovkou, který disponuje dostatečným výkonem pro manipulaci s panelem. Výhodnou vlastností, kterou šneková převodovka vyniká především, je její samosvornost. Jednou nastavená poloha jejího převodu tudíž zůstane až do dalšího nastavení stabilní.

Ze šnekové převodovky vychází závitová tyč, která je dvojicí šroubů spojena s lomeným táhlem. Konec táhla je pak dále připevněn na držák panelu. Je-li motor ovládán, dochází k podélnému vysouvání či zasouvání závitové tyče z převodovky. Tento pohyb je pak pomocí táhla přenášen na držák, který se otáčí v čepu, a mění tak svůj sklon vůči zemi. Upevnění táhla na držáku panelu je provedeno pohyblivě. Protože má závitová tyč pouze omezený rozsah pohybu, bylo nutné navrhnout způsob, jakým řídicí elektronika rozpozná dosažení krajních poloh nastavení. K tomu slouží, podobně jako u nastavení azimutu, dvojice koncových snímačů.

Držák motoru naklápění je uchycen ve vhodné výšce na nosné trubce pomocí objímky stažené čtyřmi šrouby. V případě potřeby lze po povolení šroubů objímkou pohybovat po nosné trubce nahoru a dolů a polohu motoru upravovat. Aby však nedocházelo při pohybu panelu k vzájemnému pnutí mezi motorem s převodovkou a uchycením táhla v držáku panelu, je i upevnění motoru provedeno pohyblivě.

### 4.3. Umístění a připojení řídicí elektroniky

Řídicí elektronika je důležitou součástí zařízení, jež plní různé druhy úkolů. Umožňuje provádět vyhodnocování polohy Slunce, nastavování orientace panelu, měření energetické bilance a také odesílání naměřených dat. Protože je zařízení koncipováno jako autonomní celek, který může být samostatně umístěn téměř kdekoliv, je nutné veškerou elektroniku umístit v jeho bezprostřední blízkosti. Zároveň je nutné uvědomit si, že se bude zařízení při sledování Slunce pohybovat, a je tedy třeba zajistit, aby se minimalizovalo množství propojovacích vodičů, které by tímto mohly být poškozeny. Z tohoto důvodu je řídicí elektronika umístěna na horní části zařízení společně s fotovoltaickým panelem tak, aby spolu tvořili jeden celek. Jelikož bude zařízení umístěno venku, je také nutné zajistit řídicí elektronice odpovídající krytí. Kvůli tomu je veškerá elektronika, vyjma několika snímačů, umístěna v instalačních krabičkách, odolných vůči ultrafialovému záření, vyhovujících stupni krytí IP56<sup>2</sup>.

Upevnění řídicí elektroniky je zajištěno pomocí železných profilů, jež jsou uchyceny na otočný držák motoru pro naklápění panelu. Na tyto profily je následně připevněna dosedací plocha pro upevnění dvojice instalačních krabic. Ve větší z nich je uložena kompletní řídicí elektronika, v menší pak napájecí zdroj. Aby bylo zajištěno pevné uchycení instalačních krabic, obě jsou umístěny nad sebou a pevně staženy přes ocelové pásy k dosedací ploše pomocí závitových tyčí. Pro snadnější montáž a demontáž jsou závitové tyče opatřeny křídlovými matkami.

Veškerou elektroniku je potřeba propojit s jednotlivými součástmi zařízení, které se nacházejí mimo instalační krabice. Bylo z nich tudíž nutné vyvést propojovací vodiče. Do stěny krabiček s elektronikou byly proto vyvrtány otvory, do nichž jsou upevněny

<sup>2</sup>Stupeň krytí udává míru odolnosti vůči prachu a vodě. Při IP65 je zařízení chráněno před prachem a intenzivně tryskající vodou. V provedení IP55 pak před prachem a tryskající vodou.

kabelové průchodky. Ty zajišťují možnost prostupu vodičů stěnou při zachování určitého stupně krytí. Je proto nutné počítat s poklesem výrobcem udávaného stupně krytí minimálně o jednu úroveň na IP55. Přesto bude pro dané použití tento stupeň krytí stále vyhovovat. Na druhém konci kabelový svazek zajišťuje propojení se všemi koncovými snímači, oběma motory, snímačem okolního světla, baterií, napájecím zdrojem, fotovoltaickým panelem a komunikačním rozhraním. Všechny tyto prvky jsou na kabelový svazek připojeny pomocí konektorů, takže je lze v případě potřeby (především při transportu) snadno odpojit. Pro zabránění průniku vlhkosti jsou konektory k senzům utěsněny. Pro usnadnění připojování jsou v rámci celého zařízení využity rozdílné druhy konektorů. Není tudíž možné provést zapojení nesprávně.

#### 4.4. Připojení akumulátoru

Pro uchování energie a napájení zařízení je využit olověný automobilový akumulátor s kapacitou 44 Ah. Tato kapacita postačuje pro testování zařízení, pro dlouhodobý provoz by bylo dobré baterii nahradit za některou z vhodnějších variant olověných akumulátorů (viz kapitola 3.5.1). Je-li sluneční svit dostatečný, může být činnost celého zařízení zajištěna z fotovoltaického panelu. V takovém případě jsou pak přebytky energie ukládány do akumulátoru. Není-li sluneční svit dostatečný, nebo jsou-li nároky na odebírané množství energie vyšší, než jaké dokáže panel uspokojit, je z akumulátoru energie čerpána.

Akumulátor je připojen pomocí napájecích vodičů opatřených na straně zařízení speciálním konektorem a na straně baterie mosaznými svorkami. Na vodiči z kladného pólu akumulátoru je, kvůli ochraně před zkratem, připevněno pouzdro pro nožovou pojistku, jejíž velikost je možné volitelně měnit.

## 5. Návrh řídicí elektroniky chytrého zdroje a řídicí elektroniky stacionárního panelu

Řídicí elektronika je velmi důležitou součástí zařízení, jež zajišťuje veškerou jeho činnost. Je sestavena z celé řady elektrických komponent, mezi které je možné řadit jak diskrétní součástky, tak i integrované obvody. Mezi hlavní činnosti, které jsou řídicí elektronikou vykonávány, patří především: měření fyzikálních veličin, vyhodnocování údajů ze senzorů, ovládání motorů pohybujících panelem, komunikace s okolím a kontrolování stavu systému.

Aby mohlo zařízení fungovat dle požadavků, které jsou od něho očekávány, bylo nutné vybrat vhodné elektronické komponenty a propojit je do jednoho funkčního celku. Jelikož je zařízení chápáno jako model, který demonstruje funkcionalitu a chování chytrého zdroje, jsou veškeré elektronické komponenty sestaveny na univerzálním plošném spoji. Pro praktické použití zařízení s vyšším výkonem bude třeba navrhnout plošný spoj s patřičně dimenzovanými komponenty, které budou vyhovovat požadovaným výkonovým parametrům. Z důvodu velkého množství součástek je řídicí elektronika sestavena na dvou plošných spojích, jež jsou umístěny v instalační krabici. Oba plošné spoje jsou upevněny nad sebou na distančních sloupcích, přičemž jejich vzájemné propojení na patřičných místech zajišťují pinové lišty. Na spodním plošném spoji jsou umístěny tyto komponenty: regulátor napětí, mikrokontrolér, multiplexer, teplotní senzor, senzor pro měření napětí a proudu a hodiny reálného času. Horní plošný spoj je pak obsazen h-můstkem, komunikačním obvodem MAX232 a senzory pro měření napětí a proudu. Všechny integrované obvody a senzory jsou usazeny v patičkách či pinových lištách. Součástky tudíž mohou být snadno vyměněny, vyskytne-li se s některou z nich problém. Důležité komponenty obvodu, včetně popisu jejich funkce a popisu obslužného kódu,

budou uvedeny v následujících částech práce. Schémata zapojení kompletní elektroniky jsou přiložena jako součást přílohy (viz A.7). K řídicí elektronice je také nutné přivést množství propojovacích vodičů kabelového svazku z jednotlivých komponent mimo instalační krabici. Oba plošné spoje jsou proto opatřeny šroubovacími svorkovnicemi, do nichž jsou všechny vodiče připojené. Rozmístění důležitých komponent elektroniky chytrého zdroje na deskách plošných spojů a popis všech svorkovnic je zakreslen na obrázcích 22/sV a 23/sVI.

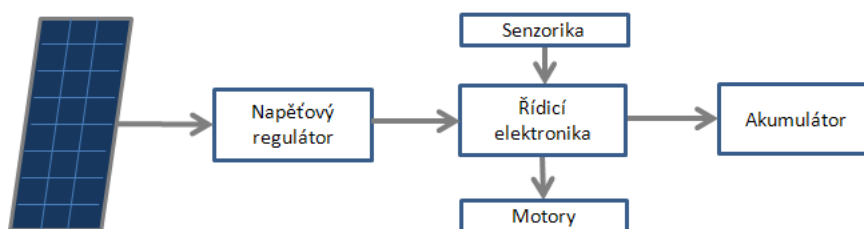
Bylo také třeba rozhodnout, jakým způsobem bude zapojena řídicí elektronika do sestavy společně s fotovoltaickým panelem, napájecím zdrojem a akumulátorem. Z blokového schématu jednotlivých komponent (viz obr. 8/s31) je způsob jejich zapojení patrný. Fotovoltaický panel je připojený k napájecímu zdroji a následně jsou zapojeny elektrické komponenty s řídicí elektronikou a akumulátorem. Aby mohla řídicí jednotka měřit množství energie dodané do baterie a množství spotřebované energie, je nutné, aby byla připojena přímo před akumulátorem. Veškeré toky energie z a do akumulátoru, které elektronika vyhodnocuje, tak procházejí vždy skrze ní.

Kromě řídicí jednotky fotovoltaického zdroje s naklápěním bylo v rámci této práce třeba sestavit ještě dvě další elektronická zařízení. První z nich slouží k porovnání přínosu v množství vyrobené energie navrženým chytrým zdrojem oproti běžným fotovoltaickým zdrojům s panelem s pevně definovanou polohou. Jedná se proto o sestavu fotovoltaického panelu a elektroniky, která měří množství energie dodané do akumulátoru. Více informací o tomto zařízení bude uvedeno v kapitole 5.4. Druhým elektronickým zařízením je pak webový server, který je schopný zobrazovat data odesílaná z chytrého zdroje ve formě jednoduché webové stránky. Bližší informace o webovém rozhraní jsou uvedeny v kapitole 5.5. Vzájemné propojení chytrého zdroje a webového rozhraní je znázorněno na obrázku v příloze (viz 21/sIII), přičemž propojení sériové linky s počítačem je volitelné a slouží pouze pro kontrolu činnosti zařízení.

## 5.1. Platforma Arduino a použité mikrokontroléry

Otevřená elektronická platforma Arduino se stala velice oblíbenou a rozšířila se mezi značnou spoustu lidí všech možných profesí a zájmů. Jejím hlavním přínosem je právě obrovská komunita lidí, která se kolem ní vytvořila a dala vzniknout pro-





**Obrázek 8.:** Blokové schéma zařízení.

středí plnému informací, jež umožňuje běžným lidem poměrně rychle proniknout do oblastí elektroniky, hardwaru a programování. Využívá jednoduchého snadno použitelného hardwaru a poskytuje také prostředí pro vývoj s celou řadou hotových projektů a užitečných knihoven.

Existují různé varianty základních Arduino desek, které se od sebe liší především typem použitého mikrokontroléru od společnosti Atmel. Každá deska je osazena množstvím komponent tak, aby mohl být mikrokontrolér snadno programován a po připojení napájení ihned používán. Desky jsou například vybaveny programátorem, regulátorem napětí, taktovacím oscilátorem a propojovacími lištami. V propojovacích lištách jsou vyvedeny analogové a digitální vstupně–výstupní piny, jejichž počet je závislý na typu použitého obvodu. Výhodou této platformy je také to, že existuje velké množství rozšiřujících modulů, které lze „vrstvit“ na základní desku a snadno tak rozšiřovat její funkcionalitu.

Při návrhu chytrého zdroje bylo zprvu využito několika hotových vývojových kitů z řady Arduino, z nichž je ve výsledné realizaci použit pouze jeden, který zajišťuje chod webového serveru. V počátcích vývoje této práce sloužily tyto kity spolu s dalšími komponenty sestavenými na nepájivém kontaktním poli pro ověření vhodnosti navrženého obvodového řešení. S ohledem na specifičnost sestavené řídicí elektroniky však nebylo vhodné, aby byl při její realizaci použit celý hotový Arduino modul. Jak už bylo zmíněno výše, kompletní řídicí elektronika je sestavena na univerzálním plošném spoji.

### 5.1.1. Použité mikrokontroléry

Elektronika chytrého zdroje používá stejný mikrokontrolér, jako elektronika stacionárně umístěného panelu. Jedná se o obvod *ATmega328P*, který jinak také využívá například vývojový kit Arduino UNO. Mikrokontrolér *ATmega328P* byl vybrán pře-

	ATmega 328P	ATmega 2560
Počet vstupně–výstupních pinů	14	54
Počet analogových pinů	6	16
Velikost paměti programu	32 kB	256 kB
Velikost paměti RAM	2 kB	8 kB
Velikost paměti EEPROM	1 kB	4 kB

**Tabulka 1.:** Porovnání rozdílných parametrů použitých mikrokontrolérů.

devším díky tomu, že je dodáván i v pouzdře, které umožňuje jeho snadné použití na nepájivém poli. Díky tomu je poměrně snadné obvod používat právě jak při ladění na nepájivém poli, tak i při tvorbě finálního zapojení. Také velikosti operační paměti a paměti programu tohoto obvodu jsou pro dané použití plně dostačující.

Pro vykonávání programu postačuje obvodu pouze připojení taktovacího krystalu a přivedení napájení. Na jeho piny jsou pak připojeny okolní periferie, které zprostředkovávají tok informací z okolí. Přesné zapojení mikrokontroléru včetně veškerých jeho okolních součástek a připojených periferií je patrné ze schémat v příloze A.7. Některé komponenty a části obvodu budou blíže popsány v následujících kapitolách.

Na rozdíl od elektroniky vyhodnocující činnost panelů, není pro realizaci webového rozhraní nutné sestavovat žádnou speciální desku. Proto bylo využito kitu Arduino Mega s mikrokontrolérem *ATmega2560* spolu s rozšiřujícím modulem, který doplnil kit o rozhraní ethernet. Tento kit byl zvolen kvůli vyšší kapacitě jak operační, tak především i programové paměti mikrokontroléru, která je nutná pro běh objemného kódu webového serveru. Rozdílné parametry obou použitých obvodů jsou uvedeny v tabulce 1/s32.

### 5.1.2. Vývojové prostředí

K programování mikrokontrolérů na vývojových deskách Arduino je využito frameworku Wiring. Jedná se o multiplatformní nadstavbu, která v současné době podporuje velké množství mikrokontrolérů s různými architekturami od celé řady výrobců. Velkým přínosem, který přináší programování v tomto frameworku, je především mož-

nost volně přenášet zdrojové kódy napříč platformami s nutností pouze minimálních úprav. Není tak nutné vázat se při práci na projektu na konkrétní platformu a zdrojové kódy mohou být ve srozumitelné formě poskytnuty dalším vývojářům. Standardní programovací prostředí umožňuje osvojit si snadno a rychle základy programování pro Arduino, má však několik podstatných nedostatků, které znesnadňují práci na větších projektech. Uživateli zvyklému například na programování v jazyce C, může standardní vývojové prostředí připadat příliš strohé a nepřívětivé. Hlavním důvodem je především absence některých funkcí, na něž mohou být uživatelé zvyklí z jiných prostředí. Citelně například chybí podpora dokončování textu při psaní kódu, která doplňuje názvy proměnných, procedur a syntaxi kódu. Je tudíž nutné psát všechny názvy z paměti, případně je pracně vyhledávat v kódu. Dále standardní prostředí neumožňuje, pro přehlednost důležité, skrývání nepotřebných částí kódu, na kterých zrovna není potřeba pracovat.

Pro práci na větších programech, kde se nedostatky standardního programovacího prostředí značně projevují, našťastí existuje alternativa, elegantně řešící většinu těchto problémů. Lze proto více než doporučit použití vývojového prostředí *Atmel Studio* rozšířené o plugin *Visual micro*. Díky tomu je možné psát komplexní kód pro platformu Arduino přehledně a bez zbytečných komplikací.

## 5.2. Senzorika a periferie

Mimo mikrokontroléru musí být zařízení doplněno o množství dalších důležitých obvodů, které rozšiřují funkcionalitu řídicího obvodu. Především je nutné neustále vyhodnocovat množství signálů a naměřených dat, která jsou získávána prostřednictvím několika druhů senzorů a snímačů. Další obvody je pak nutné doplnit kvůli odesílání aktuálního stavu zařízení prostřednictvím sériové linky a také pro zajištění vlastního propojení mikrokontroléru se senzory a akčními členy.

### 5.2.1. Rozšíření analogových vstupů

Přestože mikrokontrolér disponuje množstvím vstupně–výstupních pinů, pouze šest z nich lze využít pro vzorkování analogových signálů pomocí analogově–digitálního převodníku. Protože však zařízení v současné konfiguraci ke své činnosti potřebuje vzorkovat analogových signálů dvanáct, je nutné jejich počet vhodně rozšířit. K tomu slouží

multiplexer MPC506AP, se šestnácti analogovými vstupy, jenž je zapojený podle schématu v příloze A.7.

Funkce tohoto obvodu je poměrně jednoduchá, slouží totiž jako adresovatelný přepínač. V závislosti na nastavené čtyřbitové adrese obvod připojí jeden ze vstupních signálů na výstup obvodu. Vždy, jakmile je provedena nová adresace, přepne multiplexer na svůj výstup odpovídající ze svých vstupních signálů. Ten je následně vzorkován mikrokontrolérem. Hlavní výhoda použití tohoto obvodu spočívá v tom, že s využitím pouze pěti pinů procesoru je možné získat přístup k šestnácti vstupně–výstupním signálům.

Multiplexer je využit k připojení analogových vstupů, kterých je v současné verzi zařízení využito celkově dvanáct. Na prvním vstupu multiplexeru je připojeno napájecí 5 V napětí. Druhý ze vstupů vede na napěťový dělič připojený na akumulátor zdroje. Řídící jednotka díky tomu získává informaci o napětí akumulátoru i v případě, že není k dispozici informace ze senzorů napětí a proudu. Následující dva vstupy obvodu pak zprostředkovávají oba signály od senzoru slunečního svitu. Čtyři další vstupy slouží k připojení koncových snímačů polohy azimutálního otáčení a naklápění panelu. Skrze poslední využitě vstupy je připojena čtveřice přepínačů. Ty mohou sloužit pro průběžnou změnu některých systémových proměnných za běhu programu. Použití některých přepínačů bude na vhodných místech práce vysvětleno.

Řídící program mikrokontroléru, který se zabývá obsluhou multiplexeru, musí zajistit především dvě činnosti. Postupnou adresaci a samotné vzorkování vstupních hodnot obvodu. K tomu slouží funkce *sampleAnalog* s parametrem *AD\_PINS\_USED*. Parametr předává funkci informaci o počtu obvody využívaných analogových vstupů. Při každém volání této funkce dochází k postupné adresaci daného počtu vstupů, jejichž vzorkované hodnoty jsou uloženy do pole. Ostatní funkce řídicího programu pak k tomuto poli hodnot přistupují a využívají je ke své činnosti. Návratovou hodnotou této funkce je hodnota signálu na prvním vstupu multiplexeru, která je využita pro zpětnou kontrolu jeho správné činnosti (viz kapitola 6.1).

## 5.2.2. Měření napětí a proudu

Důležitou schopností chytrého zdroje je vyhodnocování bilance toků energie mezi fotovoltaickým panelem, řídicí elektronikou a akumulátorem. Chytrý zdroj bylo tedy nutné vybavit vhodnými obvody, které budou požadovaná měření veličin provádět a předávat naměřené hodnoty k vyhodnocení mikrokontroléru. Při výběru vhodného senzoru musely být porovnány nejrůznější vlastnosti mnoha druhů obvodů. Především je třeba brát ohled na složitost zapojení měřicího obvodu, způsob jeho připojení k mikrokontroléru, uvažovaný rozsah měřených hodnot a přesnost jeho měření. Pro dané použití byl jako nejvhodnější vybrán obvod INA219, který je v rámci řídicí elektroniky chytrého zdroje použitý na třech místech.

Jedná se o integrovaný obvod s osmi vývody, který je schopný provádět měření napětí a proudu na vhodně umístěném předřadném rezistoru. Napájecí napětí obvodu se může pohybovat v rozsahu 3–5,5 V, což znamená, že je možné jej bez problémů používat v sestaveném obvodu řídicí elektroniky. Propojení mikrokontroléru a měřicího obvodu je zajištěno prostřednictvím sběrnice I<sup>2</sup>C<sup>1</sup>, na níž je teoreticky možné připojit až šestnáct těchto senzorů. Mikrokontrolér musí mít v programu uložené adresy připojených senzorů tak, aby je mohl oslovovat a vyčítat z nich naměřená data. Volba adresy každého z obvodů se provádí přivedením kombinace vhodných signálů na adresní vstupy A1 a A2 (viz [18]).

Aby mohl senzor INA219 měřit napětí a proud, je připojen svorkami  $V_{IN-}$  a  $V_{IN+}$  na výstupy předřadného rezistoru. Z velikosti úbytku napětí naměřeného na svorkách rezistoru je vypočítána velikost procházejícího proudu. Napětí dané větve obvodu je pak vyhodnocováno na svorce  $V_{IN-}$ . Rozsah měření napětí je u obvodu INA219 pevně stanovený na 0–26 V. Pro měření proudu je však možné rozsah za cenu změny citlivosti přizpůsobit konkrétnímu použití. Maximální úbytek napětí, který je obvod na měřicím rezistoru schopný vyhodnotit, je totiž roven 320 mV. Je proto nutné vždy zvolit takovou velikost měřicího rezistoru, aby nebyl ani při průchodu maximálního uvažovaného proudu výše zmíněný úbytek napětí překročen.[18]

<sup>1</sup>Jedná se o zkratku z anglického Internal–Integrated–Circuit. Jedná se o běžně používanou dvou vodičovou sběrnici s jedním taktovacím a jedním datovým signálem. Pro zajištění správné funkce sběrnice je nutné na oba její vodiče pomocí pull–up rezistorů přivést 5V napětí.

**Zapojení a použití měřicích obvodů:** Aby mohl chytrý zdroj vyhodnocovat množství dodané a spotřebované energie, musí být na vhodných uzlech obvodu prováděno měření napětí a procházejícího proudu. Jelikož je nutné měřit a vzájemně porovnávat vyrobenou a spotřebovanou energii, musí být v obvodu řídicí elektroniky využito minimálně dvou obvodů INA219. Pro každý z energetických toků jeden. Kvůli zpřesnění měření při nízkém proudovém odběru je však využito ještě dodatečného třetího obvodu.

Pro měření množství energie vyrobené fotovoltaickým panelem je využitý obvod INA219 s adresou 0x44. Jeho měřicí rezistor je zapojený tak, aby skrze něj protékal veškerý proud z napájecího zdroje, který mří do akumulátoru a řídicí elektroniky. Vzhledem k tomu, že výrobcem udávaná maximální hodnota výstupního proudu fotovoltaického panelu je v oblasti maximálního výkonu stanovena na hodnotu 2,43 A, lze použít měřicí rezistor o hodnotě 0,1  $\Omega$ . Maximální možná měřitelná velikost proudu z fotovoltaického panelu na tomto rezistoru je tudíž stanovena na 3,2 A.

Další obvod slouží pro měření celkového množství spotřebované energie. Měřicí rezistor senzoru s adresou 0x41 je připojen mezi propojení kladných pólů akumulátoru a fotovoltaického panelu a řídicí elektroniku. Tímto rezistorem prochází veškerý proud, který je potřebný pro chod řídicí elektroniky a jejích periferií. Stejně tak jsou skrze něj napájeny i svorkovnice pro připojení spotřebičů. Díky tomu je možné provedením jediného měření získat informaci o celkové velikosti aktuálně odebíraného proudu, z něhož je následně vypočítávána spotřeba energie. Díky měřicímu rezistoru o hodnotě 0,01  $\Omega$  je maximální měřicí rozsah teoreticky limitován proudem o velikosti 32 A. Proto je možné současně měřit spotřebu připojené zátěže a zároveň ovládací proudy pro oba motory nastavování panelu. Problém ale může nastat v okamžiku, kdy není k zařízení připojena žádná zátěž a nejsou v činnosti žádné součásti chytrého zdroje, které mají velký odběr proudu. Kvůli měřicímu rozsahu tohoto senzoru, který je optimalizován na měření velkých proudů, totiž může docházet k nesprávnému měření proudů malých. Z tohoto důvodu je řídicí elektronika doplněna ještě o třetí obvod, který slouží právě pro měření malých proudů.

Poslední z obvodů INA219 má adresu 0x40 a využívá měřicího rezistoru o hodnotě 1  $\Omega$ , pro měření proudu vstupujícího do 5V napěťového regulátoru. Jelikož jsou jeho prostřednictvím napájeny všechny hlavní elektronické komponenty, slouží především jako ukazatel množství spotřebované energie řídicí elektronikou. Tento kon-

krétní obvod se oproti ostatním použitým měřicím obvodům liší tím, že je umístěný na spodní desce plošného spoje. Důvodem je potřeba umístit jej blízko napěťového regulátoru.

**Uvedení senzorů do provozu:** Předtím, než mohou být senzory použity k měření, musí být provedena jejich inicializace a nastavení pomocí dvojice procedur. Teprve potom z nich lze vyčítat správná naměřená data. První procedura se nazývá *sensor\_setup()* a slouží pro nastavení konfiguračního registru obvodu. Jeho prostřednictvím je možné nastavit různé parametry činnosti obvodu, které je třeba zvolit v závislosti na konkrétním způsobu jeho použití. Především je nutné nastavit tyto parametry: maximální rozsah měřeného napětí, maximální úbytek napětí na měřicím rezistoru, rozlišení analogově-digitálních převodníků a režim činnosti obvodu.

Poté, co je provedeno zapsání hodnot do konfiguračního registru, je volána procedura *sensor\_clb()* v níž dochází k nastavení kalibračního registru obvodu. Hodnota zapisovaná do tohoto registru je závislá například na použitém měřicím rezistoru, jeho maximálním možném úbytku napětí a maximální velikosti měřeného proudu, který lze očekávat. Detaily nastavení obvodu INA219 včetně příkladu výpočtů hodnot jednotlivých registrů je možné najít v literatuře [18].

### 5.2.3. Měření teploty

Aby bylo možné sledovat teplotu uvnitř instalační krabice s řídicí elektronikou, bylo třeba zařízení vybavit vhodným teplotním senzorem. Protože senzory pro měření napětí a proudu již komunikují po sběrnici I<sup>2</sup>C, bylo vhodné vybrat právě takový snímač teploty, který bude možné na sběrnici jednoduše připojit. Pro umístění na plošném spoji řídicí elektroniky byl proto vybrán senzor NCT75, který dokáže měřit teplotu v rozsahu  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností až  $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aby bylo možné s obvodem komunikovat, je třeba zvolit adresu, s níž se bude hlásit na sběrnici. Nastavení probíhá připojením vhodných signálů na trojici adresních pinů obvodu, přičemž pro tento obvod byla nastavena adresa 0x48. Následně již může být senzor oslovován mikrokontrolérem s požadavky na vyčítání měřených hodnot. V pravidelných intervalech jsou naměřené údaje o teplotě vyčítány prostřednictvím volání procedury *CheckTemperature*. Vzhledem k tomu, že má údaj o teplotě pouze informativní charakter, není třeba provádět měření teploty

příliš často. Z tohoto důvodu je procedura *CheckTemperature* volána z hlavního kódu programu jednou za sekundu. Proto, aby byl údaj o teplotě mírně zatlumen, je za platnou hodnotu teploty považován vždy až průměr z posledních deseti provedených měření. Do té doby, než je první platná hodnota vypočtena, má mikrokontrolér nastavenou počáteční hodnotu na 99 °C.

#### 5.2.4. Hodiny reálného času

Jednou z nejdůležitějších komponent řídicí elektroniky chytrého zdroje je obvod zajišťující udržování informace o aktuálním čase. Pro tuto činnost byl tudíž vybrán prověřený a dostupný obvod DS1307. Přestože se jedná o jednoduchý jednoúčelový obvod, je jeho vliv na správný chod celého zařízení značný. Je to dáno především tím, že mnoho činností chytrého zdroje je vykonáváno pravidelně v závislosti na aktuálním čase. Pokud by tedy obvod reálného času nepracoval správně, všechny časově závislé činnosti by buď neprobíhaly vůbec, nebo by byly vykonávány v nesprávný čas.

Integrovaný obvod DS1307 disponuje mnoha funkcemi, díky kterým dokáže uchovávat informaci o aktuálním čase, datu a roce. Je v něm také uložena informace o počtu dní v jednotlivých měsících a o výskytu přestupného roku. Pro svou činnost potřebuje obvod pouze minimum externích součástí. Především je nutné doplnit jej o taktovací oscilátor s frekvencí 32768 kHz, který zajišťuje správný chod hodin a také záložní baterii. Přestože je během chodu primárního zařízení obvod napájen 5V napětím, dokáže pomocí interních mechanismů rozpoznat jeho výpadek a přepnout se na záložní baterii. Díky tomu si v takové chvíli dokáže obvod v paměti nadále udržet správný časový údaj. To znamená, že bude-li chytrý zdroj odpojen od fotovoltaického panelu i akumulátoru, hodiny reálného času si udrží správný časový údaj do té doby, dokud bude záložní baterie nabitá.

Komunikace mikrokontroléru s obvodem DS1307 je stejně jako u předešlých senzorů zajištěna pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C. Jelikož není důvod používat současně více těchto součástek na jedné sběrnici, není adresa volitelná, nýbrž ji má obvod pevně nastavenou na hodnotu 0x68. Aby byla zajištěna kontrola činnosti hodin reálného času, disponuje řídicí algoritmus funkcí, která dokáže kontrolovat, zda je obvod DS1307 správně nastavený a připojený na sběrnici (viz kapitola 6.1).



**Praktické využití časového údaje:** Po připojení řídicí elektroniky k napájení má mikrokontrolér nastavenou nesprávnou počáteční hodnotu času. Proto ihned údaj o aktuálním čase z obvodu DS1307 vyčítá a zapisuje si jej do proměnné. Aby měl mikrokontrolér uloženu vždy nejaktuálnější informaci o čase, jsou za běhu programu z obvodu údaje v pravidelných intervalech vyčítány. Pro řízení chodu programu jsou v paměti mikrokontroléru uloženy nejrůznější časové značky. Některé z nich jsou reprezentovány konstantami, některé pak pomocí proměnných. Každá časová značka definuje okamžik, v němž je nutné vykonat nějakou činnost. Jedná-li se o konstantní hodnotu, je příslušná činnost vykonávána jednou denně. Může se tedy jednat například o ovládání výstupních relé, nastavení fotovoltaického panelu do výchozí polohy a každodenní nulování naměřených hodnot. Pokud je časová značka definována proměnnou, může si ji řídicí program sám upravovat a tím sám rozhoduje, v jakém intervalu má být činnost prováděna. Pravidelně vyčítaná informace o aktuálním čase je porovnávána s uloženými časovými značkami. Pokud nastal čas, který je v některé časové značce uložen, provede řídicí algoritmus patřičné procedury a funkce, například kontrolu polohy Slunce. Po vykonání těchto činností pak pozmění původní časovou značku tak, aby se volání procedury za určitý čas opět opakovalo.

**Změna nastaveného času:** Změna uloženého času v obvodu DS1307 musí být provedena pomocí dvojitého přehrání řídicího programu mikrokontroléru. Nejprve je nutné pozměnit hodnoty pole proměnných s názvem *timestamp* a uložit do nich nový časový údaj. Popis, jaké časové údaje jsou uloženy na kterých pozicích pole, je uveden v kódu programu. Aby byly tyto hodnoty zapsány do hodin reálného času, musí být ještě proměnná *setClock* nastavena na hodnotu *true*. Po nahrání takto upraveného kódu do mikrokontroléru a jeho resetu dojde k zapsání nových časových údajů do hodin reálného času. Protože by ale tento program po každém resetu prováděl nastavení hodin znovu, musí být proměnná *setClock* nastavena zpět na hodnotu *false*. Takto upravený program musí být opět nahrán do řídicího obvodu a tím je proces nastavení času ukončen.

### 5.2.5. Komunikační rozhraní

Elektronika chytrého zdroje je uzpůsobena k tomu, aby poskytovala informace o své činnosti k dalšímu použití. Z tohoto důvodu je vybavena sériovým komunikačním

rozhraním RS323, které je použito pro komunikaci se zobrazovací jednotkou webového serveru. Mikrokontrolér komunikuje na sériové lince pomocí dvojice pinů, z nichž jeden slouží pro příjem a druhý pro odesílání dat. Nelze je však připojit na sběrnici přímo, protože obvod pracuje s napěťovými úrovněmi 0–5 V. Propojení na sběrnici je proto zajištěno prostřednictvím integrovaného obvodu MAX232, který provádí konverzi napěťových hodnot výstupních signálů mikrokontroléru na úroveň kompatibilní se sběrnici RS232. Datové propojení řídicí jednotky chytrého zdroje s webovým rozhraním je zajištěno pomocí propojovacího kabelu, který je zakončený konektory CANNON 9.

### 5.2.6. Připojení spotřebičů a časové spínání zátěže

Již z principu činnosti je u chytrého zdroje předpokládáno připojení různých druhů spotřebičů, které budou odebírat energii z akumulátoru. Nejjednodušší možností je připojení spotřebičů přímo na svorky akumulátoru. Výhoda tohoto způsobu spočívá v tom, že lze takto připojit téměř libovolný spotřebič, který bude svým příkonem vyhovovat parametrům použitého akumulátoru. V takovém případě je ale nutné spotřebič doplnit o ochranu proti zkratu a případně vybití baterie. Tento způsob může ale být nevýhodný v tom ohledu, že žádná odebíraná energie neprochází skrze řídicí elektroniku, a tudíž se nepodílí na výpočtu energetické bilance.

Chytrý zdroj je ale také připraven na připojení spotřebičů takovým způsobem, aby byl jejich odběr do energetické bilance zahrnut. Deska plošného spoje je proto přímo opatřena několika svorkovnicemi, které umožňují připojení zátěže. K těmto svorkovnicím je připojena linie napájení, která prochází přes měřicí rezistor jednoho z obvodů INA219. Existují dva způsoby, jak zátěž připojit.

**Výstupní relé:** První možností jak zátěž připojit představuje dvojice relé, která je umístěna na desce plošného spoje. Pomocí řídicího programu mikrokontroléru je možné tato relé spínat v závislosti na čase s tím, že čas aktivace a deaktivace může být pro každé relé odlišný. Lze tudíž přímo k chytrému zdroji připojit dva spotřebiče, u nichž lze programově nastavit, kdy má dojít k jejich zapnutí či vypnutí. V závislosti na tom, zda jsou využity rozpínací, či spínací kontakty relé, lze dosáhnout různých forem ovládní připojených spotřebičů.

Každé z použitých relé využívá pro připojení zátěže třívstupovou svorkovnici. Relé je zapojeno tak, že spíná záporný pól baterie. Na jednom z kontaktů svorkovnice je trvale připojeno napětí akumulátoru, na zbývajících dvou výstupech jsou pak vyvedeny spínací a rozpínací kontakty relé. Oba kontakty, na kterých je připojen záporný pól baterie, jsou jištěny vratnými pojistkami s vybavovací hodnotou 2,5 A. Tato hodnota plně postačuje pro připojení malých spotřebičů, které mohou být chytrým zdrojem napájeny.

Ovládání relé nelze samozřejmě provádět přímo mikrokontrolérem, je proto využito obvodu ULN2003A, který je jím spínán. Tento integrovaný obvod tvoří sedm párů spínacích tranzistorů v Darlingtonově zapojení, jen mohou spínat proudy až do velikosti 500 mA. Po aktivaci některého ze vstupů obvodu mikrokontrolérem je odpovídající výstup propojen se společnou zemí obvodu. Vždy jeden ovládací kontakt každého z relé je připojen na kladnou svorku akumulátoru, zatímco druhý je přes mechanickou propojku připojen na výstup obvodu ULN2003A. Propojka je do obvodu vložena proto, aby bylo možné jednoduše, bez nutnosti přeprogramování, deaktivovat ovládání některého z relé.

Ovládání výstupních relé zajišťuje procedura *relayCheck*, která je pravidelně volána v kódu programu. V každém jejím volání je provedeno porovnání aktuálního času systému s uloženými časovými údaji. Na jeho základě je provedeno vyhodnocení, zda není nutné sepnout či rozepnout některé relé. Tyto časové údaje mohou být nastaveny nezávisle pro každé relé vhodnou změnou hodnot dvojice polí proměnných *r1OnOffArray* a *r2OnOffArray*. To ale platí pouze za předpokladu, že je tato funkcionality povolena nastavením systémové proměnné *relaysEnabled*.

**Trvalý výstup napájení:** Je-li nutné připojit ke zdroji takový spotřebič, který musí být trvale napájen, existuje ještě další možnost jeho připojení. Tou je zapojení na svorkovnici s trvale přítomným napětím akumulátoru. Výstup této svorkovnice není chráněn proti zkratu samostatnou pojistkou, nýbrž spoléhá na pojistku, přes kterou je připojena celá řídicí elektronika k akumulátoru. Vybavovací hodnotu této pojistky je nutné dimenzovat v závislosti na připojené zátěži.

Zároveň je také možné pro trvalé připojení zátěže využít jištěných rozpínacích kontaktů některého z relé, na nichž je v klidovém stavu relé přítomné napětí akumulátoru. To ale platí pouze v případě, je-li funkcionality spínání relé v řídicím programu

deaktivována nastavením proměnné *relaysEnabled* na hodnotu *false*, případně jsou-li rozpojeny mechanické propojky ovládacích signálů relé na plošném spoji.

### 5.2.7. H–můstek

Řídící elektronika na základě informací ze sensorů dokáže upravovat orientaci fotovoltaického panelu. Toho je dosaženo pomocí dvojice stejnosměrných motorů, které jsou upevněny na konstrukci zařízení. Mikrokontrolér pochopitelně nemůže tyto motory přímo spínat, bylo tudíž nutné vybrat vhodné řešení pro jejich výkonové ovládání.

Vzhledem ke konstrukci a způsobu použití zařízení, je třeba oba motory ovládat tak, aby bylo možné měnit smysl jejich otáčení. Pomocí diskretních součástek by bylo třeba využít na každý motor nejméně dva výkonové tranzistory tak, aby jejich spínáním bylo dosaženo otáčení oběma směry. Existuje však také řešení, které umožňuje jednoduché ovládání stejnosměrných motorů. Jedná se o obvody zvané h–můstky. Každý můstek je složen ze čtveřice tranzistorů, jejichž vhodným spínáním je možné nejen spínat motor oběma směry, ale také ho aktivně brzdit nebo nechat volně se otáčet. Kvůli menší prostorové náročnosti bývají tyto obvody integrovány do jednoho pouzdra a často se používají především pro spínání menších zátěží. Pro větší zátěže je dobré můstek složit z diskretních součástek, především s ohledem na zlepšení chlazení a distribuce vyzařovaného tepla.

Vhodným způsobem pro ovládání použitých motorů je dvojitý integrovaný h–můstek L298N, díky kterému je možné pomocí mikrokontroléru oba motory ovládat. Obvod je navržen pro spínání zátěží s napětím až 50 V a maximálním špičkovým proudem 3 A. Vzhledem k proudovému odběru každého z motorů, který špičkově přesahuje 2 A je nutné zajistit dostatečné chlazení h–můstku. Obvod byl proto vybrán v pouzdře Multiwatt15, na něž lze jednoduše namontovat chladič. Ovládání h–můstku zajišťují čtyři ovládací vstupy, připojené na patřičné logické výstupy mikrokontroléru. Kombinace logických hodnot na každém z párů ovládacích vstupů můstku vyvolají nastavení výstupního napětí motoru na odpovídající úrovni. Pro spínání induktivních zátěží je, kvůli ochraně výstupních tranzistorů, nutné na výstupu opatřit obvod ochrannými diodami.[17]

Obvod je využíván pouze, je-li vyžadována nějaká úprava polohy fotovoltaického panelu. Protože má značný klidový odběr proudu, není příliš výhodné jej trvale napájet. Z toho důvodu je h-můstek ještě doplněn o spínací tranzistor, který zajišťuje sepnutí 5 V napájecího napětí můstku pouze v těch chvílích, kdy je jeho činnost potřeba. Proto také nejsou využity aktivační vstupy *enable*, na které je trvale přivedeno kladné napájecí napětí. Tento tranzistor je spínán jedním z výstupů obvodu ULN2003A, který je přímo ovládán mikrokontrolérem.

### 5.2.8. Senzor polohy slunce

Zjišťování polohy Slunce je pro správnou funkci zařízení klíčové, jen díky tomu je možné průběžně nastavovat panel do optimální polohy. Sestavený sluneční senzor pracuje na principu porovnávání intenzity dopadajícího záření na čtveřici snímacích fotorezistorů. Důležitou roli má také umístění fotorezistorů a jejich orientace na těle senzoru. Aby snímač plnil svou funkci, musí být totiž zajištěno, že na každý z rezistorů dopadá sluneční záření pouze z té části okolí, která k němu náleží. Jednotlivé rezistory jsou proto umístěny na přední straně senzoru do kříže tak, že jejich čelní strany směřují vždy mírně od osy kolmé na přední stranu senzoru. Mezi fotorezistory je umístěna clona, které je využito pro omezení dopadajícího záření z jiného směru, než který je konkrétním rezistorem snímán.

Každý fotorezistor je kvůli omezení proudu doplněn ještě klasickým rezistorem tak, že vždy dva takové páry tvoří napěťový dělič připojený mezi zem a 5V napětí. Tímto zapojením tak vzniknou dva napěťové děliče, z nichž jeden je použit pro horizontální a druhý pro vertikální snímání intenzity okolního světla. V klidovém stavu, kdy dopadá na oba fotorezistory každého s děličů stejné množství světla, je v ideálním případě výstup děliče přibližně roven jedné polovině napájecího napětí. Pokud není senzor natočen na Slunce ideálně, dopadá záření na fotorezistory nerovnoměrně a výstupní napětí se adekvátně změní.

Mimo napájecích vodičů jsou ze senzoru vyvedeny dva signálové vodiče, které jsou připojeny na vstupy multiplexeru. Výstupní napěťové signály reprezentují poměr množství dopadajícího světla na jednotlivé fotorezistory. Řídící elektronika tyto signály vyhodnocuje a odvozuje z nich polohu Slunce. V takové chvíli řídicí program provede

takovou změnu orientace panelu, aby bylo množství dopadajícího záření na všech fotorezistorech zhruba stejné.

Protože však nemusí být použité fotorezistory svými vlastnostmi identické, bylo nutné stanovit rozhodovací pásma, s nimiž jsou výstupní signály senzoru porovnávány. Je tedy definováno, jaký musí být minimální rozdíl naměřené a očekávané ideální hodnoty výstupního napětí děliče pro vyvolání požadavku na upravení polohy panelu. Rozhodovací pásma, podle nichž je úroveň dopadajícího záření vyhodnocována, jsou nastavena v kódu programu. Zařízení je ale možné v případě potřeby zkalibrovat dle aktuálních podmínek a použitého senzoru.

**Nastavení rozhodovacích úrovní:** Kalibraci rozhodovacích úrovní senzoru lze provést kdykoliv za běhu zařízení krátkým přepnutím druhého přepínače na plošném spoji. Následně jsou po dobu určenou definicí *CALIBRATION\_DURATION* (standardně dvacet sekund) vyčítány hodnoty získávané ze senzoru osvětlení. Během této doby je nutné vhodnými prostředky jednotlivě zakrýt a následně plně ozářit každý ze snímacích fotorezistorů senzoru. Poté jsou vyčtené hodnoty vyhodnoceny, přičemž z jejich maximálních a minimálních hodnot jsou stanoveny rozhodovací meze pro horizontální i vertikální osu senzoru.

### 5.2.9. Koncové snímače polohy

Jak již bylo uvedeno v minulých kapitolách, je zařízení vybaveno čtveřicí koncových snímačů, které jsou tvořeny mikropsínači vyhovujícími stupni krytí IP65. Ty plní funkci indikace dosažení koncových poloh jak při otáčení, tak i naklápění fotovoltaického panelu. Tyto snímače jsou sestaveny pomocí mechanických spínačů. Snímače jsou umístěny v blízkosti motoru a snímají polohu pohybující se závitové tyče. Snímače vertikálního otáčení se nacházejí na železném profilu uchyceném na jednom ze šroubů, kterými jsou sestaveny horní a dolní část zařízení. K sepnutí snímačů dochází jejich stiskem pohybující se závitovou tyčí, případně stiskem pomocí pevné clony, která je upevněna na podstavě konstrukce.

Dojde-li při nastavování polohy panelu k sepnutí některého z koncových spínačů, zastaví okamžitě řídicí elektronika probíhající pohyb. V následujícím kroku je přesně vyhodnoceno, který ze spínačů byl sepnut. To má za následek zakázání dalšího pohybu

panelu ve směru odpovídajícím poloze sepnutého spínače. Na všechny ostatní směry otáčení a naklápění se panel může pohybovat i nadále.

Koncové snímače pracují na principu rozpínání 5V napětí, přičemž jejich výstupní signály jsou přivedeny na vstupy multiplexeru společně s pull-down rezistory. V okamžiku, kdy není koncový snímač sepnut, je skrze něj na vstup multiplexeru přivedeno 5V napětí. Dojde-li však k jeho sepnutí, obvod se rozpojí a na vstupu multiplexeru zůstává napěťová úroveň daná pull-down rezistorem. Tento způsob zapojení má především tu výhodu, že pokud by nebyly koncové spínače k zařízení vůbec připojeny, jsou navzorkované signály mikrokontrolérem vyhodnoceny tak, jako by byly oba snímače sepnuté. Pohyb panelu podle dané osy tudíž systém zakáže, což znemožňuje chod zařízení bez připojených koncových snímačů, a zvyšuje tak bezpečnost jeho provozu.

Díky použití koncových snímačů je možné definovat maximální rozsahy naklápění a otáčení panelu. Zařízení tak chrání sebe i své okolí proti poškození v důsledku překročení maximálních přípustných poloh pohybu. Překročení krajních poloh by mohlo vyústit v poškození kabelového svazku jeho mechanickým namáháním, či k poškození motorů a převodovek jejich trvalým chodem i přes zablokování v krajní poloze.

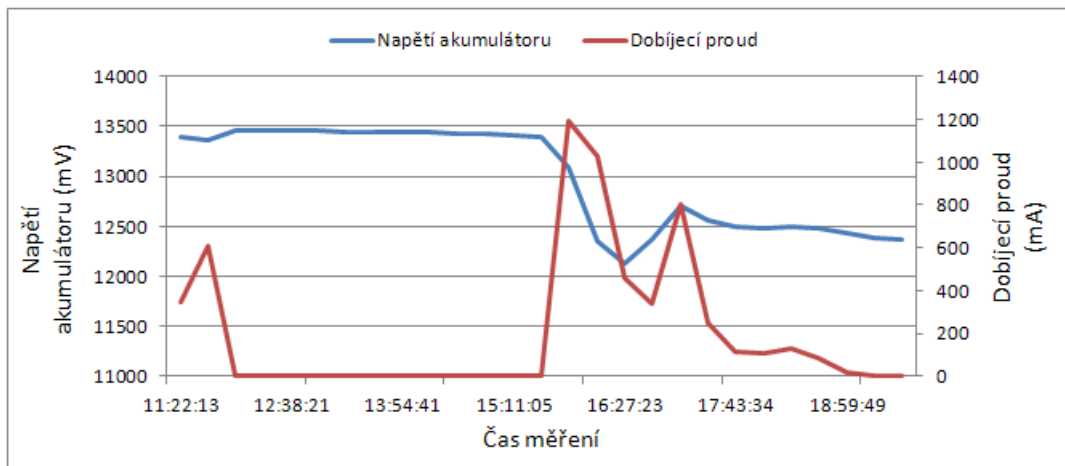
### 5.3. Nabíjení akumulátoru

Aby bylo možné uchovávat energii vyrobenou fotovoltaickým panelem v akumulátoru, bylo nutné vybrat vhodný obvod, který se o jeho nabíjení postará. K tomuto účelu byl vybrán modul s obvodem LM2596-adj, který svými parametry plně vyhovuje pro použití s vybraným fotovoltaickým panelem. Jedná se o napěťový regulátor spínaný se 150kHz frekvencí, jehož výstupní napětí lze regulovat potenciometrem. Vstupní napětí obvodu může dosahovat hodnoty až 40 V, přičemž maximální proud, který je obvod schopen dodávat, je roven 3 A. Tento obvod také vyniká poměrně vysokou účinností, která by se v tomto konkrétním případě použití měla pohybovat na 90% úrovni.[19]

Protože je pro uložení energie použit trvale připojený olověný akumulátor, je jeho nabíjení realizováno metodou konstantního napětí. Výstupní napětí regulátoru připojené na svorky akumulátoru je proto nastavené na pevnou hodnotu, přičemž hodnota dobíjecího proudu se v závislosti na úrovni nabití akumulátoru a množství dopadajícího záření mění. Maximální hodnotu proudu, kterou může použitý panel dodávat, není při

nabíjení nutné nijak omezovat, protože ji vybitý akumulátor bez problému pojme. Je ale potřeba zajistit, aby byl nabíjecí proces včas zastaven, jakmile napětí akumulátoru dosáhne požadované úrovně.

Při nabíjení konstantním napětím je proud tekoucí do akumulátoru tím menší, čím menší je rozdíl napětí akumulátoru a nastaveného výstupního napětí regulátoru. Jakmile se obě napětí vyrovnají, přestane do akumulátoru proud téct i v případě, že na fotovoltaický panel dopadá velké množství slunečního záření. Činnost regulace nabíjecího obvodu je zanesena v grafu (viz obr. 9/s46). Z grafu je patrné omezení dobíjecího proudu poté, co napětí akumulátoru dosáhlo výstupní úrovně nastavené regulátorem. Dále je možné sledovat jeho opětovný nárůst v okamžiku, kdy došlo vlivem připojení externí zátěže k poklesu napětí.



**Obrázek 9.:** Regulace proudu v průběhu dobíjení akumulátoru.

Olověný akumulátor, který je využitý pro uchování vyrobené energie, slouží pouze pro ověření funkce chytrého zdroje. Při praktickém dlouhodobém používání by jej bylo vhodné nahradit trakčním akumulátorem s vyšší jmenovitou kapacitou, případně akumulátorem určeným přímo pro použití v solárních systémech.

### 5.3.1. Chlazení napěťového regulátoru

Dopadá-li na fotovoltaický panel velké množství slunečního záření, dochází k zahřívání obvodu vlivem velké hodnoty procházejícího proudu. Obvod tudíž musí být opatřen chladičem, který teplo vyzařuje do okolí. Na chladiči je ještě umístěný malý



ventilátor, který se stará o nucenou cirkulaci vzduchu v instalační krabici, ve které je napěťový regulátor umístěn. Samozřejmě není nutné, aby ventilátor běžel a zbytečně spotřebovával energii i ve chvílích, kdy není potřeba regulátor aktivně chladit. Problém aktivace ventilátoru v případě potřeby byl proto vyřešen přidáním spínacího obvodu. Ventilátor je ovládaný unipolárním tranzistorem, který je spínán výstupní napěťovou úrovní nastavitelného napěťového děliče. Ten je složený z potenciometru a termistoru s negativním teplotním koeficientem, který je připevněný na tělese chladiče. Jelikož je charakteristika změny odporu termistoru pevně dána, je možné pomocí potenciometru nastavit takový bod, ve kterém výstupní napětí děliče sepne tranzistor (tzn. i ventilátor) přesně v okamžiku, kdy teplota na chladiči dosáhne nastavené hodnoty. Teplota pro sepnutí ventilátoru byla nastavena experimentálně na základě pozorování chování regulátoru v činnosti. Schéma zapojení regulátoru a přidružených obvodů je uvedeno v příloze. Na výstup regulátoru je také ještě přidána dioda, která brání zpětnému toku energie z akumulátoru do regulátoru v případě, že fotovoltaický panel zrovna nedodává dostatečné množství energie.

#### **5.4. Stacionární varianta bez naklápění panelu**

Chytrý zdroj je konstruován tak, aby bylo dosaženo většího množství vyrobené energie, než kolik dodá pevně umístěný panel. Pro vyhodnocení a posouzení přínosu, který použitím chytrého zdroje vznikne, bylo třeba přidat ještě druhý, pevně umístěný fotovoltaický panel a sledovat množství jím vyrobené energie. Z toho důvodu byla sestavena řídicí elektronika, která zajišťuje jak nabíjení akumulátoru, tak i měření dodané energie. Pro dobíjení akumulátoru je použitý stejný napěťový regulátor jako u chytrého zdroje. Řídicí elektronika je umístěna v instalační krabici, která ji chrání před vlhkostí a dalšími vlivy okolí. Skrze kabelovou průchodku jsou z krabice vyvedeny dva konektory, kterými jsou připojeny fotovoltaický panel a akumulátor.

Základem obvodu je stejně jako u chytrého zdroje mikrokontrolér ATmega328P. Ten je doplněn o několik periférií tak, aby mohl vykonávat řídicí program. Jedním z jeho hlavních úkolů je vyhodnocování měřených hodnot, které jsou získávány z připojeného senzoru INA219. Skrze měřicí rezistor tohoto senzoru prochází veškerá energie, která je fotovoltaickým panelem do akumulátoru dodána. Vlastní spotřeba celého zařízení

není měřena, protože jeho úkolem je především podávání informací o množství energie dodané do akumulátoru. Jelikož má ale vlastní spotřeba zařízení v čase pravidelný průběh, je možné ji v případě potřeby dopočítat.

Aby bylo možné naměřené hodnoty vztáhnout k nějakému konkrétnímu časovému okamžiku, je na stejnou sběrnici se senzorem INA219 připojen i modul s obvodem DS1307. Ten poskytuje mikrokontroléru důležité údaje o aktuálním datu a čase, které jsou velmi důležité pro správný chod zařízení. Naměřená data je tak například možné jednoduše porovnávat dle času s daty získanými během provozu chytrého zdroje.

Řídící elektronika tedy dokáže vyčítat měřená data a přiřadit je k danému časovému okamžiku. Je ale také potřeba vhodným způsobem zajistit uchování dat za účelem jejich dalšího využití. Zatímco chytrý zdroj odesílá naměřená data prostřednictvím sériové linky, jednotka pro pevnou variantu je ukládá a shromažďuje. Za tímto účelem je proto rozšířena modulem, díky kterému je možné připojit paměťovou kartu typu SD. V podstatě se jedná o plošný spoj se slotem pro paměťovou kartu, jejíž kontakty jsou skrze pinovou lištu propojeny s mikrokontrolérem. Na rozdíl od sběrnice I<sup>2</sup>C, jejímž prostřednictvím jsou připojeny hodiny reálného času a senzor INA219, je ke komunikaci s paměťovou kartou je využita sběrnice SPI<sup>2</sup>. Vzhledem k tomu, že jsou na paměťovou kartu pravidelně prováděny zápisy dat, je nutné zařízení odpojit od panelu i akumulátoru před tím, než dojde k jejímu vyjmutí. Lze tak omezit možnost poškození uložených dat vlivem nesprávně provedeného zápisu.

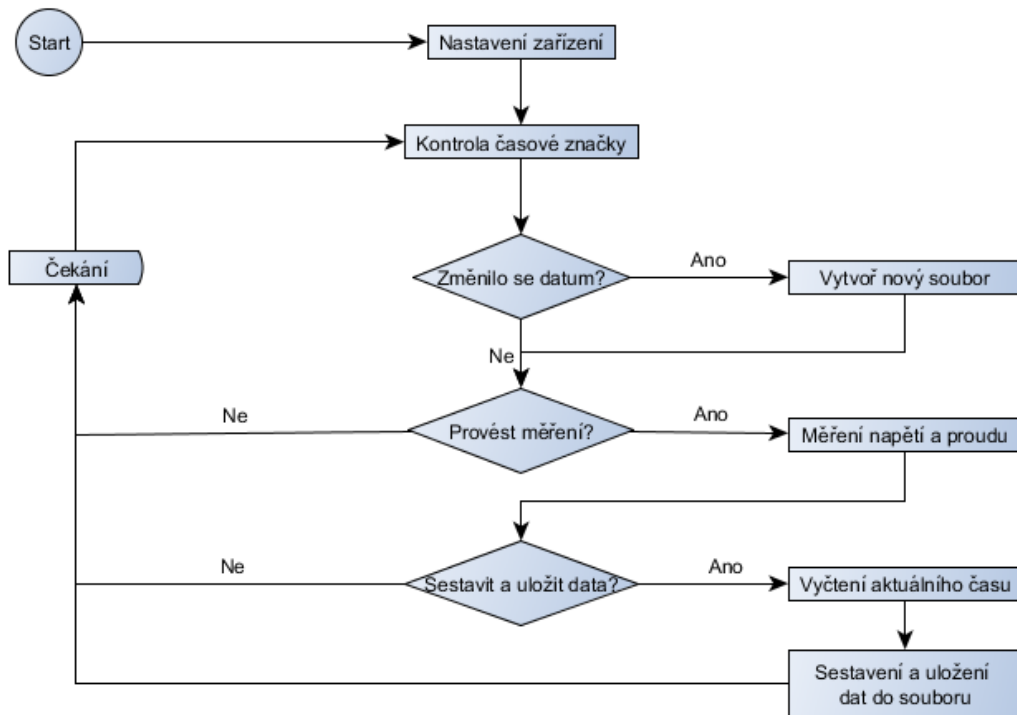
Jelikož není zařízení vybaveno vlastním komunikačním rozhraním, jehož sledováním by bylo možné kontrolovat jeho správnou činnost, je k jednomu z pinů procesoru připojena kontrolní dioda. Frekvence, s níž dioda bliká, indikuje, zda probíhá činnost zařízení správně, nebo nikoliv. Při normálním běhu dioda pravidelně krátce blikne s periodou přibližně 1,25 s. Není-li však po startu zařízení nalezena paměťová karta a zařízení tudíž nemůže pracovat, dioda trvale svítí a jednou za sekundu krátce zhasne.

#### 5.4.1. Řídící algoritmus

Činnost zařízení je vykonávána podle řídicího algoritmu, jehož zjednodušené schéma je uvedené v diagramu (viz obr. 10/s49). Po připojení zařízení k napájení je

<sup>2</sup>Jedná se o zkratku z názvu Serial Peripheral Interface, což je typ sériové sběrnice, která využívá architekturu master-slave.

provedeno nejprve nastavení mikrokontroléru, které je následováno kontrolou přítomnosti paměťové karty a připojených periférií. Po dokončení nastavení je zahájeno vykonávání nekonečné smyčky, z níž jsou volány jednotlivé procedury a funkce do té doby, dokud není zařízení odpojeno od napájení. Vybrané části algoritmu pak budou popsány v následujících odstavcích.



**Obrázek 10.:** Diagram řídicího algoritmu elektroniky pevně umístěného panelu.

**Kontrola časové značky:** V případě dlouhodobého měření je třeba zajistit, aby bylo možné naměřená data přehledně procházet a vyhodnocovat. Z tohoto důvodu je v algoritmu zařazen mechanismus, který zajišťuje dělení zaznamenaných dat do jednotlivých souborů podle dne, v němž bylo měření prováděno. Program proto pravidelně porovnává dvě poslední časové značky a vyhodnocuje, zda se vzájemně liší jejich datum, či nikoliv. Pokud je datum stejné, program pokračuje beze změny dále. Liší-li se však porovnávaná data, znamená to, že nastal nový den a je nutné zahájit měření do nového souboru. Změna data je také vyhodnocena vždy v případě, že je zařízení poprvé připojeno k napájení a je nutné vytvořit soubor pro první měření po resetu.

**Vytvoření nového souboru:** Jakmile je požadováno vytvoření nového souboru, musí pro něj program především vybrat vhodný název. Standardně jsou měřená data uložena v textovém souboru pojmenovaném pomocí prefixu a pětice čísel (např. log00001.txt). Proces výběru vhodného názvu probíhá pomocí postupného procházení všech souborů na paměťové kartě s tím, že je vyhledáván soubor s názvem obsahujícím nejvyšší číslo. Následně je nejvyšší nalezený index inkrementován o jedna a vložen do názvu nového souboru, který je ihned vytvořen a používán pro zápis měřených dat. Po vytvoření nového souboru program ještě vynuluje uloženou hodnotu celkově vyrobené energie, a výpočet tak začíná znovu. Každý soubor proto obsahuje pouze měřená data relevantní k danému dni.

**Sestavení a uložení dat:** Jednou za osm iterací nekonečné smyčky programu jsou vyčteny časové údaje z obvodu reálného času a zapsána aktuálně naměřená data do souboru. Každý zápis přidá do souboru s měřeními daty jeden nový řádek s jednotlivými měřeními údaji oddělenými pomocí středníků. Každý zapsaný řetězec obsahuje tyto údaje: aktuální datum, čas, napětí akumulátoru v milivoltech, dobíjecí proud v miliampérech a celkové množství dodané energie.

## 5.5. Webové rozhraní pro zobrazení dat

Během práce na chytrém zdroji bylo také nutné vyřešit možnost vzdáleného sledování jeho činnosti a chování. A to jak během testování, tak samozřejmě i při jeho praktickém provozu. To bylo hlavním důvodem pro vznik webového rozhraní zajišťujícího zpracování a zobrazování jeho výstupních dat. Finální podoba tohoto rozhraní byla vybrána především s ohledem na univerzálnost řídicí elektroniky a možnost jejího snadného použití samostatně, ale i v rámci chytrého domu.

Z těchto důvodů byl proto pro realizaci použit vývojový kit Arduino MEGA2560 doplněný o rozšiřující modul obsahující ethernetový kontrolér Wizznet W5100 a slot pro paměťovou kartu. Arduino zajišťuje vykonávání řídicího algoritmu, zpracování dat a obsluhu ethernetového řadiče, jehož prostřednictvím jsou realizovány jednotlivé vrstvy komunikace. Sběr dat a připojení mikrokontroléru na sběrnici RS232 pak zajišťuje modul vybavený obvodem MAX232. Jelikož je vývojový kit Arduino výrobcem navržený

pro rozšiřování pomocí dalších modulů, je s ním ethernetové rozhraní propojeno prostřednictvím pinových lišt do jednoho celku. Komunikační modul je pak s hlavní deskou připojen čtveřicí propojovacích vodičů. Elektronika webového serveru je zachycena v příloze na obrázku 20/sIII.

Propojením těchto modulů dohromady a vytvořením jejich řídicího algoritmu bylo získáno zařízení schopné vykonávat celou řadu činností. Především dokáže přijímat a zpracovávat chytrým zdrojem odesílaná data a ukládat je dlouhodobě na paměťovou kartu. Jelikož ethernetový kontrolér hostí malý webový server, lze se na něho prostřednictvím počítačové sítě připojit a naměřená data sledovat prostřednictvím přehledné webové stránky (viz obr. 11/s52). Ta je rozdělena na dvě záložky, přičemž naměřené hodnoty odesílané chytrým zdrojem jsou zobrazeny v tabulce na první z nich. Tato tabulka je v pravidelných intervalech aktualizována tak, aby poskytovala vždy co nejaktuálnější data. Periodu, s níž je stránka aktualizována, lze měnit. K tomu slouží textový vstup ve spodním řádku tabulky, kam lze zadat požadovaný čas v milisekundách, přičemž minimální čas obnovy je nastaven na 2000 ms. Ke změně aktuální periody obnovování na zadanou hodnotu dojde s další pravidelnou aktualizací stránky, případně ihned po stisku tlačítka *Refresh*. Druhá záložka stránky pak slouží pouze pro zobrazení krátkého popisu zařízení a jeho činnosti.

Aby mohlo být toto rozhraní použito v konkrétní počítačové síti, musí být upraveny patřičné náležitosti, jako jsou jeho adresa a maska podsítě. Zároveň musí být adresa serveru upravena i ve zdrojovém kódu zobrazované stránky na paměťové kartě.

### 5.5.1. Činnost algoritmu webového rozhraní

Řídicí algoritmus webového rozhraní vychází z ukázkových příkladů, které vývojová platforma Arduino nabízí. Je sestaven z hlavního kódu programu a několika procedur a funkcí, které jsou z něho volány. Po spuštění zařízení je nejprve provedeno jeho nastavení a kontrola přítomnosti paměťové karty. Po úspěšné kontrole je zahájeno vykonávání hlavní části programu, jež se nejprve stará o vytvoření souboru pro ukládání dat. Vytváření nového souboru probíhá podobným způsobem jako u řídicí elektroniky fotovoltaického panelu bez naklápění (viz kapitola 5.4). Aktuální soubor je tudíž vždy ten, v jehož názvu je použit nejvyšší index. Kvůli přehlednosti jsou do stejného souboru

The screenshot shows a web interface titled "Smart power supply web interface". It features two tabs: "Measurement" and "Overview". The main content is a table with the following data:

Timestamp	
Current date:	1:10:15
Device time:	21:19:2
Next position check at:	7:0
Values of current	
Charging current:	0 mA
Consumed current:	55 mA
Battery	
Current voltage:	12125 mV
Energy amounts	
Charged energy:	0.000000 Wh
Consumed energy:	1.886365 Wh
Ambient condition	
Temperature:	24.1 °C

At the bottom of the table, there is a "Refresh time in ms (t=2000)" input field set to "20000" and a "Refresh" button. The footer of the interface reads: "Smart solution of alternative energy source for smart houses - University of Hradec Kralove- Jakub Vit 2015".

Obrázek 11.: Úvodní stránka webového rozhraní s tabulkou hodnot.

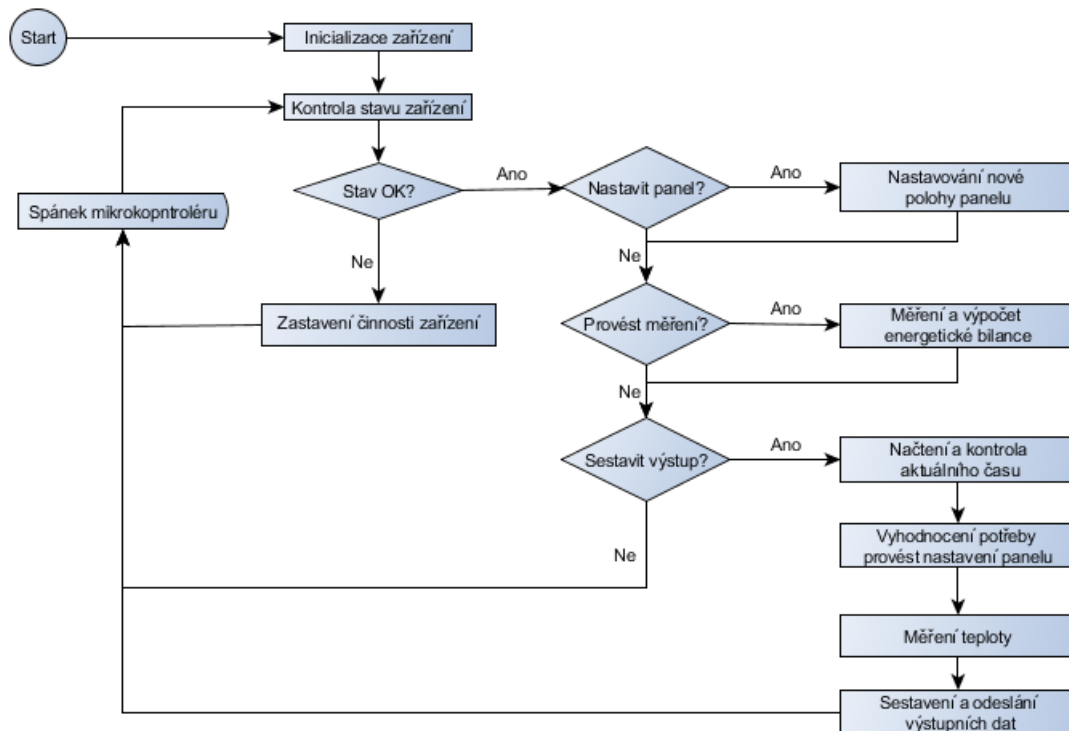
ukládána pouze data náležící k těmtož dni. Všechna přijatá data jsou tudíž analyzována a nový soubor je vytvořen vždy, změnilo-li se systémové datum chytrého zdroje.

V nekonečné smyčce hlavního programu se dále kontroluje, zda je k webovému serveru připojen nějaký klient. Pokud ano, jsou mu odeslána vhodně sestavená data. V první řadě je z paměťové karty načten a odeslán kód webové stránky tak, aby mohla být na straně klienta zobrazena. Poté se už kód stránky s nastavenou periodou pravidelně dotazuje zpět na server s požadavky na získání aktuálních hodnot tak, aby mohly být zobrazeny v tabulce. Mikrokontrolér následně tyto dotazy analyzuje a sestavuje na ně vhodné odpovědi obsahující hodnoty jednotlivých proměnných.

## 6. Řídicí software chytrého zdroje

Řízení chytrého zdroje je zajištěno řídicím algoritmem, který se stará o veškeré činnosti spojené s provozem chytrého zdroje. Především zajišťuje vyhodnocování polohy Slunce, natáčení fotovoltaického panelu, měření energetické bilance a komunikaci s webovým rozhraním. V této části práce proto budou popsány některé důležité součásti řídicího algoritmu. Veškeré kódy programů, které se týkají řízení chytrého zdroje, webového serveru i řídicí jednotky stacionárně umístěného panelu, jsou příliš objemné na to, aby byly uvedeny v textu této práce. Z tohoto důvodu jsou v kompletní podobě uloženy na datovém médiu, které je součástí přílohy.

Sestavený kód řídicího programu chytrého zdroje je členěný obvyklým způsobem, který je typický pro programování mikrokontrolérů. Nejprve obsahuje inicializace všech globálních proměnných a definice maker, která jsou uvedena v deklarační části kódu programu pomocí klíčového slova *#DEFINE*. Tato makra jsou v programu použita pro řízení chodu zařízení a není možné je za běhu měnit. Je ale možné je měnit před kompilací a nahráním programu do mikrokontroléru. Některé z těchto maker je bezpodmínečně nutné upravit v závislosti na umístění a zamýšleném způsobu používání zařízení. Jako parametry jsou uloženy například adresy periférií připojených na sběrnici, adresy registrů periférií, identifikace využitých pinů procesoru a časové parametry řídicí činnosti zařízení. Tam, kde nestačí použití pevně daných maker, je v programu využíváno jak celočíselných, tak i dvoustavových řídicích proměnných, jejichž hodnoty mohou být za běhu programu dle potřeby pozměňovány. Příklady několika takových parametrů a stavových proměnných včetně jejich standardních hodnot jsou uvedeny v tabulce (2/s55). Poté jsou v kódu deklarovány všechny procedury a funkce, které jsou volány z hlavní části programu.



**Obrázek 12.:** Diagram činnosti řídicího algoritmu chytrého zdroje.

**Inicializace programu:** Tato část kódu je součástí procedury *setup()* a zajišťuje uvedení zařízení a veškerých jeho periferií do provozu. Proto musí být vždy volána jako první po resetu mikrokontroléru. Nejprve jsou inicializována komunikační rozhraní, konkrétně sběrnice I<sup>2</sup>C pro připojení periferií a sériová linka. Následně musí být provedeno nastavení funkce jednotlivých pinů procesoru a definován jejich počáteční stav. Protože je již nastaveno komunikační rozhraní I<sup>2</sup>C, probíhá dále konfigurace na něj připojených periferií. Pro jednotlivé senzory INA219 jsou tudíž volány procedury, které zajišťují jejich konfiguraci a kalibraci. Provedení tohoto nastavení je klíčové pro zajištění jejich správné funkce. Bližší popis těchto metod je uveden v kapitole 5.2.2. Poslední krok této procedury zajišťuje komunikaci s obvodem DS1307. V závislosti na nastavení proměnné *setClock* je provedeno buď vyčtení aktuálního času a data z obvodu reálného času, nebo jeho nastavení na základě proměnné uložené v programu.



Název parametru	Hodnota	Popis parametru
BAUD_RATE	38400	Rychlost komunikace na sběrnici RS232.
WAKEUP_HOUR	7	Čas zahájení sledování Slunce [hod].
GO_TO_BED_HOUR	19	Čas ukončení sledování Slunce [hod].
STANDSTILL_DURATION	1	Doba od ukončení sledování Slunce, po níž je panel nastaven do výchozí polohy [hod].
AD_PINS_USED	12	Počet vzorkovaných pinů multiplexeru.
STD_MIN_VALUE	16	Prodleva mezi dvěma kontrolami nastavení panelu [min].
SAMPLING_WAIT_TIME	160	Doba kontroly správnosti nastavené pozice panelu [udávaná v násobcích 125 ms].
rightInitPosition	true/false	Nastavení výchozí polohy panelu.
relaysEnabled	true/false	Povolení programového spínání výstupů.

**Tabulka 2.:** Některé volitelné parametry ovlivňujících činnost zařízení.

**Hlavní kód programu:** Hlavní část kódu programu je vykonávána v nekonečné smyčce realizované procedurou *loop()* a provádí volání jednotlivých procedur a funkcí, které zajišťují chod celého zařízení po dobu jeho běhu. Vždy po každém průchodu nekonečnou smyčkou mikrokontrolér kvůli snížení spotřeby na předem stanovený čas usíná. Jelikož není nutné vykonávat vždy všechny činnosti uvedené v hlavní části kódu najednou, je usínání a probouzení řídicího obvodu využito pro jejich časování. Rychlé děje jsou tudíž pravidelně obsluhovány vždy s probuzením mikrokontroléru každých 125 ms tak, aby se předešlo možným prodlevám a zpožděním. Volání pomalejších činností pak probíhá s periodou 250 ms a 1000 ms, tedy nejdéle jednou za osm iterací nekonečné smyčky hlavního programu. Pro přehlednost je celková činnost programu popsána zjednodušeným vývojovým diagramem (viz obr. 12/s54). V následujících kapitolách budou uvedeny některé procedury a funkce, které jsou v hlavním kódu programu volány.

## 6.1. Kontrola stavu systému

Kontrola systému probíhá s každým probuzením mikrokontroléru a zajišťuje jednoduchou diagnostiku správné funkce zařízení a jeho součástí. Slouží také pro zachycení rychle se měnících dějů, například pro rozpoznání stisku některého z koncových snímačů polohy. Díky tomu zařízení disponuje jednoduchou diagnostikou, pomocí níž lze odhalit některé možné problémy, které mohou při provozu zařízení nastat.

Princip činnosti této funkce je poměrně jednoduchý. Tato část programu v podstatě porovnává reálné naměřené, navzorkované či vyčtené stavové veličiny s jejich očekávanými hodnotami. Z tohoto důvodu jsou nejprve mikrokontrolérem navzorkovány všechny využitě vstupní signály multiplexeru a načtena stavová proměnná hodin reálného času. Teprve až potom je možné kontrolu činnosti systému provést. Jakmile algoritmus vyhodnotí při kontrole systému chybu, vypíše po sériové lince informační hlášku a pozastaví vykonávání dalších činností zařízení do té doby, dokud není problém odstraněn. Výstup solárního panelu je v takovém případě nadále připojen ke zdroji a akumulátoru, nicméně veškeré řízení a výpočty energetické bilance jsou neaktivní. Proběhne-li kontrola systému bez zjištění problému, pokračuje mikrokontrolér dále ve vykonávání řídicího algoritmu. Všechny kontrolované parametry systému jsou uvedeny dále.

### 6.1.1. Činnost multiplexeru

Prvním z kontrolovaných parametrů je návratová hodnota funkce, která zajišťuje vyčítání hodnot multiplexeru. Tato funkce totiž vrací hodnotu, která odpovídá navzorkovanému napětí na prvním vstupu multiplexeru. Protože je na prvním vstupu trvale připojeno napětí s hodnotou 5 V, musí návratová hodnota tomuto napětí odpovídat. Nemá-li návratová hodnota požadovanou velikost, nastala chyba v napájení, adresaci, či přímo v samotném obvodu multiplexeru.

### 6.1.2. Napětí v obvodu

Řídicí program také kontroluje napětí akumulátoru, přičemž se nespolehá na údaje zprostředkované ze senzorů INA219, ale provádí měření odporovým děličem, přes který je k multiplexeru připojený kladný pól akumulátoru. Z přepočteného napětí na výstupu odporového děliče program vyhodnocuje, jaké je napětí akumulátoru a zdali nedošlo

k jeho odpojení. Procedura má také nastaveny prahové hodnoty, podle nichž se snaží omezit zatížení akumulátoru při jeho nízkém napětí. Klesne-li totiž napětí akumulátoru na stanovenou dobu pod definovanou spodní hraniční mez, dojde k odpojení ovládání relé a odpojení zátěže na jejich spínacích kontaktech. Jakmile napětí vzroste nad horní hraniční mez, je ovládání relé obnoveno. Tím je zajištěna dostatečná hystereze spínání zátěže v okamžiku nízkého stavu napětí akumulátoru. Obsluhu této činnosti provádí procedura viz zdrojový kód 1/s57.

```
void CheckMainBattery() { // procedure that checks the battery status

    if ((adArray[VOLTAGEBATAT] < LOAD_CUTOFF_VOLTAGE)
        && (adArray[VOLTAGEBATAT] > BATTERY_DISCONNECTED)) {
        // battery voltage is low, but still sufficient for system operation

        if (mainBatterySampleCount > VOLTAGE_DROP_DURATION) {
            // Battery voltage is low for predefined period
            digitalWrite(RelayOutputEnablePin, LOW); // Disable Relay output
            digitalWrite(RelayOutputEnablePin2, LOW); // Disable Relay output
        } else {
            mainBatterySampleCount++; // measurement of low-voltage period
        }
    } else if (adArray[VOLTAGEBATAT] > LOAD_RESTORE_VOLTAGE) {
        // battery reached load and restore voltage
        if (mainBatterySampleCount == 0) {
            relayCheck(); // checks current time and activates/deactivates the relays if
                necessary
        } else {
            mainBatterySampleCount--;
        }
    }
}
```

**Ukázka kódu 1:** Funkce zajišťující odpojení spínacích kontaktů relé při poklesu napětí akumulátoru.

### 6.1.3. Stav koncových snímačů

Koncové snímače jsou velmi důležitou součástí zařízení, protože je jejich prostřednictvím ohraničen bezpečný pohyb fotovoltaického panelu. Aby se tudíž předešlo

poškození zařízení, je nutné správnou činnost koncových snímačů kontrolovat a v případě potřeby upozornit na nastalou poruchu. Pracuje-li systém správně, mohou být zároveň sepnuty pouze dva koncové snímače. Na každé z os pohybu jeden. Vždy po navzorkování vstupů multiplexeru, na něž jsou výstupní signály koncových snímačů připojeny, proběhne jejich vyhodnocení. Je-li zjištěno, že jsou na některé z os pohybu sepnuty oba koncové snímače, systém vyhodnotí a indikuje chybový stav. Díky způsobu, jakým je obvod koncových snímačů zapojen, vyhodnotí systém chybový stav také v případě, že nejsou koncové snímače k zařízení připojeny vůbec.

#### 6.1.4. Činnost hodin reálného času

Další podstatnou součástí chytrého zdroje jsou hodiny reálného času, na jejichž správné funkci je celá činnost zařízení závislá. Z tohoto důvodu je řídicí algoritmus navržený tak, že dokáže při každém vyčítání aktuálního času provést kontrolu správné funkce obvodu a případně upozornit na nastalou chybu. V kódu programu jsou pevně uloženy chybové hodnoty času, jejichž vyčtení z obvodu reálného času je příznakem výskytu chyby. Z tohoto důvodu je aktuální čas vždy nejprve porovnán s těmito chybovými hodnotami a pak až použit pro řízení činnosti zařízení. Je-li z obvodu DS1307 vyčtena některá z chybových hodnot, zařízení na ni upozorní a přechází do chybového stavu. Systém dokáže rozpoznat odpojení obvodu od sběrnice a také jeho vynulování vlivem vybití záložního akumulátoru.

## 6.2. Vyčítání hodnot přepínače na plošném spoji

Čtveřice přepínačů na spodní desce plošného spoje slouží jako jednoduchý uživatelský vstup zařízení, kterým je možné měnit například hodnoty některých stavových proměnných programu. Tohoto přepínače bylo využíváno především při ladění programu, především k aktivaci pomocných výpisů vnitřních hodnot na sériovou linku. V současné konfiguraci zařízení je využita pouze dvojice přepínačů z celkového počtu. I krátkodobé sepnutí prvního z nich zahájí kalibraci hodnot senzoru pro snímání polohy Slunce, viz kapitola 5.2.8. Pozice druhého z přepínačů pak povoluje, případně zakazuje provádění vyhledávání polohy Slunce. Nastavením tohoto přepínače je tedy možné ponechat panel trvale v aktuálním nastavení.

### 6.3. Úprava orientace solárního panelu

Nastavení panelu do optimální polohy vůči Slunci (viz obr. 13/s62) představuje hlavní výhodu chytrého zdroje oproti solárním systémům s pevným umístěním. K tomu je zapotřebí zajistit ovládání obou motorů nastavování na základě vyhodnocení výstupních signálů snímače osvětlení a celé řady řídicích proměnných. Všechny tyto činnosti obsluhuje procedura *solarTracking()*, jež je volána s každým probuzením mikrokontroléru. Jelikož samozřejmě není nutné nastavení panelu měnit a kontrolovat pravidelně v průběhu celého dne a noci, je pomocí parametrů programu definováno časové okno, mimo nějž je sledování Slunce deaktivováno. Přesněji se jedná o dva parametry, ve kterých je uložena hodina zahájení a hodina ukončení sledování Slunce. Zároveň je v programu definován ještě další parametr, který určuje čas mezi provedením dvou následujících kontrol nastavení panelu.

Zde je třeba zmínit, že dosažení správné orientace panelu zajišťují dvě části kódu, které jsou prováděny s odlišnou frekvencí. Jednou za sekundu je společně s vyčtením aktuálního času volána procedura, kontrolující nejen jestli se zařízení nachází uvnitř povoleného časového okna, ale také jestli již nadešel správný čas pro provedení změny orientace panelu. Jsou-li podmínky splněny, je pak s každým probuzením mikrokontroléru volána procedura *panelAlignment()*. Ta přímo provádí vyhodnocování signálů ze senzoru osvětlení a také spínání h–můstku. Volání této procedury každých 125 ms pak probíhá tak dlouho, dokud není panel optimálně nastaven v závislosti na aktuálních okolních podmínkách.

Rozhodování o tom, kterým směrem je třeba panel natočit, probíhá na základě porovnání výstupu senzoru osvětlení s programově definovanými prahovými hodnotami. Jakmile se některá z navzorkovaných hodnot odchýlí od programově očekávané hodnoty, znamená to, že na fotorezistory snímače nesvítí Slunce rovnoměrně, a je proto nutné polohu panelu vhodně upravit. V závislosti na tom, které řídicí podmínky procedury jsou vlivem hodnot vstupních signálů splněny, sepne nejprve mikrokontrolér 5V napájení h–můstku. Poté je teprve prováděno ovládání a spínání motorů zajišťujících změnu polohy podle jedné z os. Jako první je při provádění změn v orientaci panelu nastavováno jeho azimutální natočení. Teprve po dosažení ideálního nastavení v této ose jsou provedeny i změny ve sklonu panelu vůči zemi. Samozřejmě ale nastává stav, kdy

je kvůli změně náklonu panelu potřeba znovu upravit jeho azimut. V takovém případě je naklápění přerušeno a opět se nejdříve provede dorovnání azimutálního nastavení.

Při probíhající nastavení panelu jsou současně neustále kontrolovány stavy všech koncových snímačů obvodu. Tím je zajištěno, že bude možné nastavení polohy včas zastavit, a předejít tak všem škodám, které by mohly po překročení krajních poloh pohybu vzniknout.

Pokaždé, když je procedura *panelAlignment()*, viz zdrojový kód 2/s60, provedena, vrací návratovou hodnotu *true* v případě, že bylo nastavení orientace panelu jakkoliv upraveno. V opačném případě je vrácena hodnota *false*. Toho je využito především pro rozpoznávání dosažení optimální orientace panelu a nastavení času dalšího následujícího volání procedury.

```
boolean panelAlignment() { // vertical and horizontal panel adjustment
    boolean moveStatus = false;
    uint16_t horizontalValue = adArray[3]; //Sunsensor output value 1
    uint16_t verticalValue = adArray[2]; //Sunsensor output value 2

    if ((horizontalValue < (hAVG - (OFFSET))) && (!(horizontalValue > (hAVG + (OFFSET)))) &&
        (!limitSwitchRigth) ) {
        digitalWrite(HBridgeSupplyPin, HIGH); // enable HBRIDGE
        moveStatus = true;
        digitalWrite(MOTORH_2, LOW);
        digitalWrite(MOTORV_1, LOW); // stop vertical motor
        digitalWrite(MOTORV_2, LOW);
        digitalWrite(MOTORH_1, HIGH);
    } else if ((horizontalValue > (hAVG + (OFFSET))) && !(horizontalValue < (hAVG - (OFFSET))))
        && (!limitSwitchLeft) ) {
        digitalWrite(HBridgeSupplyPin, HIGH); // enable HBRIDGE
        moveStatus = true;
        digitalWrite(MOTORH_1, LOW);
        digitalWrite(MOTORV_1, LOW); // stop vertical motor
        digitalWrite(MOTORV_2, LOW);
        digitalWrite(MOTORH_2, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(HBridgeSupplyPin, LOW); //disable HBRIDGE
        digitalWrite(MOTORH_1, LOW);
        digitalWrite(MOTORH_2, LOW);
        digitalWrite(MOTORV_1, LOW); // stop vertical motor
        digitalWrite(MOTORV_2, LOW);
    }
}
```

```

if ((verticalValue > (hAVG - (OFFSET))) && !(verticalValue < (hAVG + (OFFSET)))) &&
(!limitSwitchUp) ){
    digitalWrite(HBridgeSupplyPin, HIGH); // enable HBRIDGE
    moveStatus = true;
    digitalWrite(MOTORV_2, LOW);
    digitalWrite(MOTORV_1, HIGH);
}else if((verticalValue < (hAVG + (OFFSET))) &&
!(verticalValue > (hAVG - (OFFSET)))) && (!limitSwitchDown) ){
    digitalWrite(HBridgeSupplyPin, HIGH); // enable HBRIDGE
    moveStatus = true;
    digitalWrite(MOTORV_1, LOW);
    digitalWrite(MOTORV_2, HIGH);
}else{
    digitalWrite(HBridgeSupplyPin, LOW); //disable HBRIDGE
    digitalWrite(MOTORH_1, LOW);
    digitalWrite(MOTORH_2, LOW);
    digitalWrite(MOTORV_1, LOW);
    digitalWrite(MOTORV_2, LOW);
    moveStatus = false;
}
}
return moveStatus; // status that says that panel is currently moving
}

```

**Ukázka kódu 2:** Funkce zajišťující nastavení panelu do optimální polohy.

### 6.3.1. Rozhodnutí o správnosti nastavené orientace panelu

Aby bylo dosaženo co nejpřesnější polohy panelu vůči Slunci, bylo nutné řídicí proceduru ještě doplnit o mechanismus kontrolující správnost jejího nastavení. Bez tohoto mechanismu by totiž byla řídicí procedura ihned po nastavení první vyhovující polohy panelu ukončena a zařízení by bylo ponecháno v takovém stavu až do dalšího volání procedury *panelAlignment()*. Mohlo by se tím pádem stát, že dojde k nastavení špatné polohy panelu vlivem krátkodobé změny okolních podmínek, například kvůli zastínění Slunce, nebo pohybem cizího předmětu přes dráhu dopadajícího záření.

Tento kontrolní mechanismus pracuje na principu vyhodnocování návratové hodnoty procedury *panelAlignment()*. Poloha panelu je považována za ideální, odpovídá-li návratová hodnota procedury po přesně stanovenou dobu trvale hodnotě *false*. Délka časového úseku, po který tato kontrola standardně probíhá, je definována parametrem

*SAMPLING\_WAIT\_TIME* tak, aby odpovídala zhruba dvaceti sekundám. V praxi to tedy znamená, že po jakékoliv změně v orientaci panelu musí výstupní hodnoty snímače osvětlení po dobu přibližně dvaceti sekund soustavně potvrzovat, že je panel vůči Slunci orientován ideálně. Vyhodnotí-li kdykoliv během čekací doby řídicí algoritmus, že je ještě nutné orientaci panelu změnit, vrátí procedura hodnotu *true* a celý cyklus čekací doby je zahájen znovu. K nastavení časové značky určující čas provedení následující kontroly polohy Slunce dojde až v okamžiku, kdy v pořádku uplyne čekací doba.



**Obrázek 13.:** Změny v orientaci panelu v průběhu testovacího dne.

### 6.3.2. Nastavení času následující kontroly polohy Slunce

Kontrola snímače Slunce a nastavení polohy panelu je prováděna cyklicky v předem definovaný čas. Po každé provedené kontrole orientace panelu je tudíž nutné tento čas znovu nastavit tak, že je k aktuálnímu času přičtena doba definovaná parametrem *STD\_MIN\_VALUE*. To ale platí pouze v případě, pokud bylo v minulém cyklu s panelem pohybováno. V opačném případě je čas další kontroly nastaven jako součet aktuálního času a poloviny hodnoty parametru *STD\_MIN\_VALUE*. Důvodem pro toto nastavení je fakt, že nedošlo-li již dlouho ke změně nastavení panelu, např. vlivem zvýšené oblačnosti, může Slunce po obloze urazit značnou vzdálenost a zvyšuje se tím nepřesnost nastavené polohy. Díky zrychlenému režimu kontroly polohy Slunce je tudíž větší šance, že zařízení detekuje například chvilkové rozptýlení oblačnosti a nastaví panel správně.



### 6.3.3. Nastavení panelu do výchozí polohy

Řídicí elektronika chytrého zdroje má programově definovanou výchozí polohu, do které je třeba každý den ve večerních hodinách panel nastavit. Programově lze vybírat mezi dvěma polohami azimutálního nastavení, přičemž obě dvě spočívají v dojezdu panelu do jedné z krajních poloh definované koncovými spínači. Nastavení krajní polohy musí proběhnout především z toho důvodu, aby byl panel každé ráno včas a správně nastaven do místa, kde vychází Slunce. Zařízení je tak uvedeno do ideální výchozí pozice pro zahájení činnosti na další den. Aby však mělo nastavení krajní polohy smysl, musí být podstava chytrého zdroje namířena takovým způsobem, aby panel po dojezdu do vybrané krajní polohy směřoval co nejvíce k místu, kde v dané lokalitě vychází Slunce.

Dojezd panelu do krajní polohy je proveden až po uplynutí programově definované doby od ukončení aktivního sledování Slunce (viz parametry v tabulce (2/s55)). Jakmile nastane čas pro ustavení panelu v krajní poloze, dojde k sepnutí motoru azimutálního nastavení patřičným směrem. Motor je ovládán až do okamžiku prvního sepnutí koncového snímače, poté je tato procedura ukončena. Pokud by tedy například během noci došlo k mírnému pohybu panelu vlivem větru, řídicí elektronika se nebude snažit ho do výchozí polohy ustavit zpět. Důvodem je úspora energie, která by mohla být zbytečně vynaložena a také fakt, že úplná přesnost nastavení výchozí polohy panelu není pro činnost zařízení důležitá. Po dalším zahájení aktivního sledování Slunce se navíc panel v případě nutnosti do ideální polohy ustaví.

Vzhledem k tomu, že v nejméně příznivém případě musí panel přejet celý rozsah natáčení ze západu až na východ, je třeba ochránit h-mústek před možným přehřátím, které by mohlo trvalým chodem motoru vzniknout. Z toho důvodu je pohyb panelu zpět do výchozí polohy vykonáván po částech. Motor je sepnutý vždy pouze na dvacet sekund, pak následuje čtyřicetisekundová pauza. Tento cyklus se pravidelně opakuje do té doby, dokud není výchozí poloha panelu konečně nastavena.

## 6.4. Návrh a implementace monitorování energetické bilance

Hlavním účelem použití chytrého zdroje je zvýšení množství energie získané přeměnou slunečního záření oproti zařízení s pevně umístěným fotovoltaickým panelem. Aby bylo možné přínos chytrého řešení vyhodnotit, musí být pomocí senzorů, jimiž je zařízení vybaveno, prováděno měření veškeré dodané a spotřebované energie. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.2.2, je zařízení vybaveno několika senzory poskytujícími data týkající velikosti napětí a proudu v důležitých uzlech obvodu, ze kterých je energetická bilance počítána.

Je důležité zmínit, že je řídicí elektronika připojena až za napájecí zdroj (viz obr. 8/s31). Nevyhodnocuje proto přímo množství energie vyrobené fotovoltaickým panelem, ale množství energie, která je dodána napěťovým regulátorem do akumulátoru. Výkonová ztráta na regulátoru a jeho aktivním chlazení tudíž není započítána do spotřebované energie. Vzhledem k tomu, že je napěťový regulátor pevně umístěného panelu stejný jako regulátor chytrého zdroje, je možné vzniklou ztrátu na obou obvodech zanedbat. Do měření množství spotřebované energie je zahrnuta vlastní spotřeba obvodu řídicí elektroniky a množství energie vynaložené na nastavování polohy panelu. Je-li však ke svorkovnicím na plošném spoji řídicí elektroniky přímo připojen spotřebič, je i jeho odběr zahrnutý do celkového objemu spotřebované energie.

Programový kód zajišťující vyčítání měřených hodnot ze senzorů a výpočet energetické bilance je obsažený ve funkci *runMeasurement()*, která je volána pravidelně každých 250 ms. Během jejího vykonávání jsou jako první volány obslužné funkce zajišťující vyčítání dat z jednotlivých senzorů a jejich uložení do pomocných proměnných. Následuje proces validace naměřených dat, kde je kontrolováno, jestli nedošlo k vyčtení nesprávné měřené hodnoty. Pokud je při validaci zjištěno vyčtení zcela špatné hodnoty, algoritmus provede novou kalibraci a konfiguraci příslušného senzoru.

V dalším kroku této funkce je třeba vyhodnotit a případně upravit velikost naměřeného odebíraného proudu. Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.2.2, řídicí elektronika disponuje dvojicí senzorů, které dokážou měřit odebíraný proud. Každý z nich má ale jiný měřicí rozsah a účel využití. Zatímco první z nich má velký měřicí rozsah a měří celkovou hodnotu odebíraného proudu, druhý má měřicí rozsah malý a slouží pro mě-

ření proudu, který je odebírán 5V napěťovým regulátorem. Přestože je pro měření odebíraného proudu primárně určený senzor s velkým rozsahem, nemusí být jím naměřená hodnota vždy použita jako výsledný údaj odebíraného proudu. Může se totiž stát, že bude hodnota naměřená tímto senzorem vlivem velkého rozsahu menší, než je skutečná hodnota odebíraného proudu. V takovém případě bude vždy hodnota naměřená senzorem s malým rozsahem přesnější. Z tohoto důvodu jsou výstupní hodnoty obou senzorů porovnávány a za výslednou hodnotu odebíraného proudu je považována vždy vyšší z nich.

Jelikož jsou všechny potřebné hodnoty v tuto chvíli vykonávání kódu již připraveny, je možné provést výpočty pro stanovení energetické bilance za posledních 250 ms. Údaje o množství doposud vyrobené a spotřebované energie jsou uchovávány v globálních proměnných, jejichž hodnoty jsou s každým voláním funkce *runMeasurement()* inkrementovány o výsledky právě provedených měření. Množství vyrobené a spotřebované energie od posledního měření je vypočítáváno ve watthodinách podle následujícího vzorce:

$$\text{Energie} = \frac{\text{napětí} \times \text{proud}}{\text{počet měření provedených za hodinu}}$$

Díky tomuto cyklickému vykonávání měření má zařízení v každém okamžiku informaci o aktuálním množství odebrané a dodané energie. Tyto uložené hodnoty jsou využité v další části kódu, která se stará o jejich výpis prostřednictvím sériové linky. Další zpracování a vizualizace dat je zajištěna na straně příjemce dat pomocí webového rozhraní.

**Nulování naměřených hodnot:** Aby bylo dosaženo větší přehlednosti v naměřených datech, dochází na konci každého dne k vynulování doposud naměřených hodnot energetické bilance. Měření a výpočet hodnot tudíž probíhá v každém dni znovu od nuly. Pokyn pro vynulování naměřených hodnot a zahájení nového měření je vydán na základě vyhodnocení změny aktuálního data z údajů z hodin reálného času.

## 6.5. Sestavení a odeslání naměřených dat

Při užívání chytrého zdroje je také počítáno s potřebou sbírat data o jeho provozu, díky čemuž je možné vzdáleně sledovat a vyhodnocovat jeho činnost. Chytrý zdroj proto v pravidelných intervalech odesílá naměřená data prostřednictvím sériové linky tak, aby je bylo možné dále využít. Jako uzel zajišťující sběr naměřených dat slouží jednotka Arduino MEGA2560, která je doplněna o modul spravující jednoduchý webový server. Další informace o tomto zařízení je možné nalézt v kapitole 5.5.

Data jsou odesílána každou sekundu prostřednictvím obvodu MAX232 ve formě znakového řetězce. O jeho sestavení se stará funkce *outputString()*, která vhodným způsobem postupně vypisuje všechny důležité informace na sériovou linku. Začátek a konec každého řetězce je značen vykřičníkem, jednotlivé údaje jsou pak z důvodu snadnějšího následného zpracování odděleny pomocí středníků. Každý výstupní řetězec (viz obr. 14/s66) obsahuje v přesném pořadí tyto údaje: datum, čas, čas provedení další kontroly polohy panelu, napětí akumulátoru, dobíjecí proud, odebíraný proud, spotřebovanou energii, vyrobenou energii a teplotu.

```
!23:8:15;8:51:12;8:57; 13173; 582; 54;0.145973;1.199840;19.1!
```

**Obrázek 14.:** Formát výstupního řetězce odesílaného na sériovou linku.

## 7. Testování realizovaného řešení

Praktickým zkušebním provozem chytrého zdroje i panelu s pevně nastavenou polohou bylo získáno několik souborů naměřených dat. S pomocí těchto údajů bylo možné ověřovat a ladit činnost zařízení, ale také pozorovat některé jevy, mající vliv na množství vyrobené energie. Před zpracováním je nutné tato data vyčistit ze souborů na paměťových kartách a pomocí vhodných nástrojů je zpracovat do požadované podoby. Aby bylo možné posoudit přínos chytrého zdroje co nejobjektivněji, bylo by nutné pozorovat jej v chodu spolu s pevně umístěným panelem po dlouhou dobu a za různých okolních podmínek. Takové pozorování je však časově náročné a vyžaduje odladění zařízení ve finální podobě. Z několika získaných a zpracovaných souborů dat je ale přesto činnost chytrého zdroje patrná.

### 7.1. Metodologie testování

Každý z testů byl proveden v rámci jednoho dne. Na začátku testování byla obě zařízení zapojena a vhodně orientována ve venkovním prostředí. Aby byl zajištěn konstantní odběr energie, byla k akumulátorům obou zařízení připojena identická zátěž. Tím bylo simulováno využití zařízení v reálném provozu. Provedená měření proto zachycují rozdíly v množství vyrobené energie mezi oběma zařízeními. A to především v závislosti na jejich umístění a množství záření, které na oba fotovoltaické panely dopadá. Některá měření proto probíhala za slunečného dne, některá pak v závislosti na okolních podmínkách i při vysoké oblačnosti. Pro testování byly vybrány dvě lokality v Hradci Králové, jež se lišily především dobou, po kterou z nich bylo Slunce přímo viditelné. První testování probíhalo na místě s velmi dobrým výhledem na Slunce v celé dráze jeho pohybu. Díky tomu mohl být v průběhu celého dne panel chytrého zdroje nerušeně natáčen téměř v celém svém rozsahu, zatímco čelní strana pevně umístěného

panelu byla orientována, pod vhodným sklonem, přímo na jih. Druhá testovací lokalita pak byla vybrána za účelem porovnání přínosu chytrého zdroje v místě s neideální orientací vůči Slunci. Hlavní osa obou panelů byla orientována na jihovýchod, přičemž jejich výhled na pohyb Slunce byl omezený především okolní zástavbou. Z tohoto důvodu bylo přímé sluneční záření na oba panely dostupné pouze po omezenou část z celého dne.

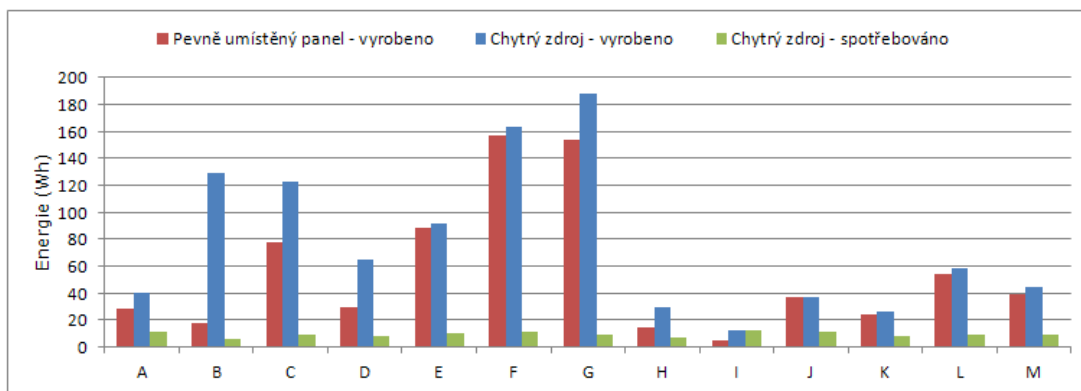
Činnost chytrého zdroje byla v průběhu každého měření pozorována a získané poznatky pro zlepšení byly implementovány do kódu řídicího algoritmu. Po ukončení testování byla obě zařízení ve večerních hodinách odpojena a bezpečně uložena. Naměřená data byla vždy po provedení několika měření vyčtena a vyhodnocena.

Množství energie, které obě sestavená zařízení při měření v daných podmínkách vyrobila, je zanesené v grafu na obrázku 15/s69. Každé provedené měření je označeno velkým písmenem a náleží k němu vždy trojice sloupců. Každý sloupec představuje určité množství energie. Červeným sloupcem je reprezentováno množství energie vyrobené pevně umístěným panelem, zatímco energie vyrobená chytrým zdrojem, je zanesena do grafu sloupcem modrým. Zelený sloupec pak vyjadřuje množství energie, které bylo chytrým zdrojem spotřebováno.

Konkrétní hodnoty výsledků měření, které jsou zaneseny v tomto grafu, jsou pak uvedeny v tabulce 3/s70. V posledních dvou sloupcích tabulky jsou pak porovnány a vyhodnoceny výsledky měření. V nich je uvedena míra přínosu chytrého řešení oproti fixně nastavenému panelu. Sloupec „zisk“ udává hrubý procentuální nárůst množství vyrobené energie při použití chytrého zdroje. Sloupec „balance“ pak do celkového výpočtu zohledňuje i vlastní spotřebu sestaveného zařízení, kterou není možné zanedbat. Hodnoty v posledním sloupci tedy udávají, o kolik procent energie více, či méně, vyrobil chytrý zdroj, při porovnání s energií vyrobenou stacionárně umístěným panelem.

## 7.2. Výsledky testů

Jak již bylo v předchozí části zmíněno, probíhala testovací měření ve dvou lokalitách. Měření A–G byla provedena v místě s optimálním výhledem, měření H–M pak v místě s omezeným výhledem na Slunce. Z grafu je patrné, že bylo v první lokalitě dosahováno mnohem vyššího celkového objemu dobité energie než v lokalitě druhé. A to jak na straně chytrého zdroje, tak i panelu s pevným umístěním. Bylo to dáno jak



**Obrázek 15.:** Porovnání energetické bilance při jednotlivých měřeních.

vhodnými atmosférickými podmínkami, které v daných chvílích panovaly, tak i optimální polohou obou zařízení vůči Slunci. Z naměřených hodnot také vyplývá, že varianta s pohyblivě umístěným panelem vykazuje vyšší množství vyrobené energie než panel s pevnou polohou. Konkrétní rozdíly mezi nimi byly závislé především na stavu akumulátorů a množství dopadající energie v průběhu celého dne.

V následujících odstavcích budou popsána některá provedená měření. U každého měření bude popsán jeho výsledek a okolní podmínky. Naměřené hodnoty z ostatních měření a jejich průběhy, lze nalézt na paměťovém médiu, které je přílohou této práce.

**Měření B:** Na tomto příkladu měření je patrný obrovský rozdíl v množství energie, jež jednotlivá zařízení vyrobila. To bylo způsobeno tím, že po značnou část měření nebyla správně připojena zátěž k akumulátoru stacionárního zdroje. Tím pádem dosáhlo napětí akumulátoru brzy maximální nastavené hodnoty a proto klesl nabíjecí proud. Průběh napětí a proudu stacionárního zdroje během tohoto měření je vidět na obrázku 9/s46. Toto měření tedy nemá příliš velkou vypovídající hodnotu pro porovnání výkonnosti jednotlivých zařízení. Poskytuje však cennou informaci o tom, jakým způsobem může stav nabití akumulátoru ovlivňovat množství vyrobené energie.

**Měření C:** Tímto měřením je demonstrována činnost chytrého zdroje v ideálních podmínkách jeho provozu. Časové průběhy napětí a proudu obou zařízení v průběhu dne jsou zachyceny v grafech na obrázcích 16/s71 a 17/s71. Výhoda chytrého zdroje je patrná při porovnání obou průběhů v ranních hodinách. Na obrázku 16/s71 je zřejmý strmý

		Stacionární typ	Chytrý zdroj			
Měření	Datum	Výroba <sup>1</sup>	Výroba <sup>1</sup>	Spotřeba <sup>1</sup>	Zisk (%)	Bilance (%)
A	20.8.	28,830	40,690	11,750	41,150	0,39
B	21.8.	17,920	129,530	6,220	622,640	587,93
C	22.8.	77,640	123,150	9,750	58,630	46,06
D	23.8.	30,100	64,890	8,150	115,550	88,5
E	28.8.	88,270	91,370	10,150	3,510	-7,99
F	29.8.	156,860	163,650	11,000	4,330	-2,68
G	30.8.	154,280	188,130	9,730	21,940	15,64
H	5.9.	14,970	29,970	7,000	100,180	53,4
I	6.9.	4,900	12,580	12,500	156,670	-98,23
J	13.9.	36,760	37,030	11,740	0,730	-31,2
K	20.9.	24,520	26,819	7,690	9,389	-21,98
L	27.9.	54,350	58,440	9,070	7,530	-9,16
M	28.9.	38,740	44,720	9,560	15,430	-9,25

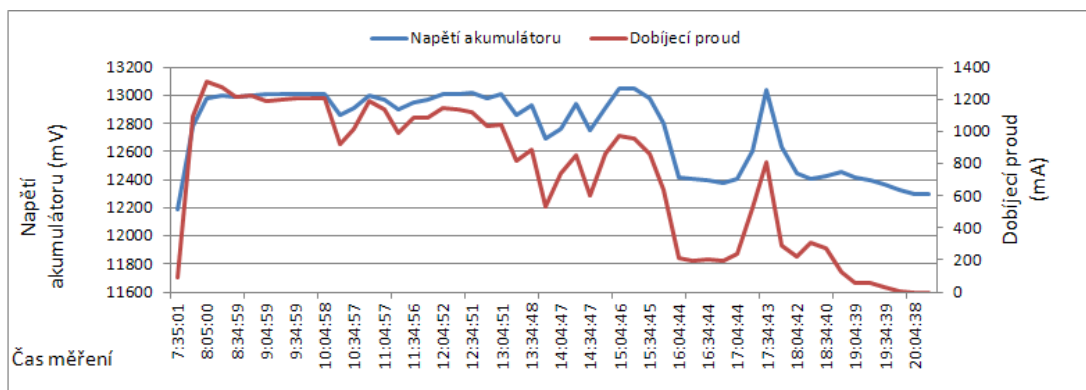
<sup>1</sup> Hodnoty popisující množství vyrobené a spotřebované energie jsou udávány ve watt–hodinách.

**Tabulka 3.:** Tabulka hodnot naměřených během testování chytrého zdroje.

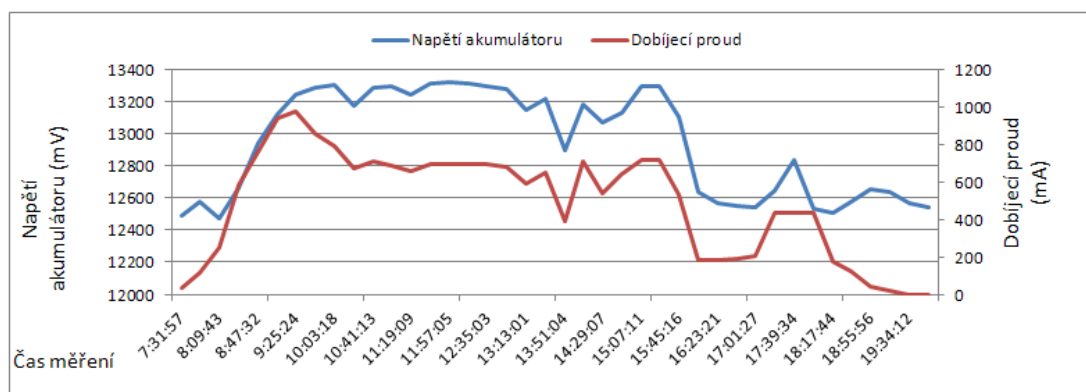
nárůst hodnoty dobíjecího proudu po zahájení měření. Ten byl způsoben právě ideálním natočením fotovoltaického panelu, který byl ve výchozí poloze orientován na východ. Průběh hodnot dobíjecího proudu v dalších hodinách pak svědčí o trvale ideálním natočení panelu. K drobným výkyvům v těchto hodnotách, které jsou v grafu zřejmé, docházelo vlivem přítomné oblačnosti.

U pevně umístěného panelu je nárůst dobíjecího proudu pozvolnější. Z hodnoty svého maxima následně klesá v průběhu měření níže a nabývá v čase poměrně konstantní hodnoty. Nižší hodnota dobíjecího proudu, oproti chytrému zdroji, je dána pevně nastaveným sklonem a orientací panelu, která není vůči Slunci ideální. Mezi 16. a 17. hodinou je v grafech možné pozorovat pokles množství dopadajícího záření, který způsobila zvýšená oblačnost. Jakmile došlo kolem 17.15 k jejímu rozptýlení, hodnoty dobíjecího proudu opět na krátkou dobu vzrostly. V podvečer pak se západem slunce velikost dobíjecího proudu klesla až na nulu.





Obrázek 16.: Měření C: Průběh napětí a proudu chytrého zdroje.



Obrázek 17.: Měření C: Průběh napětí a proudu panelu s pevnou polohou.

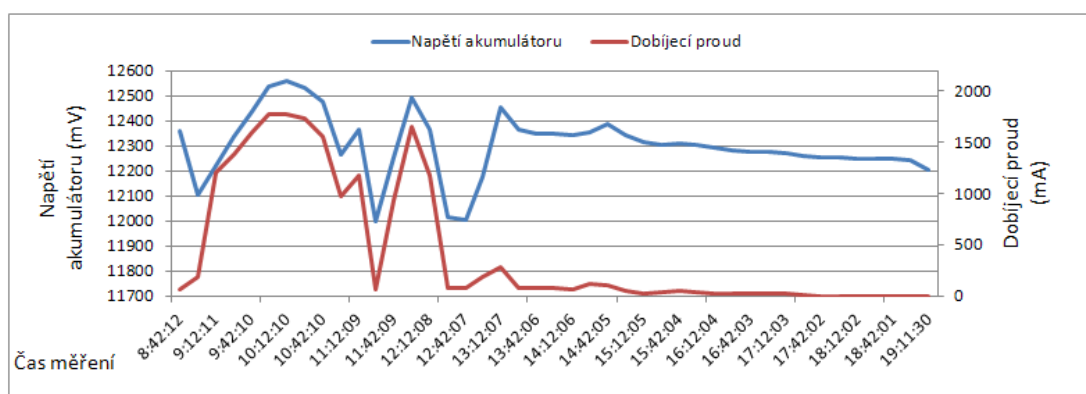
**Měření L:** Použití chytrého zdroje v místě s omezeným výhledem na pohyb Slunce je reprezentováno tímto měřením. Panely obou zařízení byly v této lokalitě natočeny jiho-východním směrem, přičemž okolní zástavba tvořila v určitých částech dne překážku slunečnímu záření. Z naměřených průběhů na obrázcích 18/s72 a 19/s72 je možné vyvodit dva závěry.

V první řadě byl za těchto podmínek zjištěn velmi malý přínos chytrého zdroje při porovnání s energií vyrobenou panelem s pevným nastavením polohy. Z grafu je také patrný zřetelně prudší nárůst dobíjecího proudu chytrého zdroje v ranních hodinách. Ten je dán především díky optimální poloze panelu, který byl v té chvíli nastaven ve výchozí poloze.

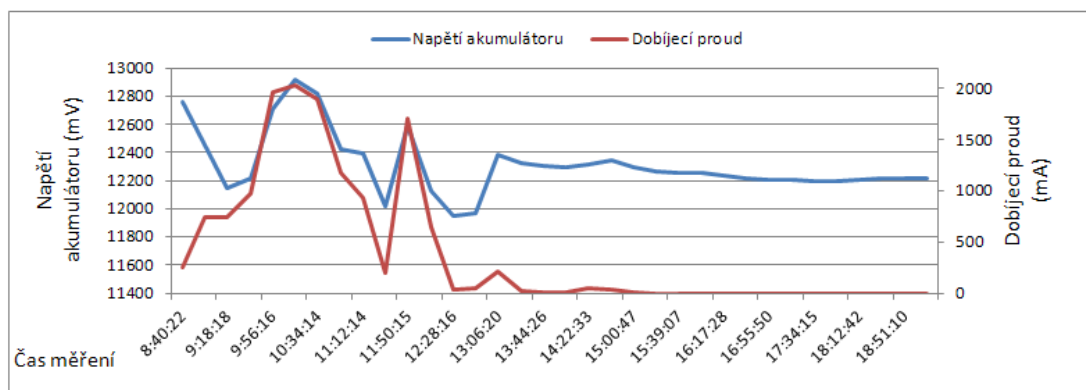
Druhým poznatkem, který z měření vyplývá, je nevypočitatelnost počasí. V první části měření, zhruba do 12.15 hodin, se přes krátký pokles pohybovaly hodnoty vyrábě-

ného proudu poměrně vysoko. Jeho špičkově až 2A hodnoty svědčily o velmi dobrých atmosférických podmínkách, které v dané části dne panovaly. Podíváme-li se ale na průběh proudu dále, je zřejmé, že po poledni došlo ke značnému zvýšení oblačnosti, a tím pádem i ke snížení dobíjecího proudu. Pokud by nedošlo ke zhoršení počasí, množství vyráběné energie by kleslo pravděpodobně až po 14. hodině. V tento čas totiž v dané lokalitě Slunce přechází mimo pozorovatelnou část oblohy a na výrobě elektrické energie se z větší části podílí už jen dopadající difúzní záření.

Pro přehlednost je také nutné zmínit, že pozorovatelný nárůst napětí akumulátoru, k němuž došlo přibližně ve 13 hodin, byl způsobený odpojením spotřebičů od akumulátorů obou zařízení.



**Obrázek 18.:** Měření L: Průběh napětí a proudu chytrého zdroje.



**Obrázek 19.:** Měření L: Průběh napětí a proudu panelu s pevnou polohou.

### 7.3. Shrnutí výsledků testů

S pomocí výsledků provedených měření lze vyvodit několik závěrů. Především je zřejmé, že při použití chytrého zdroje dochází téměř vždy k nárůstu množství vyrobené energie, v porovnání s pevně umístěným fotovoltaickým panelem. Nicméně tento nárůst není vždy dostatečně velký na to, aby pokryl energii vynaloženou na samotný provoz zařízení.

Z principu funkce chytrého zdroje a z provedených měření také vyplývá, že pohyblivě umístěný panel přináší nejvyšší zisk v ranních a odpoledních hodinách. Uprostřed dne se množství vyráběné energie oproti pevně umístěnému panelu příliš neliší. Jak se ale ukázalo při některých měřeních, výhody chytrého zdroje se nemusí vlivem stavu atmosféry vůbec projevit. Pokud je v ranních hodinách oblačnost vysoká a množství dopadajícího záření roste až v polovině dne, vyrobí oba panely přibližně stejné množství energie. Podobný vliv na množství vyrobené energie má také neideální umístění panelů v místě s omezeným množstvím dopadajícího záření. Díky tomu také nebyl v některých měřeních mezi oběma zařízeními výsledný rozdíl příliš velký.

Využití chytrého zdroje ve stávající konfiguraci má proto smysl pouze v některých případech. Především musí být ke zdroji připojen akumulátor s vhodnou kapacitou. Ta by měla být zvolena tak, aby mohla být zátěž napájena dostatečně dlouho i při nedostatku slunečního záření. Samozřejmě musí být vybraná kapacita dostatečně vysoká i na to, aby nedocházelo k hlubokému vybíjení akumulátoru, které by zkracovalo jeho životnost. Díky velké kapacitě pak lze do takového akumulátoru dodávat vyrobenou energii po dostatečně dlouhou dobu, čímž je zaručeno velké využití energie dopadajícího záření. Jak bylo vidět na příkladě měření B, nedostatečně zatížený akumulátor s malou kapacitou je rychle nabit a další energii již nepojme.

Aby se výhody chytrého zdroje projevily nejlépe, musí být umístěn především na místě s optimálním výhledem na Slunce. To musí samozřejmě platit pro co největší část dne. Jen v takovém případě dojde, za optimálních atmosférických podmínek, ke zvýšení objemu vyrobené energie v ranních a odpoledních hodinách. Problém ale nastává, je-li chytrý zdroj umístěný neideálně. Například takovým způsobem, že má limitovaný výhled na Slunce, a sleduje proto jeho pohyb pouze po omezený čas. V takovém případě je intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na panel nedostatečná. Množství vy-

robené energie tak může být převážnou část dne závislé pouze na intenzitě přítomného difúzního záření.

Samozřejmě není možné zapomenout na obrovský vliv stavu atmosféry na množství vyrobené energie. Především přítomnost oblačnosti značně ovlivňovala výsledky měření. Použití chytrého zdroje by proto mělo být přínosné především tam, kde je možné očekávat optimální podmínky pro jeho provoz. To znamená dostatečné množství dopadajícího záření a příznivé atmosférické podmínky. V opačném případě není jeho použití příliš výhodné.

## 8. Diskuze výsledků realizovaného řešení

Na základě poznatků získaných v teoretické části této práce byl navržen chytrý zdroj elektrické energie. Jeho činnost spočívá v natáčení fotovoltaického panelu za Sluncem a v měření množství odebrané a vyrobené energie. Toto zařízení se skládá z několika hlavních součástí, mezi které patří především jeho mechanická konstrukce, řídicí elektronika a řídicí algoritmus mikrokontroléru. Řídicí elektronika chytrého zdroje je svými parametry dimenzována přesně na konkrétní použití. Dokáže tedy vyhodnocovat energii dodávanou monokrystalickým fotovoltaickým panelem o výkonu 40 Wp a ovládat motory zajišťující jeho nastavování. Tudíž je-li ke zdroji připojen nějaký spotřebič, je nutné zvážit jeho příkon vzhledem k parametrům sestaveného zařízení. Mechanická konstrukce je nicméně dostatečně robustní na to, aby na ni bylo možné připevnit i fotovoltaický panel větších rozměrů. Nemělo by tedy být automaticky nutné zasahovat do komponent mechanické konstrukce, bude-li v budoucnu potřeba plochu panelu zvětšit.

Také navržený webový server plní funkci zobrazování a ukládání naměřených dat se v praktickém použití osvědčil. Bylo díky němu možné sledovat činnost celého zařízení v průběhu měření. Komponenty webového rozhraní však disponují pouze omezenými prostředky. Není proto příliš vhodné, aby k němu bylo zároveň připojeno více klientů, nebo aby bylo zobrazení stránky často obnovováno.

Pro zjištění přínosu, který praktické nasazení chytrého zdroje přináší, byla sestavena také jednotka pro vyhodnocování činnosti stacionárně umístěného panelu. Jejím úkolem je po celou dobu provozu zařízení měřit a ukládat informace o množství dodávané energie. Sestavené zařízení je, včetně veškerých jeho součástí, v současné podobě odzkoušené a prošlo sérií několika testovacích měření. Jeho konstrukce je dostatečně robustní a řídicí elektronika je chráněná na to, aby bylo možné jej používat v reálném prostředí. Je ale třeba stále pamatovat, že zařízení plní pouze úlohu modelu, který slouží především pro ověření své funkcionality, nežli výrobku pro praktické využití.

---

Praktické testy potvrdily očekávaný přínos při použití chytrého zdroje za ideálních atmosférických podmínek. Nárůst objemu vyrobené energie oproti staticky umístěnému panelu byl velmi dobře pozorovatelný. V neoptimálních podmínkách byl však přínos chytrého zdroje malý. V některých případech nestačil ani na pokrytí vlastní spotřeby chytrého zdroje.

Navržený chytrý zdroj má ale také některé nedostatky, které by bylo dobré v přírodném dalším navázání na tuto práci vylepšit. Především se během testování zařízení v reálném dlouhodobém provozu projeví problémy se sporadickým zastavením vykonávání řídicího programu. Analýzou problému bylo zjištěno, že k zastavení dochází při komunikaci s některou z periférií na sběrnici SPI. Příčinou takového chování může být například nestabilita některé z použitých součástek či přechodový odpor na univerzální desce plošného spoje. K častějšímu výskytu tohoto jevu může také přispívat teplota v krabici s řídicí elektronikou. Aby tato zastavení programu nezpůsobovala přílišné problémy při činnosti chytrého zdroje, je v mikrokontroléru nastavena aktivní kontrola vykonávání programu. V případě zastavení proto dojde k restartu vykonávání řídicího algoritmu chytrého zdroje. Při resetu mikrokontroléru však dochází ke ztrátě informací ve vnitřních proměnných, například o množství vyrobené a spotřebované energie. Bylo proto nutné v kódu webového serveru doplnit vhodnou funkci, která tento problém vyřeší. Ta zajišťuje vyhodnocování příchozích údajů od chytrého zdroje, přičemž po jeho resetu na základě dříve přijatých hodnot sestavuje výsledné hodnoty energetické bilance pro daný den. Pro pozdější zpracování jsou tyto hodnoty ukládány na paměťovou kartu jak v surové podobě, v níž jsou odeslána chytrým zdrojem, tak i v podobě upravené webovým serverem. Díky tomu je možné zobrazovat na webovém rozhraní údaj o celkovém množství odebrané a dodané energie. Aby se předešlo těmto obtížím v budoucnu, bylo by dobré doplnit řídicí elektroniku o paměť, do níž by bylo možné průběžně ukládat hodnoty potřebných proměnných programu. Paměťová karta by tedy mohla být přemístěna z webového rozhraní a integrována do chytrého zdroje. Pro řídicí elektroniku by také bylo vhodné sestavit jednoúčelovou desku plošného spoje.

V průběhu testování nastaly také problémy s použitým obvodem reálného času, který se nachází na spodní desce plošné spoje. Byl proto nahrazen celým externím modulem s obvodem DS1307, jenž je připojen na místo původního obvodu.

Během testování byla také zjištěna vůle v úhlové převodovce azimutálního natáčení. Ta se projeví v okamžiku, kdy se z nějakého důvodu mění směr azimutálního otáčení. A to takovým způsobem, že po přepnutí směru otáčení z jedné strany na druhou panel po dobu vymezení vůle stojí a nehýbe se. Jakmile se vůle vymezí, pohyb panelu daným směrem pokračuje dál bez omezení. To má za následek částečně vyšší energetické nároky na pohyb panelu v okamžiku, když dochází ke změnám ve směru jeho otáčení. V praxi se však vlivem pohybu Slunce panel natáčí po celý den převážně pouze jedním směrem. A vůle se tak projeví teprve až v okamžiku dojezdu panelu zpět do jeho výchozí polohy.

## 8.1. Možnosti pro další rozšíření

Jelikož se jedná o poměrně komplexní zařízení, našlo by se hned několik možností jeho budoucího vylepšení. Chytrý zdroj například nedokáže přesně určit, jaká poloha panelu je aktuálně nastavena. Jedinou výjimkou je okamžik sepnutí některého z koncových snímačů, z něhož je možné nastavenou polohu částečně odvodit. Bylo by proto dobré zařízení doplnit například o impulzní kolo se senzorem pro rozpoznání nastaveného azimutu. Poté by bylo možné řídicí algoritmus doplnit ještě o možnost nastavování panelu podle předem definované mapy slunečního pohybu.

V současné konfiguraci chytrý zdroj využívá sériovou linku pouze pro odesílání naměřených dat. Bylo by jí proto možné využít také pro příjem povelů, za účelem nastavování některých řídicích parametrů za běhu systému. Nebylo by tudíž nutné nahrávat s každou změnou parametrů nový program do mikrokontroléru. Ve zdrojovém kódu řídicího algoritmu jsou funkce pro příjem a vyhodnocení povelů po sériové lince pouze naznačené a potřebují další doplnění a odladění.

Bylo by také možné provést několik kroků pro zvýšení výkonu a energetické účinnosti chytrého zdroje. Dodávaný výkon lze zvýšit nahrazením fotovoltaického panelu za jiný s vyšším výkonem. K dalšímu zvýšení množství vyrobené energie by také mohlo přispět nahrazení napěťového regulátoru pro dobíjení akumulátoru jiným řešením. K tomu lze použít například integrované obvody BQ2031 a BQ24650. Případná optimalizace v zapojení, včetně nahrazení použitých součástek jejich alternativami s nižším odběrem, by pak mohla vést ke snížení celkové klidové spotřeby zařízení.

## 9. Závěr

Tato práce se zabývala návrhem a realizací chytrého fotovoltaického zdroje energie, který je řízen mikrokontrolérem. Činnost chytrého zdroje spočívá v aktivním natáčení fotovoltaického panelu směrem ke Slunci a výpočtu množství dodané a spotřebované energie. Podnětem pro návrh tohoto zařízení byla především snaha sestavit autonomní zdroj elektrické energie, který prověří možné přínosy chytrého řešení pro použití v praxi.

Po osvětlení problematiky výroby energie přímou přeměnou slunečního záření a představení principu činnosti chytrého zdroje byly v jednotlivých kapitolách této práce popsány důležité součásti navrženého zařízení. Aby mohl chytrý zdroj vzniknout, bylo nejprve nutné navrhnout a sestavit jeho mechanickou konstrukci, řídicí elektroniku a naprogramovat vhodný algoritmus, který jej bude řídit. Činnost takto navrženého zařízení byla v této práci vysvětlena skrze popis některých důležitých částí jeho řídicího programu.

Výsledkem této práce je pak autonomní zařízení, doplněné o zobrazovací webové rozhraní zajišťující zpracování a ukládání dat. Sestavené zařízení je zajímavé především tím, že kromě aktivního natáčení fotovoltaického panelu za Sluncem dokáže také měřit energetickou bilanci, do níž je možné zahrnout i k němu připojené spotřebiče.

Činnost tohoto celku byla ověřena na základě série provedených testovacích měření. Při nich byla činnost chytrého zdroje porovnávána s pevně umístěným fotovoltaickým panelem, který byl také opatřen řídicí elektronikou. U každého z dvojice zařízení bylo prováděno měření množství vyrobené elektrické energie, u chytrého zdroje pak i množství spotřebované energie. Provedená měření potvrdila předpoklad, že za ideálních podmínek vyrobí chytrý zdroj více energie než pevně umístěný panel. Při neideálních podmínkách není rozdíl v množství vyrobené energie mezi oběma zařízeními příliš velký, vyrobí totiž zhruba stejné množství energie. Nicméně, s ohledem na nezanedba-



---

telnou vlastní spotřebu zařízení, je třeba chytrý zdroj využívat především tam, kde lze očekávat vhodné podmínky pro jeho provoz.

Jelikož byl chytrý zdroj sestavený jako testovací zařízení s pouze 40Wp fotovoltaickým panelem, nedisponuje příliš velkým výkonem. Přesto ale může v dané konfiguraci sloužit jako prototyp pro další výzkum v oblasti výroby elektrické energie ze slunečního záření. Lze z něho vycházet například při budoucí realizaci chytrého zdroje konstruovaného pro již konkrétní záměr. Například v rámci některé ze součástí chytré domácnosti. Konstrukce takového konkrétního zdroje by pak měla být pro daný účel vhodně dimenzována, a to především s ohledem na výkon a velikost použitého fotovoltaického panelu. Také jeho řídicí elektronika a napájecí zdroj by v takovém případě měly být vhodně upraveny a přepracovány.

## Seznam použité literatury

- [1] BUFKA, Aleš a Daniel ROSECKÝ. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2013: Výsledky statistického zjišťování*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2014, 73 s. Dostupný z WWW: <http://download.mpo.cz/get/51479/58547/616672/priloha001.pdf>
- [2] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: Ilsa, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [3] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektřina ze slunce*. 2. vyd. Praha: EkoWATT, 2008, vii, 81 s. 21. století. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [4] TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007, 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [5] WENHAM, S. *Applied photovoltaics*. 2nd ed. Sterling, VA: Earthscan, c2007, xii, 323 p. ISBN 978-184-4074-013.
- [6] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. 1. české vyd. Ostava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [7] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008, 362 s. ISBN 978-80-85970-64-7.
- [8] ALEXANDRU, C a C POZNA. *Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel*. Dostupný z: <http://pia.sagepub.com/content/224/6/797>. s. 797-811 [cit. 2015-08-21]. DOI: 10.1243/09576509jpe871.

- [9] SCHUTTEN SOLAR ENERGY CO., Ltd. *STM6-XXX/60 Series*. 2014, 2 s. Dostupný z: [http://files.i4wifi.cz/inc/\\_doc/attach/StoItem/4012/Schutten\\_250M\\_Datasheet.pdf](http://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/4012/Schutten_250M_Datasheet.pdf). [cit. 2015-08-21]
- [10] CENIA A MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Chlorofluorouhlovodíky (CFC)*. 4 s. Dostupné z: <http://www.irz.cz/repository/latky/chlorofluorouhlovodiky.pdf> [cit. 2015-08-21]
- [11] Czech RE Agency - Fotovoltaika pro každého. *Czech RE Agency - News* [online]. 2003-2009 [cit. 2015-08-21]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [12] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů*. 2012. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/assets/cz/2012/11/NAP.pdf>
- [13] HAWKING, Stephen. *A brief history of time*. Updated and expanded tenth anniversary ed. New York: Bantam Books, 1996. ISBN 978-055-3380-163.
- [14] HULD, Thomas a Ewan Dunlop *Optimal mounting strategy for single-axis tracking non-concentrating PV in Europe*. Document presented at the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC), Valencia, Spain
- [15] HOPPECKE BATTERIEN GMBH & CO. KG. *Installation, comissioning and operating instructions for vented stacionary lead-acid batteries*. Koerdt Promo4you, 2013. Dostupné z: [http://www.hoppecke.com/content/download/brochures/rp/TechnicalDocumentation/Montagehandbuch\\_geschl\\_en.pdf](http://www.hoppecke.com/content/download/brochures/rp/TechnicalDocumentation/Montagehandbuch_geschl_en.pdf)
- [16] LINDEN, David a Thomas B REDDY. *Handbook of batteries*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002, 1 v. (various pagings). ISBN 0071359788.
- [17] L298: *DUAL FULL-BRIDGE DRIVER*. STMicroelectronics, 2000, 13 s. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000240.pdf>

- [18] *Zero-Drift, Bi-Directional CURRENT/POWER MONITOR with I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> Interface*. Texas Instruments, 2011, 40 s. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>
- [19] *LM2596 SIMPLE SWITCHER<sup>®</sup> Power Converter 150kHz 3 A Step-Down Voltage Regulator*. Texas Instruments, 1999. Dostupné z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [20] Battery and Energy Technologies: Rechargeable Lithium Batteries. *Electropedia* [online]. Woodbank Communications, [2005] [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>

# A. Přílohy

## A.1. Pokyny k provozu

### A.1.1. Chytrý zdroj

**Ustavení zařízení:** Před použitím musí být chytrý zdroj ustaven tak, aby byla jeho podstava ve vodorovné pozici a panel ve své výchozí poloze směřoval k místu východu Slunce. V ideálním případě bude čelní strana zařízení v takové chvíli směřovat na jih. Za čelní stranu je považována ta strana podstavy, ze které je vyvedeno šikmé rameno s upevněním pro mechanismus azimutálního otáčení.

**Zapojení zařízení:** Zapojení jednotlivých komponent je realizováno pomocí různých konektorů, nemělo by tudíž dojít k problémům s jejich zapojením. Je pouze nutné dát pozor na zapojení výstupu z fotovoltaického panelu k napěťovému regulátoru. Panel musí být zapojen do regulátoru a teprve výstup z regulátoru je možné připojit do řídicí elektroniky chytrého zdroje. Pro zabezpečení správné funkce zařízení by měl být také akumulátor připojen dříve než fotovoltaický panel. Tím bude zabezpečen stabilní přístup energie pro napájení řídicí elektroniky. Je také nutné dát pozor na správnost připojení akumulátoru, protože zařízení není chráněno proti jeho přepólování.

### A.1.2. Webový server

**Spuštění:** Po připojení k napájení je možné webový server ihned používat za předpokladu, že je v zařízení vložena paměťová karta se zdrojovým kódem webové stránky. Adresa zařízení je standardně nastavena na 192.168.0.90 s maskou podsítě 255.255.255.0. Jakmile bude připojena sériová linka, začnou být data zpracovávána, ukládána na paměťovou kartu a zobrazována na webové stránce. Pokud je zapotřebí vynulovat aktuální

data obsahující údaje o energetické bilanci, stačí webový server restartovat odpojením jeho napájení.

**Nastavení adres:** V případě použití zařízení v jiné počítačové síti, musí být standardně nastavené hodnoty upraveny. K tomu je třeba nahrát do mikrokontroléru program s patřičně změněnými parametry v jeho kódu. Dále je nutné zvolenou adresu pozměnit i v kódu webové stránky, ve kterém jsou sestavovány dotazy odesílané na adresu webového serveru.

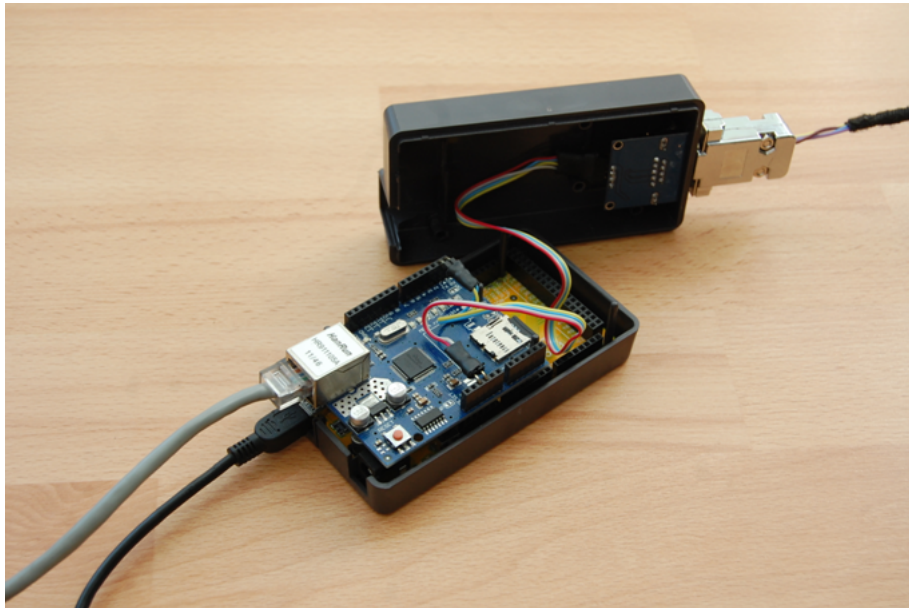
### **A.1.3. Elektronika pevně umístěného panelu**

**Zapojení zařízení:** Pro uvedení zařízení do provozu je třeba vložit paměťovou kartu a zapojit dvojici konektorů. Jako první by měl být připojen akumulátor, pak až fotovoltaický panel. Při odpojení zařízení je pak třeba odpojovat konektory v opačném pořadí. Ke kontrole stavu zařízení je pak určena indikační dioda na plošném spoji.

## **A.2. Obsah příloženého CD**

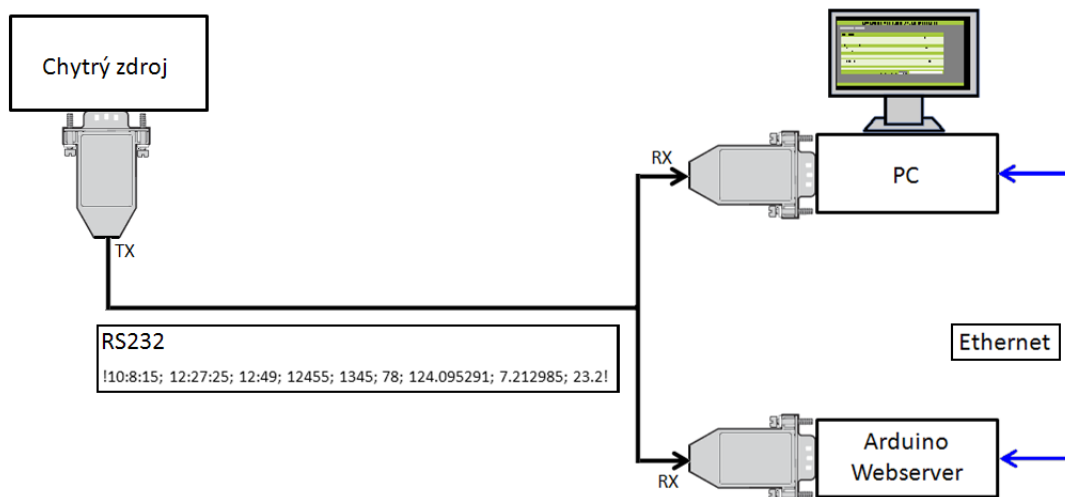
- Zdrojové kódy
  - Chytrý fotovoltaický zdroj
  - Řídící elektronika panelu s pevným umístěním
  - Webové rozhraní
- Naměřená data
- Elektronická schémata vytvořená v programu DipTrace
- Text práce ve formátu .pdf

### A.3. Hardware webového serveru



Obrázek 20.: Vnitřní uspořádání elektroniky webového serveru.

### A.4. Schéma vzájemného propojení



Obrázek 21.: Propojení a komunikační rozhraní komponent sestavy chytrého zdroje.

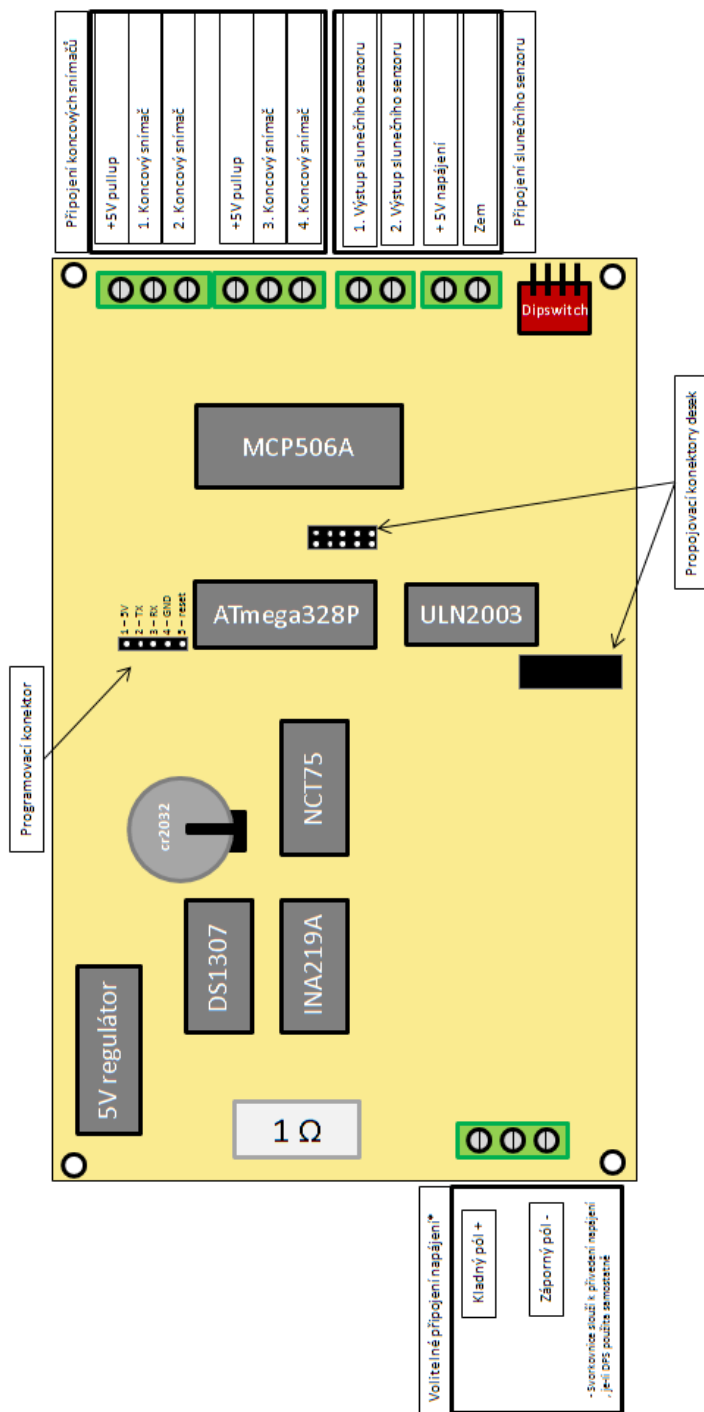
## A.5. Odhad nákladů

Typ zařízení	Elektronika	Mechanika	Ostatní
<b>Chytrý zdroj</b>	$\mu C$ ATmega 328P	Železné profily	Instalační krabice
	Desky plošných spojů	Spojovací materiál	Fotovoltaický panel
	Elektrické součástky	Motory	Patice a svorkovnice
	Napájecí zdroj	Převodovky	Akumulátor 44 Ah
	Vodiče		
Náklady	<b>850 Kč</b>	<b>2100 Kč</b>	<b>3000 Kč</b>
<b>Celkem</b>			<b>5950 Kč</b>
<b>Websvrver</b>	Arduino MEGA2560		Krabice
	Ethernet Shield W5100		SD karta
	Komunikační modul		
Náklady	<b>1060 Kč</b>		<b>400 Kč</b>
<b>Celkem</b>			<b>1460 Kč</b>
<b>Stacionární va- rianta</b>	$\mu C$ ATmega 328P		Instalační krabice
	Desky plošných spojů		Fotovoltaický panel
	Elektronické součástky		Akumulátor 44 Ah
	Napájecí zdroj		
	Rozšiřující moduly		
Náklady	<b>400 Kč</b>		<b>2800 Kč</b>
<b>Celkem</b>			<b>3200 Kč</b>

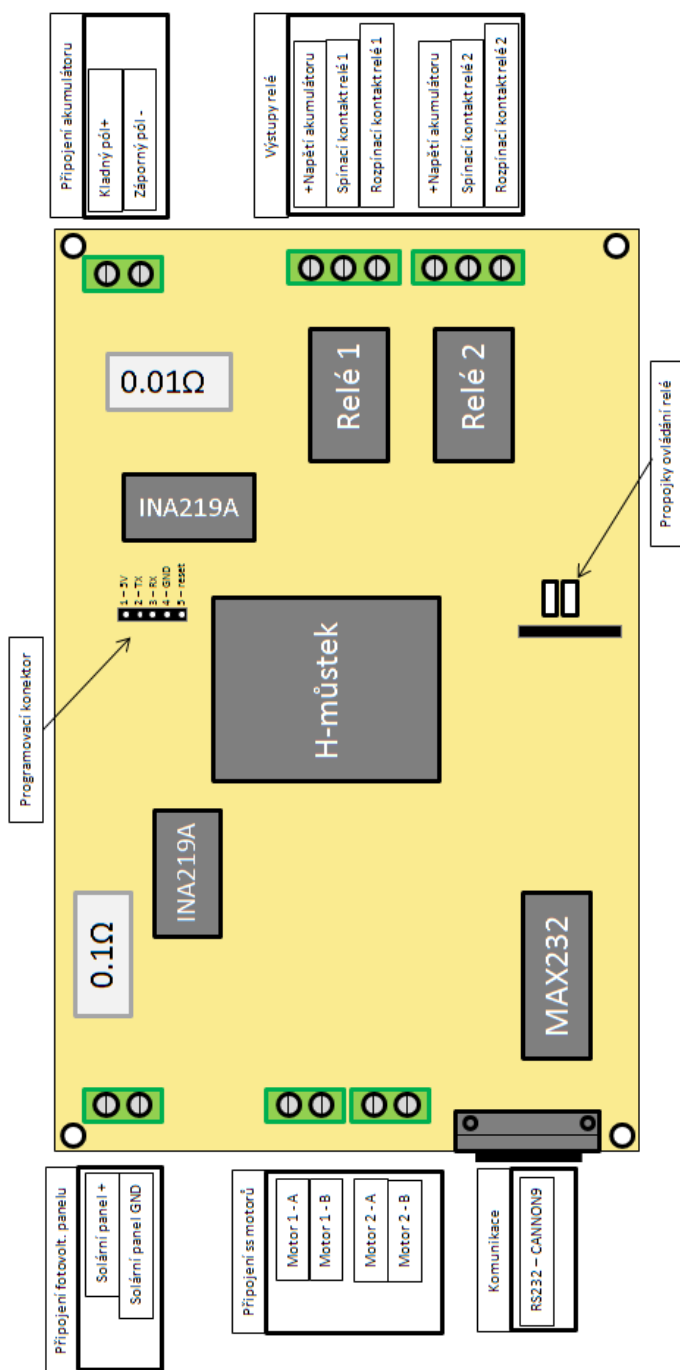
Tabulka 4.: Odhad vynaložených nákladů na konstrukci jednotlivých zařízení.



## A.6. Rozložení součástek řídicí elektroniky chytrého zdroje

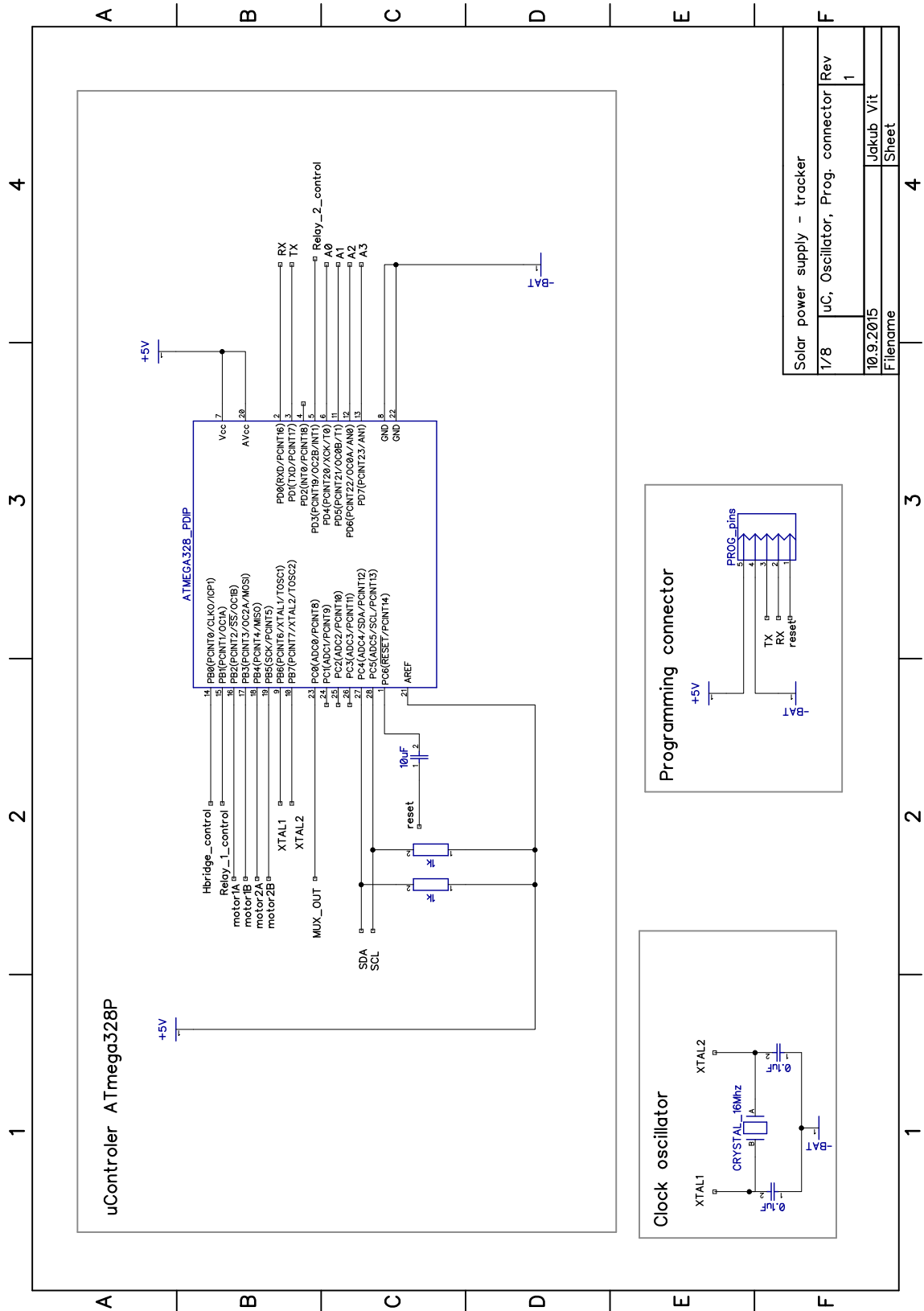


Obrázek 22.: Spodní DPS chytrého zdroje: Rozmístění součástek a popis svorkovnic.

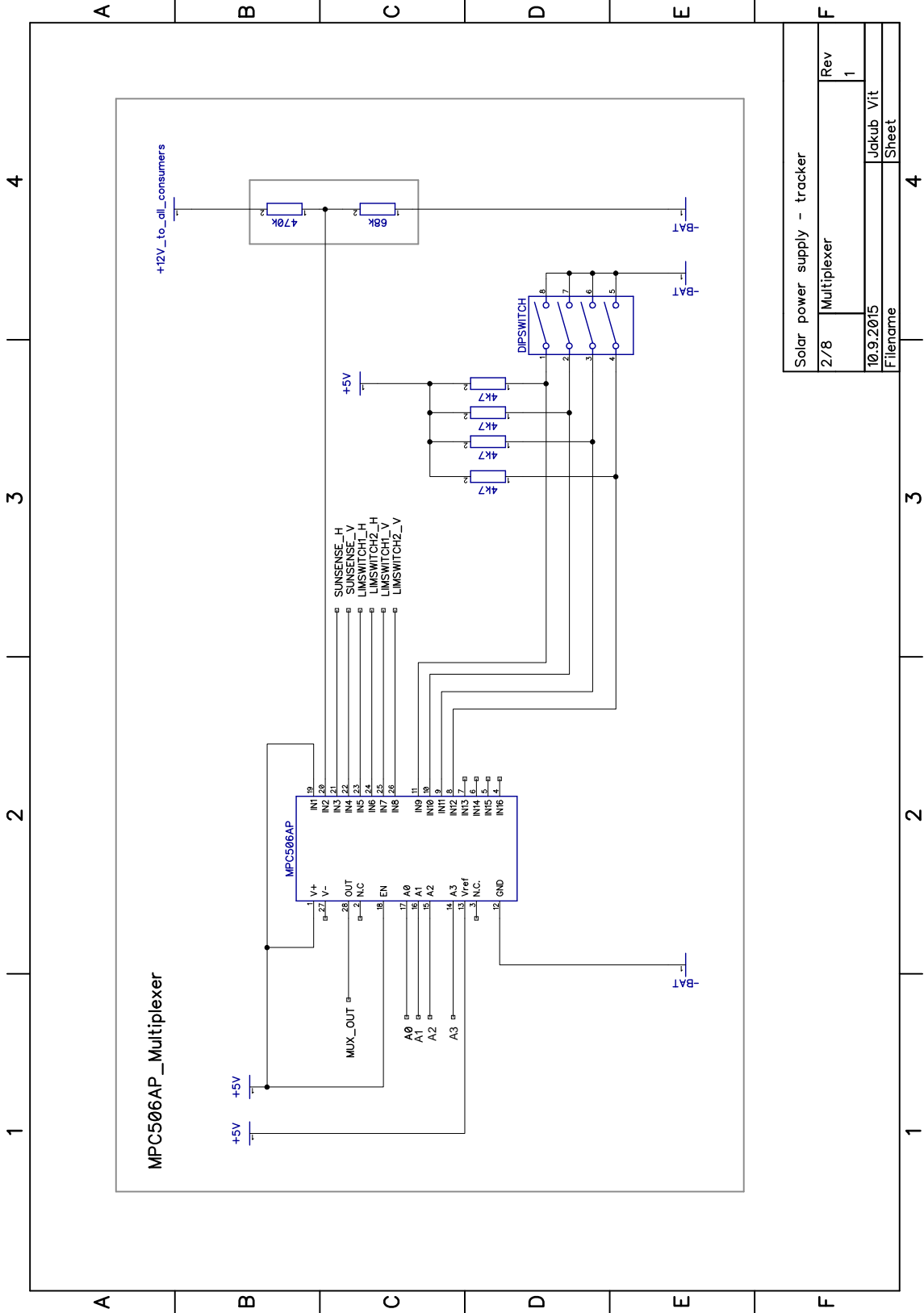


Obrázek 23.: Vrchní DPS chytrého zdroje: Rozmístění součástek a popis svorkovnic.

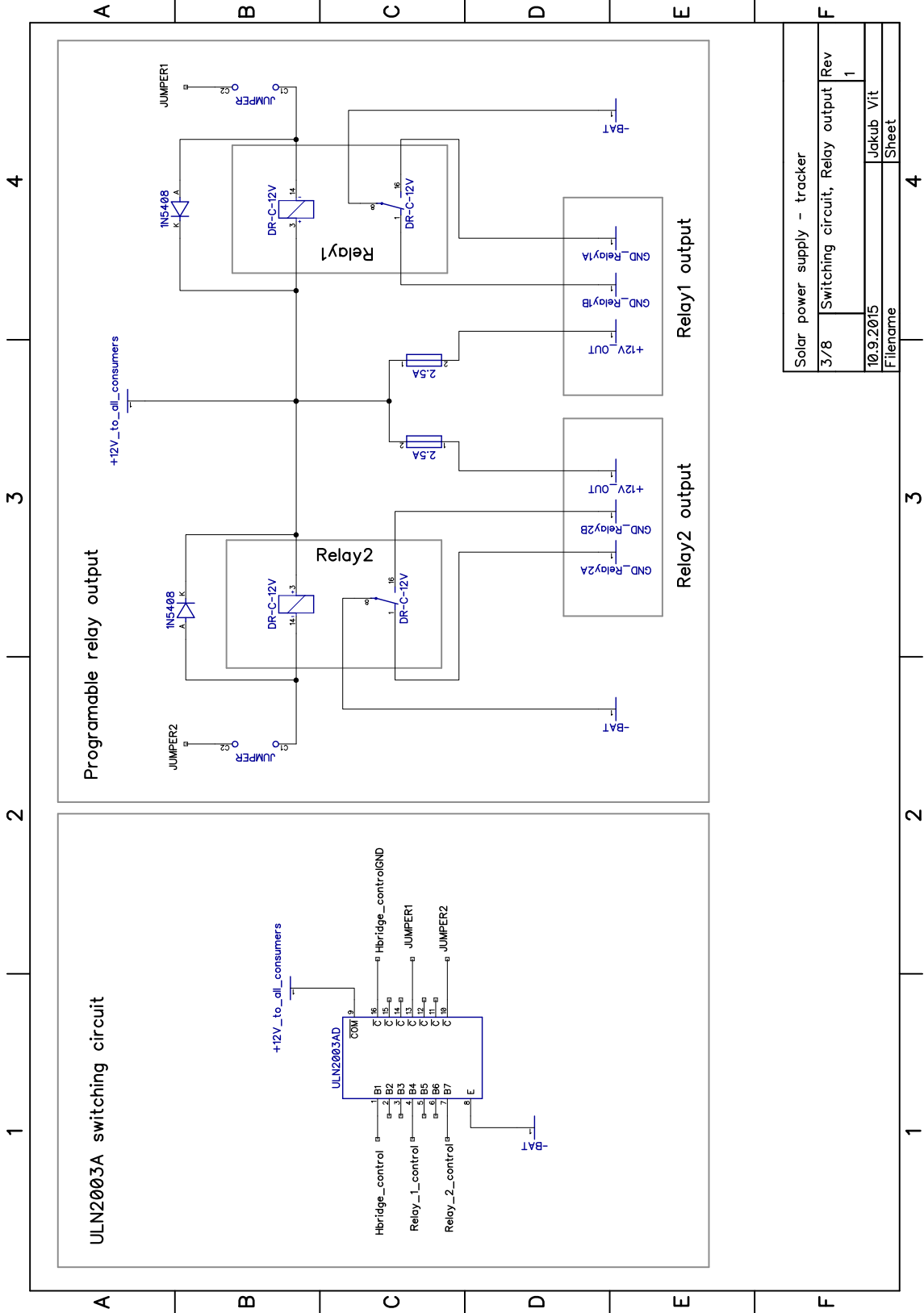
# A.7. Schémata zapojení elektroniky chytrého zdroje



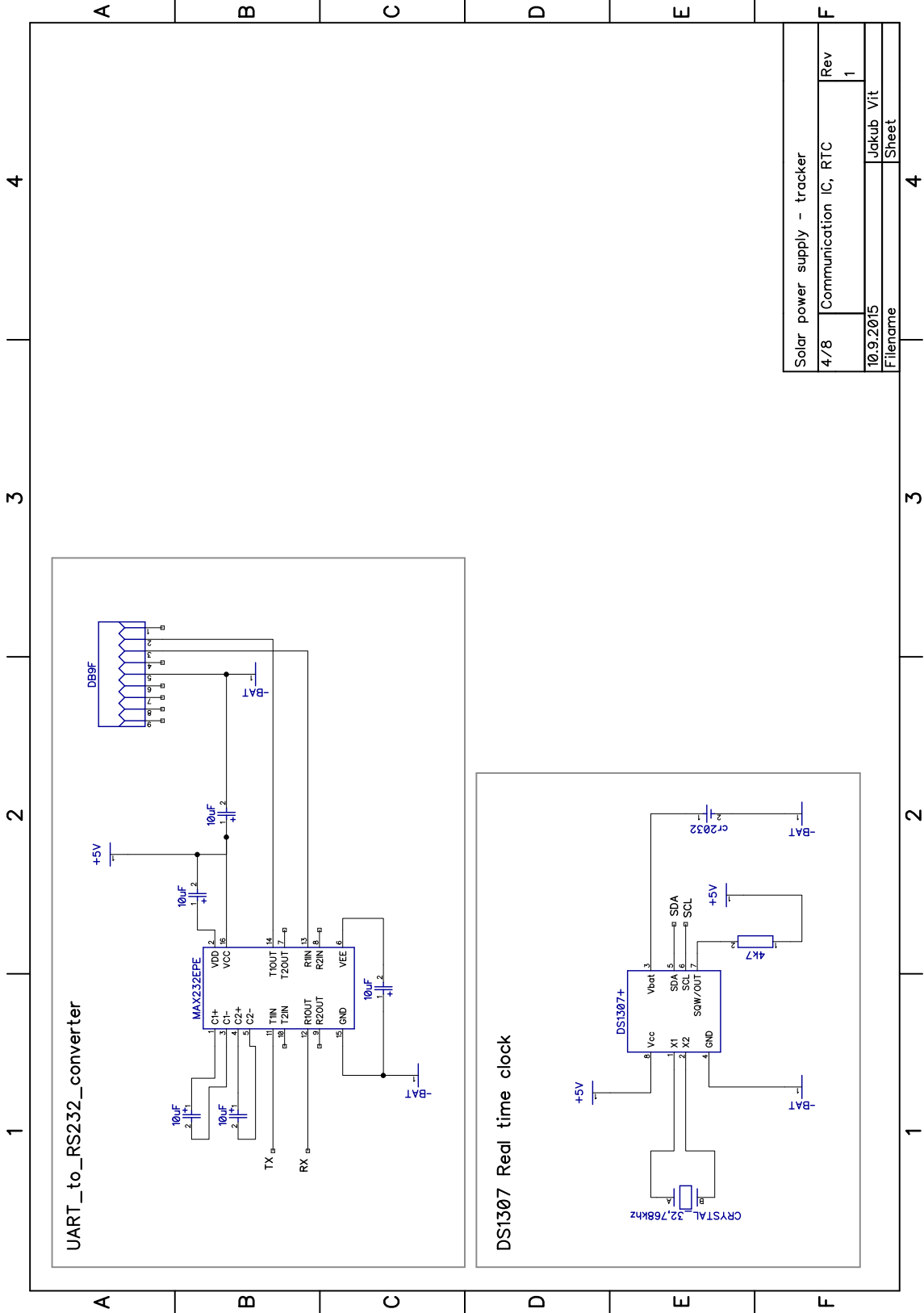
Solar power supply - tracker	
1/8	uC, Oscillator, Prog. connector Rev 1
10.9.2015	Jakub Vit
Filename Sheet	



Solar power supply - tracker	
2/8	Multiplexer
10.9.2015	Jakub Vit
Filename	Sheet

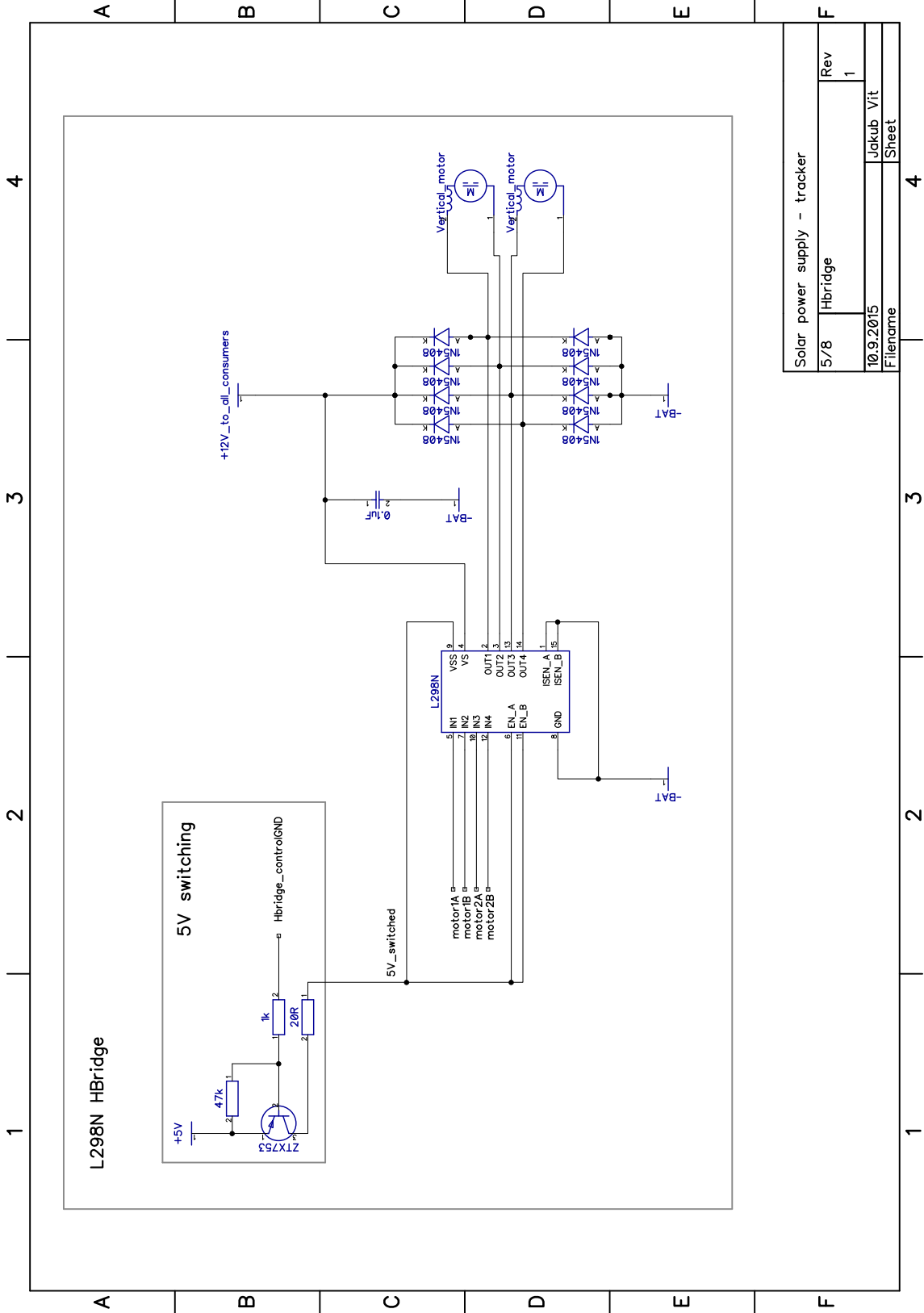


Solar power supply - tracker	
3/8	Switching circuit, Relay output Rev 1
10.9.2015	Jakub Vit
Filename Sheet	

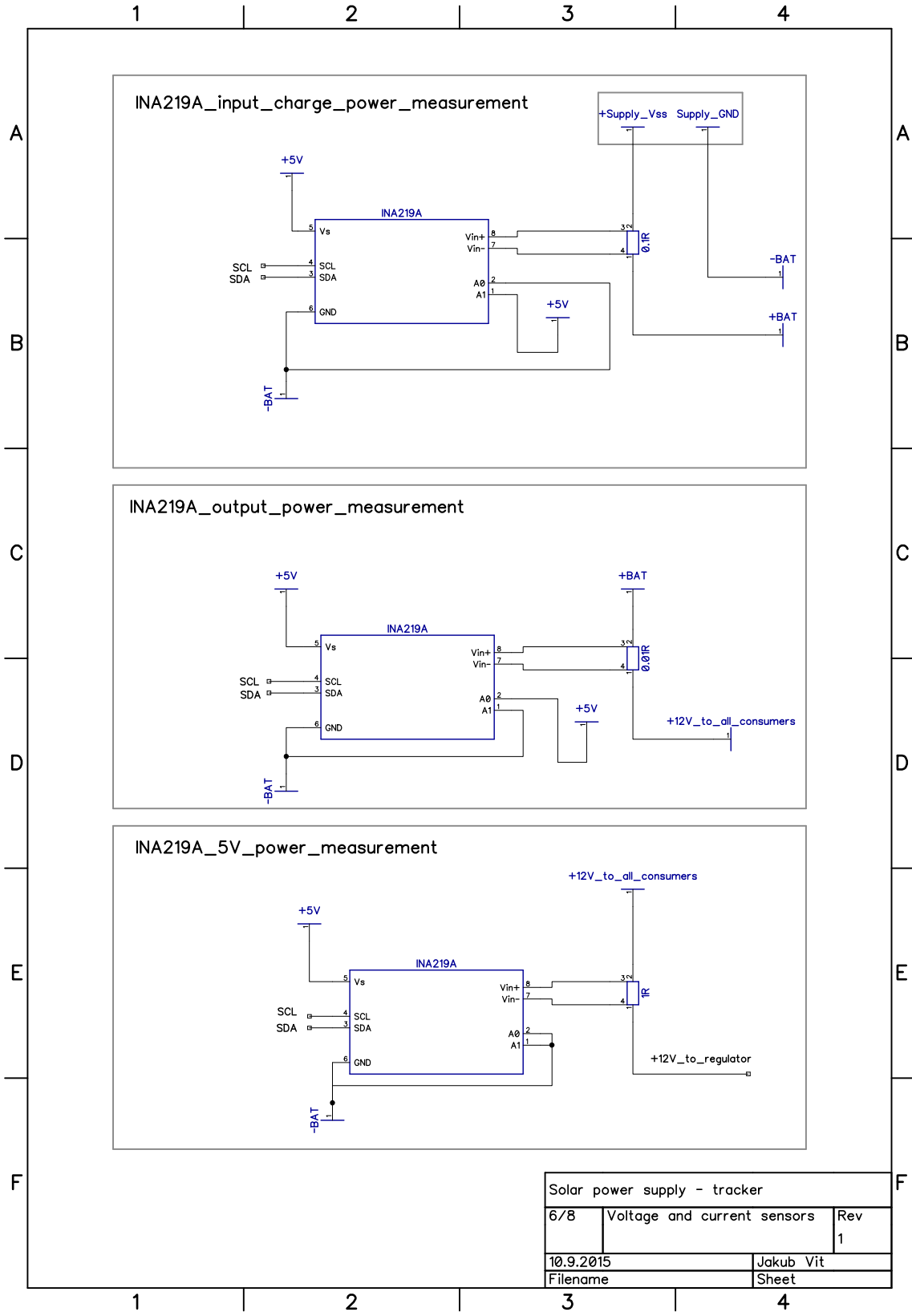


Solar power supply - tracker	
4/8	Communication IC, RTC
10.9.2015	Jakub Vit
Filename	Sheet
	Rev 1

X

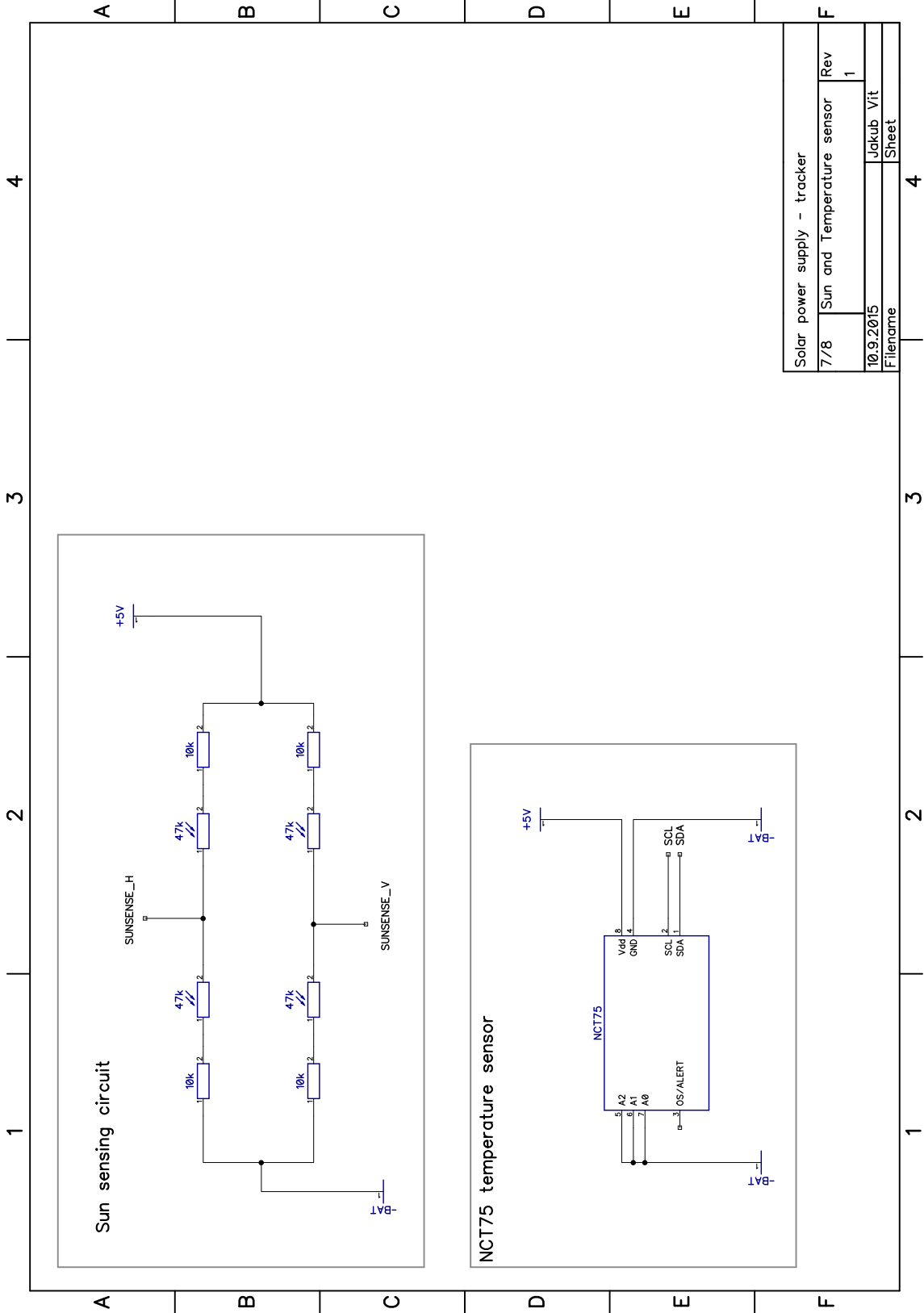


Solar power supply - tracker	
5/8	Hbridge
10.9.2015	Jakub Vit
Filename	Sheet

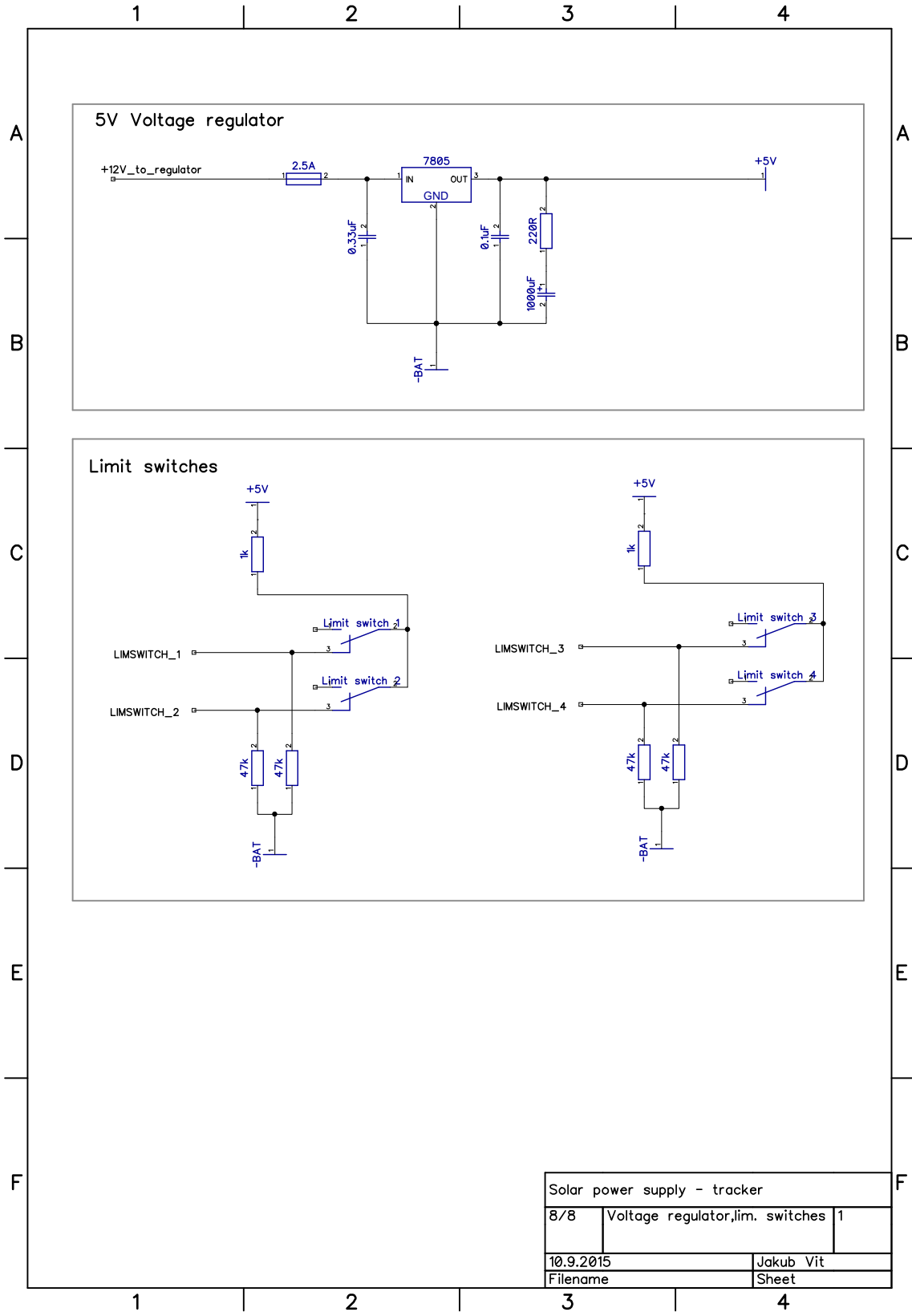


Solar power supply - tracker		
6/8	Voltage and current sensors	Rev 1
10.9.2015	Jakub Vit	
Filename	Sheet	



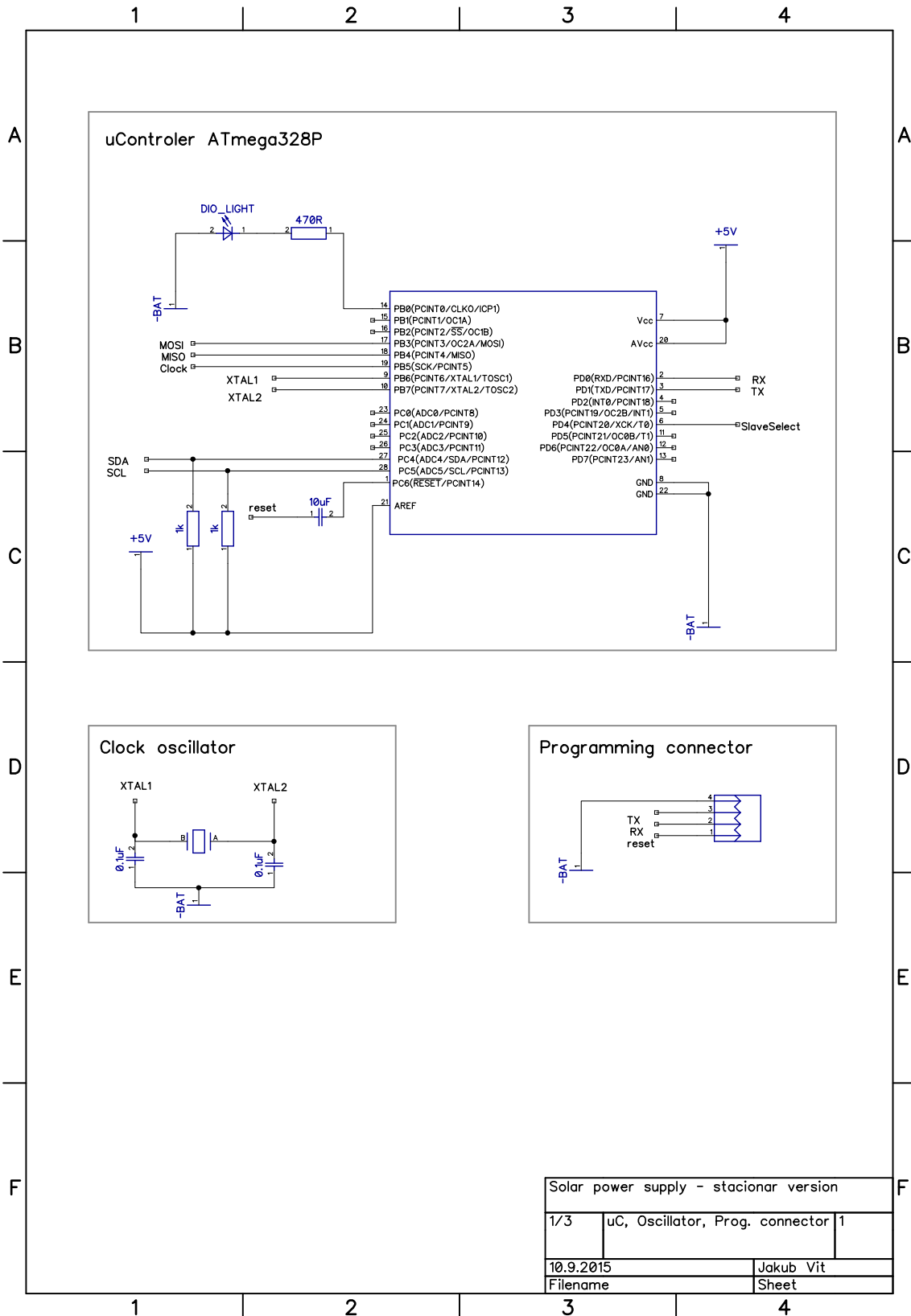


Solar power supply - tracker	
7/8	Sun and Temperature sensor Rev 1
10.9.2015	Jakub Vit
Filename	Sheet



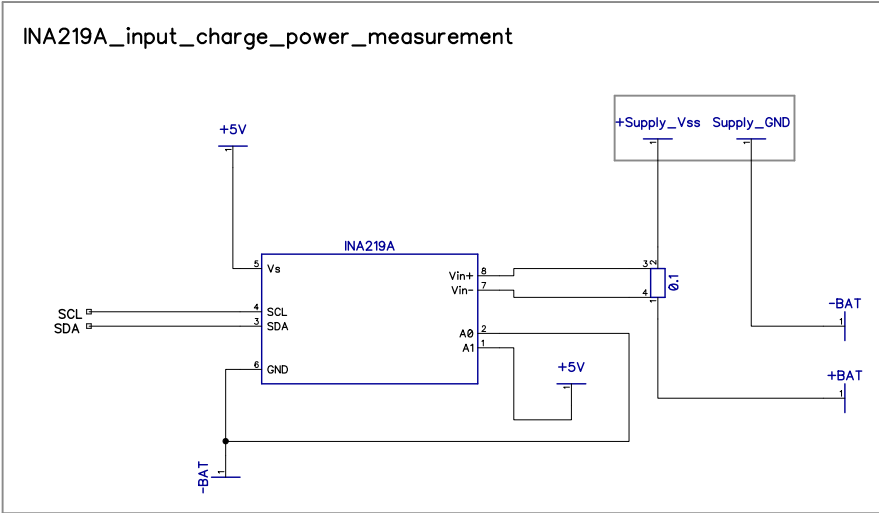
Solar power supply - tracker		
8/8	Voltage regulator,lim. switches	1
10.9.2015	Jakub Vit	
Filename	Sheet	

## A.8. Schémata zapojení elektroniky panelu s fixní polohou



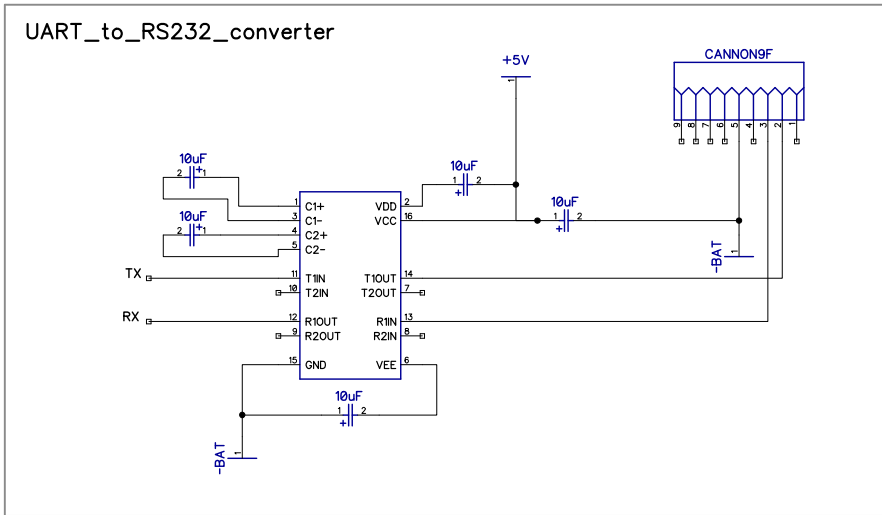
1 2 3 4

A A



B B

C C



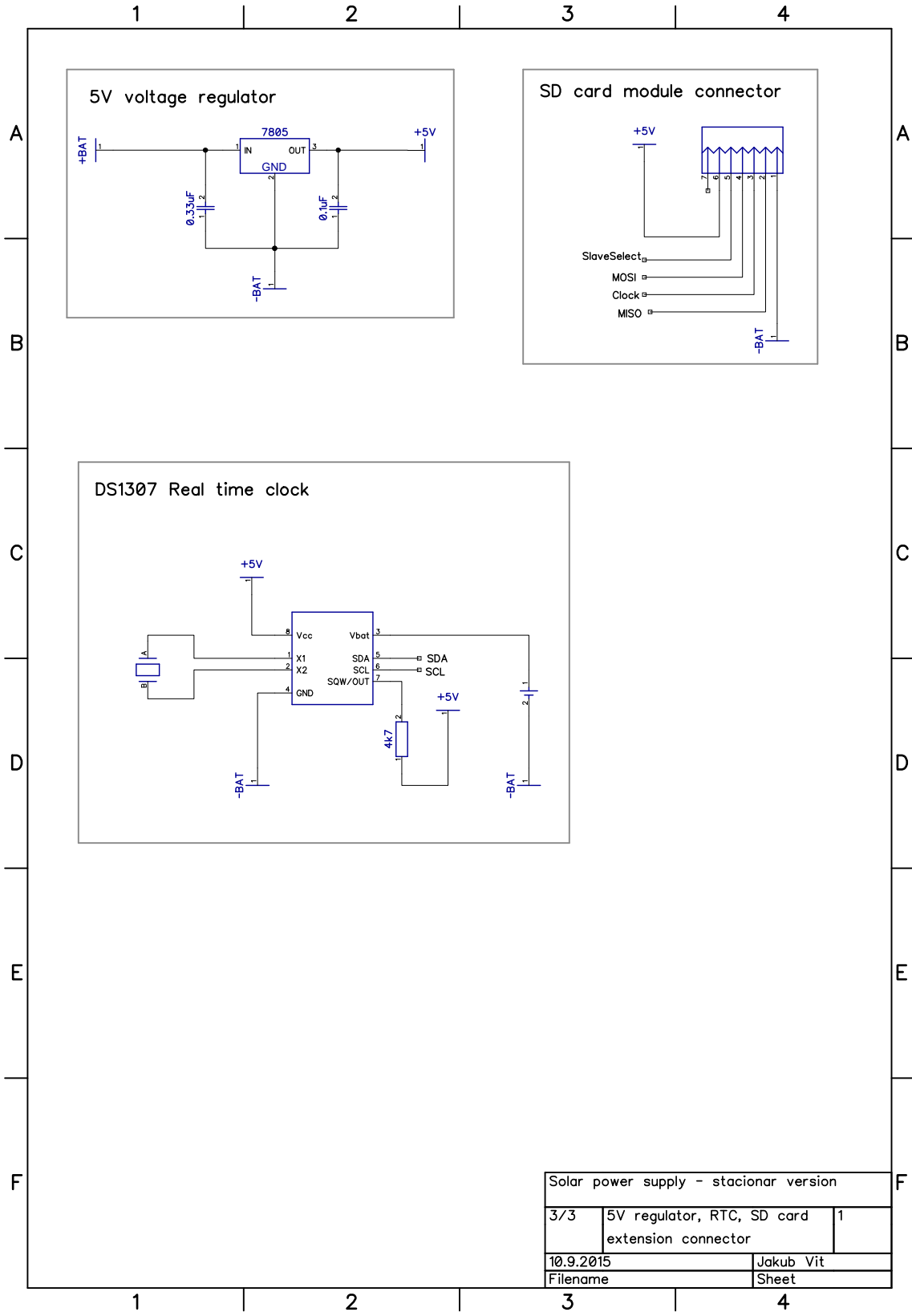
D D

E E

F F

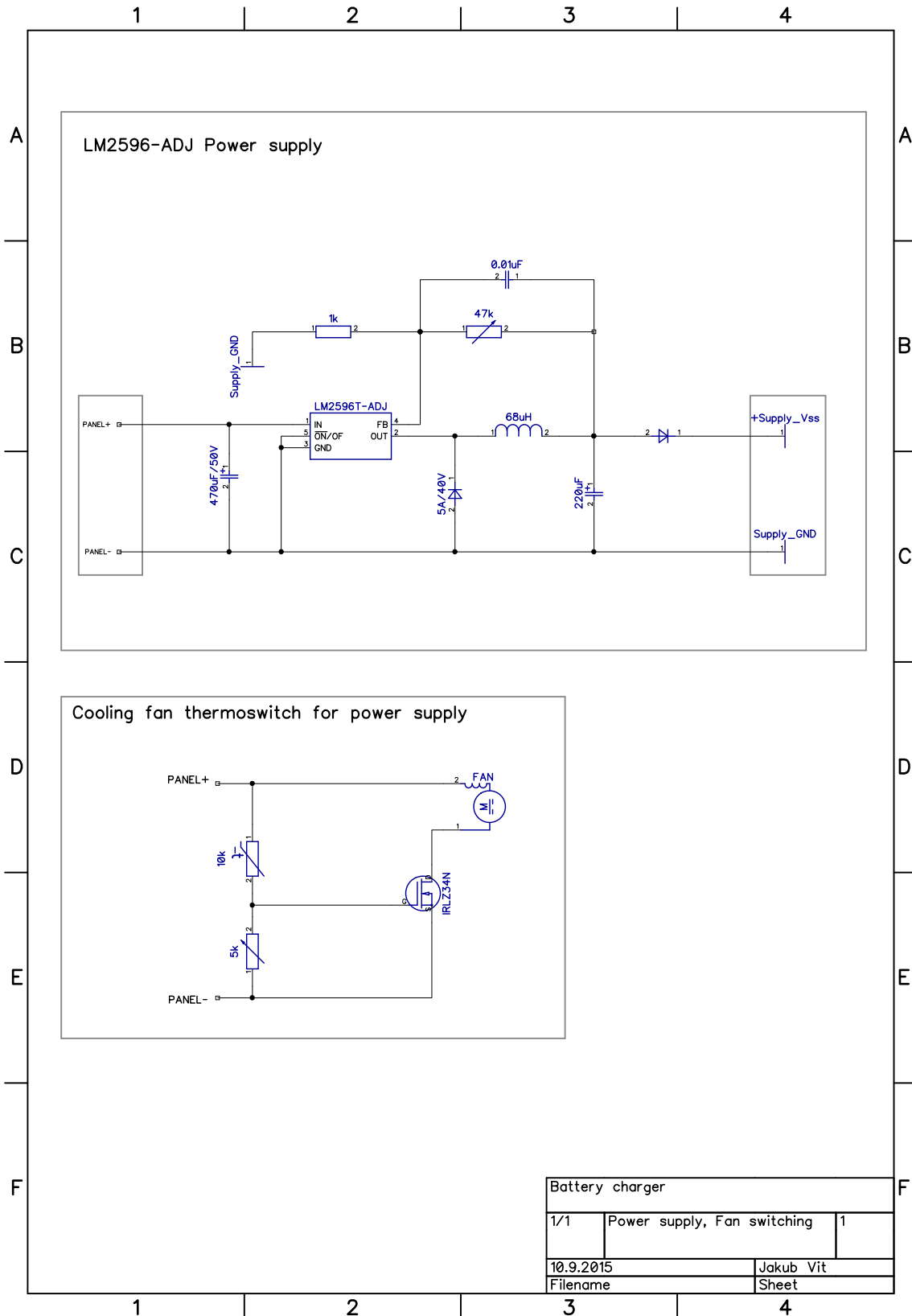
Solar power supply - stacionar version		
2/3	Coommunication IC, Power measurement	1
10.9.2015	Jakub Vit	
Filename	Sheet	

1 2 3 4



Solar power supply - stacionar version		
3/3	5V regulator, RTC, SD card extension connector	1
10.9.2015	Jakub Vit	
Filename	Sheet	

## A.9. Schémata zapojení regulátoru napětí



Univerzita Hradec Králové  
Faculty of Informatics and Management  
Akademický rok: 2015/2016

Studijní program: Applied Informatics  
Forma: Combined  
Obor/komb.: Aplikovaná informatika (ai2-k)

Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

PŘEDKLÁDÁ:	ADRESA	OSOBNÍ ČÍSLO
Bc. Vít Jakub	Svatojánská 684/6, Hradec Králové - Třebeš	I1200474

**TÉMA ČESKY:**

Chytré řešení alternativního zdroje energie pro chytré domy

**TÉMA ANGLICKY:**

Smart Solution of Alternative Energy Source for Smart Houses

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

doc. Ing. Ondřej Krejcar, Ph.D. - CZAV

**ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

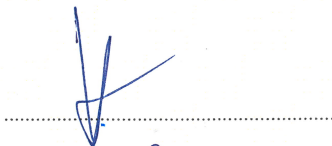
Cílem diplomové práce je návrh a implementace fotovoltaického zdroje energie řízeného jednotkou Arduino. Řídicí jednotka bude schopna monitorovat energetickou bilanci.

Osnova:

1. Úvod
  2. Chytré domy a praktické využití chytrého zdroje
  3. Konstrukční řešení fotovoltaických zdrojů
  4. Návrh mechanické části chytrého zdroje
  5. Návrh řídicí elektroniky chytrého zdroje a pevně umístěného panelu
  6. Řídicí software chytrého zdroje
  7. Testování realizovaného řešení
  8. Diskuze výsledků realizovaného řešení
  9. Závěr
  11. Seznam použité literatury
- A. Přílohy

**SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:**

Podpis studenta: .....



Datum: .....

Podpis vedoucího práce: .....



Datum: .....