



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

DIAGNOSTIKA ZDROJOVÉ ČÁSTI FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN

DIAGNOSTICS OF THE SOURCE PART OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matěj Turinský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Matěj Turinský

ID: 221026

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika zdrojové části fotovoltaických elektráren

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit zařízení pro monitorování zdrojové části fotovoltaických elektráren. Pro spojení s nadřazeným systémem by mělo zařízení využívat komunikaci dle standardu G3-PLC.

1. Diskutujte možnosti realizace monitorovacího zařízení.
2. Definujte požadavky na HW zařízení.
3. Navrhněte a implementujte SW vybavení monitorovacího zařízení.
4. Otestujte funkčnost monitorovacího zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Interní dokumentace firmy Modemtec

Dokumentace firmy SolarEdge

SUNDARAM, K. Mohana. Photovoltaic Systems: Artificial Intelligence-based Fault Diagnosis and Predictive Maintenance. Crc Press, 2022. ISBN 9781000545890.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 15.5.2024

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

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je definovat požadavky na vývoj HW monitorovacího zařízení zdrojových částí fotovoltaických elektráren a poté pro toto zařízení vytvořit vhodné SW vybavení. Práce rozebírá druhy poruch v rámci elektrárny, jejich důsledky a možnosti detekce. Následuje výběr měření a HW komponent pro monitorovací zařízení, jejich kompletace a realizace řídicího programu pro vyhodnocovací jednotku. Program by měl spravovat měření, následnou diagnostiku a komunikaci s okolními systémy dle standardu G3-PLC.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaika, měření, diagnostika, G3-PLC, C2000, STM32, IEC-61724, NEC-690

ABSTRACT

The aim of this thesis is to define development requirements for HW of monitoring device for the source parts of photovoltaic power plants and afterward implement sufficient SW equipment. Thesis analyses types of faults within a power plant its consequences and possible ways of detection. It is followed by selection of measurements and HW components for monitoring device, its complementation and implementation of control program for the evaluation unit. Program should manage measurements with afterward diagnosis and communication with surrounding systems according to the G3-PLC standard.

KEYWORDS

Photovoltaics, measurement, diagnostics, G3-PLC, C2000, STM32, IEC-61724, NEC-690

TURINSKÝ, Matěj. *Diagnostika zdrojové části fotovoltických elektráren*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Matěj Turinský
VUT ID autora: 221026
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Diagnostika zdrojové části fotovoltaických elektráren

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Fiedlerovi Ph.D. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc. Dále děkuji firmě ModemTec s.r.o. za možnost vypracování tohoto zadání v rámci semestrální a navazující diplomové práce. Jmenovitě pak děkuji Ing. Ladislavovi Šťastnému Ph.D. a Ing. Romanu Megovi Ph.D. za odbornou pomoc při řešení.

Obsah

Úvod	19
Cíle práce	21
1 Motivace	23
2 Nároky na monitorovacího zařízení	25
2.1 Typické poruchy a defekty	26
2.1.1 Zkratky v rámci FVE	26
2.1.2 Poruchy usměrňovacích diod	27
2.1.3 Přehřátí FV článku	28
2.1.4 Delaminace	28
2.1.5 Změna barvy	29
2.1.6 Koroze	29
2.1.7 Vysokonapěťový stres	29
2.1.8 Mechanická poškození	30
2.2 Vizuální techniky detekce poruch	31
2.2.1 Vizuální inspekce	31
2.2.2 Termovizní snímání	31
2.2.3 Elektroluminiscenční snímání	32
2.3 Detekce poruch na základě elektrických veličin	33
2.3.1 Přímé měření elektrických veličin	33
2.3.2 VA charakteristiky FV panelů	33
2.3.3 Výkonové veličiny	34
2.3.4 Přístupy na bázi zpracovávání signálu	35
2.3.5 Přístupy na bázi strojového učení	36
2.4 Sledované veličiny	37
3 Definice HW požadavků monitorovacího zařízení	39
3.1 Realizace požadovaných měření	40
3.1.1 Elektrické napětí stringu	40
3.1.2 Elektrický proud stringem	40
3.1.3 Rozdílový elektrický proud	41
3.1.4 Referenční hodnota osvitu	43
3.1.5 Teplota FV panelu a okolí	44
3.2 Realizace silových obvodů	45
3.3 Realizace komunikačního rozhraní	46
3.4 Realizace vyhodnocovací jednotky	48

4	Rozšiřující požadavky na HW	49
4.1	Oddělení měření a komunikace	49
4.2	Funkce Rapid-shutdown	50
5	Implementace SW vybavení	51
5.1	Mikrokontroler TMS320F28069	51
5.1.1	Program pro jádro CLA	53
5.1.2	Program pro jádro C28x	58
5.2	Mikrokontroler STM32F415	64
5.2.1	G3-PLC	64
5.2.2	LwIP	65
6	Prototyp monitorovacího zařízení	69
6.1	Výsledky testování	69
6.2	Plánovaná topologie	71
	Závěr	73
	Literatura	75
	Seznam symbolů a zkratek	81
	Seznam příloh	85
A	Požadavky na měření dle IEC 61724-1 [14]	87
B	POSIX style drivers v jazyce C [1]	89
C	Přístup k periferiím pomocí C2000Ware	91
D	Detekci zahoření oblouku	93
E	Obsah elektronické přílohy	97

Seznam obrázků

2.1	Zapojení monitorovacích zařízení v stringu [1]	25
2.2	Podmínky pro vznik sériového oblouku	26
2.3	Typická místa vzniku paralelního zkratu uvnitř FVE [6]	27
2.4	Usměrňovací diody v rámci FV stringu	27
2.5	Důsledky delaminace [3]	28
2.6	Zbarvený FV článek	29
2.7	Vysokonapěťový stres FV panelu způsobující PID [13]	29
2.8	IR snímky mechanicky poškozeného a zastíněného FV panelu [10]	32
2.9	EL snímky mechanicky poškozených a opotřeбенých FV článků [10]	32
2.10	Volt-ampérové charakteristiky FV článků [12]	34
2.11	Deformace VA charakteristiky vlivem zastínění a stárnutí [11]	34
3.1	Blokové schéma monitorovacího zařízení [1]	39
3.2	Přepětová ochrana MCU	40
3.3	Návrh snímače rozdílového proudu s Halloovou sondou	42
3.4	Srovnání termočláňkového [20] a fotovoltaičského [21] pyranometru	43
3.5	Obvodové schéma zapojení G3-PLC modemu [27]	46
3.6	Typický model a skladba paketů G3-PLC komunikace [27]	47
4.1	Použití zkratovacích relé ve funkci Rapid-shutdown	50
5.1	Překlad programu v prostředí Code Composer Studio [34]	52
5.2	Závislost hodnoty osvitu na odporu fotorezistoru [1]	54
5.3	Měření pro detekci zahoření oblouku [1]	55
5.4	Popis detekce oblouku využívající Fourierovu transformaci	56
5.5	Popis detekce oblouku využívající banku pásmových propustí	57
5.6	Amplitudová odezva pásmových propustí	57
5.7	Vstupy a výstupy jádra C28x	58
5.8	Struktura zpráv v rámci Modbusu [39]	61
5.9	Endianita implementované Modbus komunikace	62
5.10	Rozdíl mezi pakety v ModemTec driverech pro SM2400	64
5.11	Průběh zpracovávání komunikace G3-PLC sítě	67
6.1	Test odezvy Modbus serveru	70
6.2	Test komunikace po G3-PLC síti	70
6.3	Plánovaná topologie pro monitorovací zařízení v rámci FVE [1]	71
C.1	Vývojářská sada C2000Ware - bitfield	91
C.2	Vývojářská sada C2000Ware - driverlib	91
D.1	Měření pro detekci zahoření oblouku [1]	93
D.2	Aplikace filtrů na měření s hořícím obloukem [1]	94
D.3	Aplikace filtrů na měření bez oblouku [1]	95

Seznam tabulek

2.1	Detekce poruch přímým měřením elektrických veličin [3]	33
2.2	Nejběžnější metody na bázi zpracování signálu	36
3.1	Srovnání snímačů proudu	41
5.1	Porovnání jader mikrokontroleru TMS320F28069 [34]	51
5.2	Seznam použitých CLA tasků	54
5.3	Registrová mapa Modbus RTU serveru	63
5.4	Popis příznakových bitů monitorovacího zařízení	63
5.5	Podpora knihovny lwIP [41]	65

Úvod

Tato práce vychází ze zadání firmy ModemTec na návrh a tvorbu zařízení pro monitorování a diagnostiku zdrojové části fotovoltaických elektráren.

Úvodním slovem práce je motivace pro tvorbu takového zařízení. Navazují definice nároků na monitorovací zařízení. Dále se v této části práce může čtenář dozvědět více o poruchách ve FVE a o možnostech, jak tyto chyby včasné detekovat. Po definování nároků je v práci popsán a zdůvodněn výběr jednotlivých způsobů měření, použitých metod pro detekci poruch a návrh jaké komponenty by byly vhodné pro HW monitorovacího zařízení.

Druhá část práce popisuje implementaci SW vybavení pro monitorovací zařízení. Zde se čtenář může dozvědět více o použitých mikrokontrolerech a jak je lze programovat a zároveň jakou funkcionalitu jejich FW v rámci celkové implementace vykonává.

Celkovým cílem této práce je pak navrhnout takovou strukturu HW a vytvořit pro ni takové SW vybavení, aby bylo monitorovací zařízení schopné měřit základní elektrické veličiny a detekovat poruchy v rámci zdrojové části FVE a dále tyto výsledky předávat nadřazenému systému.

Cíle práce

Cílem práce je vytvořit zařízení pro monitorování zdrojové části fotovoltaických elektráren. Pro spojení s nadřazeným systémem by mělo zařízení využívat komunikaci dle standardu G3-PLC.

1. Diskutujte možnosti realizace monitorovacího zařízení.
2. Definujte požadavky na HW monitorovacího zařízení.
3. Navrhněte a implementujte SW vybavení monitorovacího zařízení.
4. Otestujte funkčnost monitorovacího zařízení.

1 Motivace

Dle vyjádření ministerstva průmyslu a obchodu ČR došlo mezi lety 2022 a 2023 k navýšení počtu fotovoltaických elektráren o 45 197 instalací s instalovaným výkonem necelých 3 000 MW [4]. Dle dalších předpokladů a predikcí energetického regulačního úřadu by se měl tento výkon dále navyšovat, a to až k hodnotám instalovaného výkonu mezi 10 000 MW a 13 000 MW [5]. Tato hodnota je jedna z nejvyšších mezi obnovitelnými zdroji energie v České republice.

Je tedy zřejmé, že fotovoltaické elektrárny jsou stále se rozvíjejícím odvětvím energetiky. S tím souvisí jak vývoj samotných fotovoltaických článků a měničů popřípadě optimalizérů [2], tak i systémů které zvyšují jejich bezpečnost nebo umožňují jejich monitorování, diagnostiku a vzdálenou kontrolu.

Z pohledu bezpečnosti je největším problémem FVE riziko spojené s požáry.

Ty bývají způsobovány buď elektrickým obloukem nebo poruchou či přehřátím některé komponenty. Pokud následně k požáru dojde, tak samotný fotovoltaický panel nehoří a nelze přímo deaktivovat. Stejnosměrný obvod FVE bude tedy nadále pod nebezpečně vysokým stejnosměrným napětím. Je tedy takřka nemožné tyto požáry hasit dle běžných postupů. Proto mnohé normy a vyhlášky zvyšují důraz na opatření, která umožní požárům předcházet nebo minimalizovat rizika s nimi spojená.

Z pohledu diagnostiky je pak pro FVE důležité monitorování aktuálního i dlouhodobého stavu. FVE jsou totiž vysoce náchylné vůči vlivům okolí, a tak je složité správně vyhodnotit, zda je panel pouze v krátkodobých zhoršených podmínkách anebo zda se na něm již projevují známky stárnutí a opotřebení. Při monitorování aktuálního stavu je také neméně důležité sledování a zaznamenávání dodávaného elektrického výkonu či energie pro následnou analýzu.

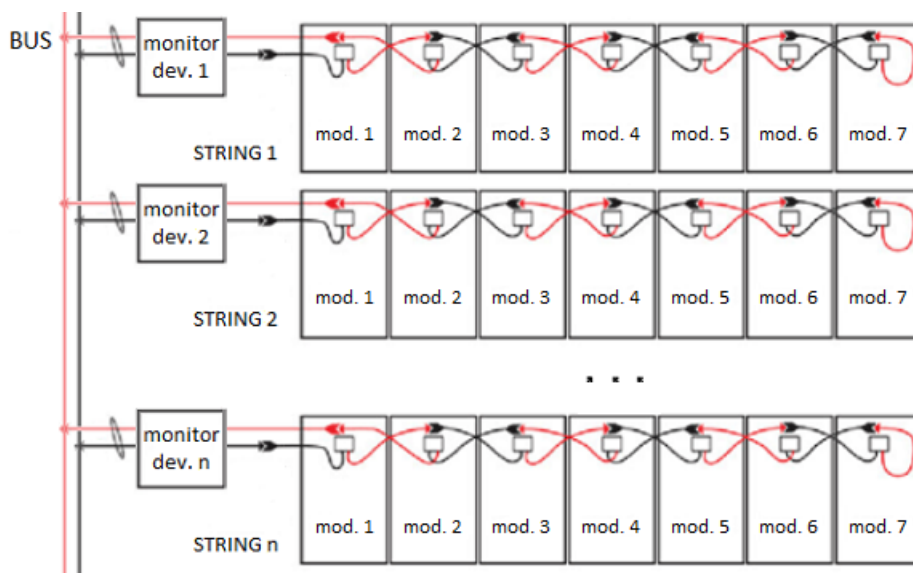
2 Nároky na monitorovacího zařízení

Před definováním požadavků na HW je nutné určit jakým způsobem bude monitorovací zařízení získávat potřebné informace ze zdrojové části fotovoltaické elektrárny. Základem FVE jsou fotovoltaické panely, které vznikají sério-paralelním řazením jednotlivých fotovoltaických článků osazených ve společném rámu. Nejpresnějším způsobem monitorování by tedy bylo měřit potřebné veličiny na každém z instalovaných panelů. Toto řešení by ale bylo velmi nákladné, protože počty panelů ve zdrojových částech komerčních FVE dosahují i vyšších desítek tisíc a je tedy využíváno primárně mezi instalacemi na rodinných domech nebo jiných objektech, kde je elektrická energie vyráběna pro vlastní spotřebu.

Vhodnějším řešením z hlediska nákladů na monitorovací zařízení by bylo zapojení, které by sledovalo potřebné veličiny pro několik panelů současně. Monitorovací jednotka by tedy mohla například obsluhovat snímače pro několik sousedních panelů. Zde by ale úspora nebyla nijak výrazná.

Dalším a nejspíš nejvýhodnějším řešením by mohlo být využití topologie FVE, která podobně jako jednotlivé články uvnitř fotovoltaického panelu slučuje panely do takzvaných stringů. String bývá u větších FVE spojením nejčastěji dvaceti FV panelů do série pro navýšení hodnoty elektrického napětí. Dále se tyto celky připojují paralelně na hlavní přívod měničů označovaný jako bus.

Monitorovací zařízení, které by mělo být navrženo v rámci této práce tedy bude navrženo pro instalaci v místě, kde se jednotlivé stringy připojují k busu.



Obr. 2.1: Zapojení monitorovacích zařízení v stringu [1]

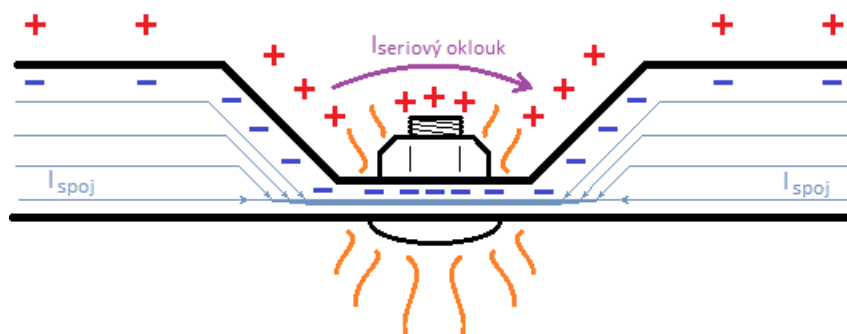
2.1 Typické poruchy a defekty

Jelikož primárním účelem monitorovacího zařízení je zvýšení bezpečnosti uvnitř zdrojové části FVE, budou v následujících kapitolách popsány nejčastější poruchy vznikající na FV panelech, popřípadě jejich instalacích, dále jejich důsledky a závažnost a také možnosti jejich včasné detekce.

2.1.1 Zkraty v rámci FVE

FVE je v podstatě sério-paralelní zapojení velkého množství FV panelů a jako takové obsahuje značné množství konektorů, svorkovnic nebo pájených spojů. Každý z těchto spojů je ale potenciálním rizikem při vzniku zkratů uvedených níže.

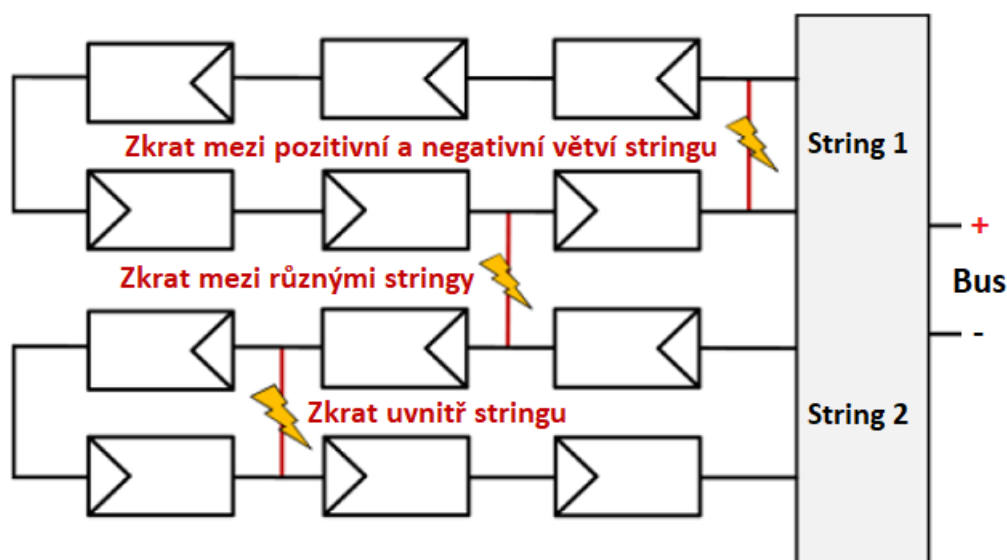
1. **Sériový oblouk** nejčastěji vzniká při zvýšení přechodového odporu spoje. K tomu dochází nejčastěji při mechanickém namáhání spoje nebo působením vnějších vlivů způsobující korozi (teplota okolí, zvýšená vlhkost). [6]



Obr. 2.2: Podmínky pro vznik sériového oblouku

Jak je naznačeno na obrázku 2.2 dochází při zvýšení odporu spoje k jeho ohřívání elektrickým proudem a zároveň se v jeho okolí může zvýšit intenzita elektrického pole vlivem zhuštění elektrického náboje ve spoji. Při překonání elektrické pevnosti izolace se v okolí spoje vytvoří podmínky pro zahoření sériového oblouku, který způsobuje opalování kontaktů a izolace a při častějším výskytu může zapříčinit požár.

2. **Paralelní zkrat** vzniká spojením dvou vodičů s různým potenciálem. Takovéto kombinace je samozřejmě ve FVE mnoho, ale typickými příklady jsou ty naznačené na obrázku 2.3. Jelikož jsou FV panely měkkým zdrojem, dochází tak i při zkratu k navýšení elektrického proudu stringem maximálně na 1,5 násobek oproti proudu jmenovitému a to i za plného osvětlení. Dopady z hlediska bezpečnosti tedy nejsou tak kritické, pokud nedojde k zahoření oblouku, což ale není tak běžné jako u oblouku sériového. Dochází ale k většímu snížení dodávaného výkonu a zároveň je složitější paralelní zkrat lokalizovat vzhledem k širšímu možnostem výskytu.

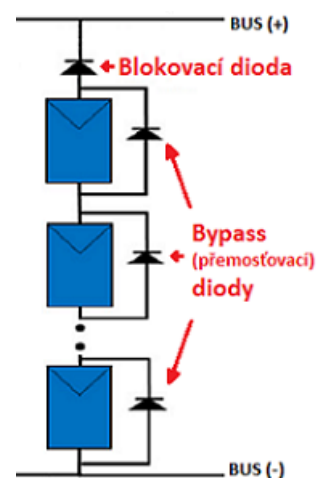


Obr. 2.3: Typická místa vzniku paralelního zkratu uvnitř FVE [6]

3. **Zkrat na kostru** způsobující unikání elektrického proudu po zemní smyčce. FVE totiž není zcela izolovaná od rozvodné soustavy, a tak se při této poruše může objevit vysoké dotykové DC napětí i na neživých vodivých částech FV instalace, jakou jsou třeba rámy panelů nebo instalační lišty. Tyto části musí být dle normy IEC 61730-1 uzemněné i pro instalace v prostorách omezující přístup osob neznalých rizika, aby se nepovažovali za potenciálně nebezpečné [7]. Zároveň začínají být pro nové instalace vyžadovány obvody pro detekci unikajícího proudu a následné automatické odpojení, a to například standardem NEC (popř. NFPA 70) v rámci článku číslo 690 [8].

2.1.2 Poruchy usměrňovacích diod

V každém stringu nalezneme sadu usměrňovacích diod naznačených ve schématu 2.4 plnící dvě funkce. První z nich je oddělení stringů připojených k busu tak, aby mezi nimi neprotékal vyrovnávací proud způsobený rozdílem napětím mezi stringy či stringy a akumulátory. Tuto funkci zajišťuje blokovácí dioda. Druhou skupinou jsou takzvané bypass (přemostovací) diody, které se zapojují paralelně k panelům. Jejich úkolem je přemostění panelů nebo jejich částí, které by díky jejich zastínění či znečištění nedodávaly výkon, a naopak by se projevovaly jako zátěž



Obr. 2.4: Usměrňovací diody v rámci FV stringu

[9].

Pro obě výše uvedené funkce se používají Schottkyho diody, tak aby na nich vznikalo co nejnižší úbytek napětí v propustném směru a neklesala tak efektivita zdrojové části FVE. Problémem Schottkyho diod je ale nižší hodnota závěrného napětí typicky do 150 V. K průrazu těchto diod pak nejčastěji dochází při napěťových špičkách způsobených úderem blesku v okolí FVE.

2.1.3 Přehřátí FV článku

Tato chyba se v anglické literatuře označuje jako 'Hot spot'. Typickým důvodem je částečné zastínění FV článků nebo jejich částí v rámci panelu, což vytváří nerovnoměrné rozložení výkonu mezi články. Postižené články se tak stávají závěrně orientovány a chovají se jako zátěž s vysokým vnitřním odporem. FV článek se tak postupně ohřívá nebo je v lepším případě překlenut bypass diodou (2.1.2). I tak ale dochází ke snížení životnosti a efektivity panelu. Pokud je ale článek v závěrném směru proražen může ztratové teplo vypálit část panelu, způsobit prasknutí ochranného skla panelu nebo zapříčinit požár. [3]

2.1.4 Delaminace

FV články uvnitř panelu jsou kvůli ochraně proti nečistotám, vlhkosti, teplotním výkyvům nebo UV záření potažené vrstvou ethylenvinylacetátu. Tato vrstva se může vlivem stárnutí či chyby při výrobě narušit a do panelu může vniknout vlhkost, která uvnitř panelu zkondenzuje a vytvoří zde bílé mapy. Tím panel ztrácí na účinnosti a zároveň dochází k jeho zrychlenému opotřebení, respektive zkrácení životnosti. [3]



Obr. 2.5: Důsledky delaminace [3]

2.1.5 Změna barvy

Anglicky 'Discoloration (of encapsulation)' je jedním z projevů stárnutí panelů. Způsobuje jí UV záření dopadajícím na ochrannou vrstvu panelu. Nejčastěji se projevuje jako žloutnutí čiré ochranné vrstvy a bývá častější v suchých oblastech se zvýšenou teplotou. Důsledkem je pak snížení účinnosti panelu, kvůli snížení propustnosti světla ochrannou vrstvou. [3]



Obr. 2.6: Zbarvený FV článek

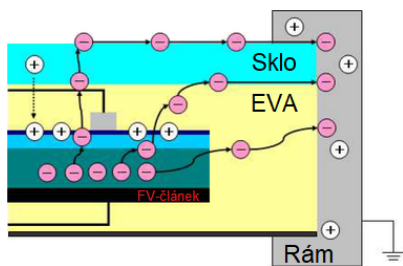
2.1.6 Koroze

S nepříznivými podmínkami okolí, kterými je i zvýšená vlhkost a teplota, souvisí také koroze. Uvnitř panelů korozi nejčastěji předchází delaminace panelu (2.1.4). Po vniknutí vlhkosti dochází k oxidaci pájených spojů uvnitř panelu. Tomuto procesu také napomáhá přítomné DC napětí. Koroze uvnitř panelů způsobuje snížení jejich účinnosti způsobené výkonovou ztrátou na zoxidovaných spojkách, což může vést až k poruše celého panelu. [3]

Korozi chceme předcházet také u konektorů mezi panely a u svorkovnic spojovacích boxů. Zde by mohla koroze způsobit zvýšení přechodových odporů spojů a vytvořit tak vhodné podmínky pro zahoření oblouků (2.1.1).

2.1.7 Vysokonapěťový stres

Vysoký napěťový potenciál panelů ve stringu proti zemi způsobuje jev označovaný jako potenciální indukovaná degradace. Dalšími faktory, které napomáhají v působení PID jsou zvýšená vlhkost, teplota a znečištění povrchu FV panelu.



Obr. 2.7: Vysokonapěťový stres FV panelu způsobující PID [13]

Postupná degradace křemíku je způsobena migrací volných iontů ze skla, ethylenvinylacetátu a rámu k samotnému PN přechodu FV článku označenou na obrázku 2.7. Častější je tato chyba pro panely, které se nachází na záporném konci stringu, protože napěťový potenciál vůči zemi zde může dosahovat až $-450 V_{DC}$. V dnešní době se snaží výrobci tomuto typu degradace předcházet výběrem vhodnějších materiálů, a proto lze na trhu nalézt takzvané PID rezistentní FV panely. U PID citlivých panelů je nutná včasná detekce, protože v ranných fázích je možné polarizaci FV článku eliminovat připojením

opačného DC napětí. Pokud je ale FV článek polarizován delší dobu, bývá narušena jeho struktura nevratně a účinnost takového článku se může snížit až o 70 %. Polarizace se totiž projeví výrazným snížením hodnoty paralelního odporu FV článku a tím se výrazně sníží i napětí naprázdno.

2.1.8 Mechanická poškození

Poslední skupinou poruch jsou mechanická poškození panelů nebo ostatních částí instalace. Jelikož jsou panely velmi křehké, tak se na nich při neopatrné manipulaci mohou vytvořit mikropraskliny. Ty nemusí být z počátku jasně viditelné, ale i tak mohou vést k vnikání vlhkosti či nečistot do panelu, což vede k delaminaci panelu (2.1.4) nebo i k poškození samotného FV článku, který pak bude mít vyšší tendenci k přehřívání (2.1.3). K mechanickému poškození panelů dochází nejčastěji při jejich instalaci, proto by měli být FVE pod vyšším dohledem právě při uvádění do provozu. Sekundárními zdroji poškození panelů jsou pak zhoršené povětrnostní podmínky nebo zvířata. [3]

Druhá nejčastěji se vyskytující mechanická poškození jsou spojena se spojovacími boxy, které slouží k připojování stringu nebo skupiny stringů k busu. Tato poškození jsou nejčastěji způsobena lidským faktorem, kdy příkladem může být nevhodná montáž boxu či nedostatečné dotažení kabelů ve svorkovnicích, které vedou k jejich opalování a podobně (viz. 2.1.1).

2.2 Vizuální techniky detekce poruch

Jsou metody vycházející ze zpracovávání snímků FV panelů v infračerveném a viditelném spektru. Základem je pořizování snímků ze zdrojové části FVE a jejich následná klasifikace pomocí metod počítačového vidění a podobně. Navzdory zlepšování těchto technik je při vizuální kontrole stále vyžadován lidský zásah, a tak nejsou tyto techniky prozatím plně automatizovatelné.

Následuje stručný popis nejběžnějších vizuálních technik pro detekci poruch na úrovni FV panelů a článků:

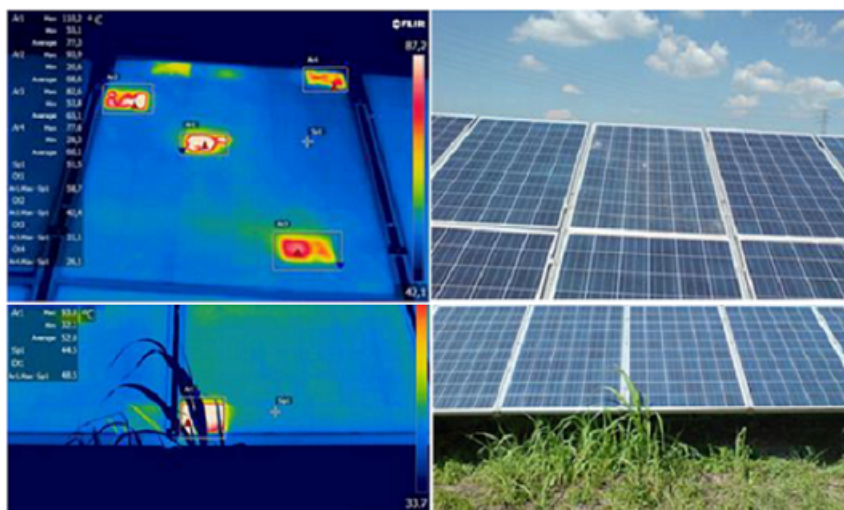
2.2.1 Vizuální inspekce

Při vizuální kontrole panelů vycházíme ze snímků ve viditelném spektru. Pokud chceme tento proces automatizovat používají se často snímky získané pomocí dronů, protože instalace trvalého kamerového systému by byla nákladná. Získané snímky je potřeba pro detekci nejprve předzpracovat tak, aby byla kompenzována změna osvětlení a další vlivy prostředí. Následně je ve snímcích možné vyhledávat anomálie, které budou ohlášeny obsluze FVE ke kontrole, nebo můžeme snímky srovnávat v času a v takto získaných rozdílových snímcích detekovat změnu ve scéně, která by mohla být způsobena poruchou nebo znečištěním.

Pokud se jedná o vizuální kontrolu prováděnou obsluhou FVE, je nutné, aby byla obsluha řádně vyškolená a obeznámená s rizikem při pohybu v okolí zdrojové části FVE. Doporučení a pravidla popisující postupy při kontrole, používané nástroje a ochranné prvky definují například organizace National Renewable Energy Laboratory a International Electrochemical Commission (IEC1215 - 1987). Ať už při automatické nebo obsluhou prováděné kontrole touto metodou detekujeme nejčastěji mechanické poškození či znečištění panelu (2.1.8), delaminaci (2.1.4) nebo následnou korozi (2.1.6) panelu, popřípadě projevy stárnutí panelu jako je například změna barvy (2.1.5). [9]

2.2.2 Termovizní snímání

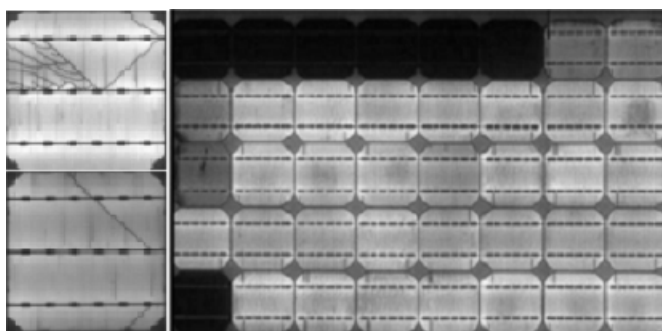
Pro tento způsob snímání je nutné pořídit snímky v IR části spektra. Postup je pak obdobný jako při vizuální inspekci snímků ve viditelném spektru. Anomálie ve snímku zde indikují místa se zvýšenou teplotou. Automatická detekce je pro tyto snímky jednodušší a lze provádět například pomocí prahování nebo adaptivního prahování snímku. Obecně lze pak tato metoda použít k detekci přehřívajících se FV článků (2.1.3), teplo vyzařujících zkratů a oblouků (2.1.1) nebo poruch usměrňovacích diod (2.1.2).



Obr. 2.8: IR snímky mechanicky poškozeného a zastíněného FV panelu [10]

2.2.3 Elektroluminiscenční snímání

Elektroluminiscenční (EL) způsob detekce poruch je založen na snímání vyzařování FV článků ve tmavém prostředí. FV články jsou složeny z fotodiod, a proto při připojení externího DC napětí vyzařují světlo na vlnové délce typické pro materiál, ze kterého jsou fotodiody vyrobeny. Pro nejčastěji používané monokrystalické a polykrystalické křemíkové FV články je dominantní vlnová délka přibližně 1150 nm. Při pořizování snímků panelů tedy musíme volit snímač a optickou soustavu, která bude pro tyto vlnové délky dostatečně citlivá. Výhodou tohoto přístupu je oproti IR snímkům možnost použití i pro poruchy, se kterými není přímo spojen ohřev, a proto se tato metoda používá pro detekci FV článků pod vysokonapěťovým stresem způsobujícím snížení účinnosti a životnosti (2.1.7), detekci nechtěných překlenutí FV článků a s ním spojené poruchy usměrňovacích diod (2.1.2) nebo pro detekci mikropřasklin (2.1.8) a začínající koroze (2.1.6) uvnitř panelu. [10]



Obr. 2.9: EL snímky mechanicky poškozených a opotřeбенých FV článků [10]

2.3 Detekce poruch na základě elektrických veličin

Jsou metody vycházející ze zpracovávání elektrických veličin měřených ve zdrojové části FVE. Nejnížší úroveň FVE, kde lze tato měření provádět jsou FV panely a následně vyšší úrovně jako například string či bus. Z pohledu automatizace je diagnostika elektrických veličin jednodušší než zpracovávání vizuálních dat. Hlavním důvodem je snazší měření, ale také nižší výpočetní náročnost při zpracovávání. Narozdíl od nutnosti pořizování snímků ve vysokém rozlišení vychází tyto metody často pouze z pravidelně vzorkovaných hodnot elektrického napětí a proudu v dané úrovni FVE doplněné o data s aktuálními povětrnostními podmínkami.

Následuje stručný popis nejběžnějších technik vycházejících z měření elektrických veličin pro detekci poruch na úrovni FV stringů a panelů:

2.3.1 Přímé měření elektrických veličin

Základním způsobem, jak hledat poruchy ve zdrojové části FVE, je měření napětí a proudu FV panelů, stringů nebo větších celků FVE. Dle změřených hodnot a stanovených prahů, jako jsou například ty uvedené v tabulce 2.1, můžeme realizovat jednoduchou klasifikaci některých poruch.

el. napětí ¹ [%]	el. proud ¹ [%]	možná porucha
80 - 100	0 - 10	přerušený obvod v měřeném celku FVE
80 - 100	0 - 60	lokální přehřátí FV článku ('Hot spot')
90 - 110	50 - 80	paralelní nebo sériový zkrat

¹ Hodnoty jsou vztaženy k jejich jmenovité (nominální) hodnotě

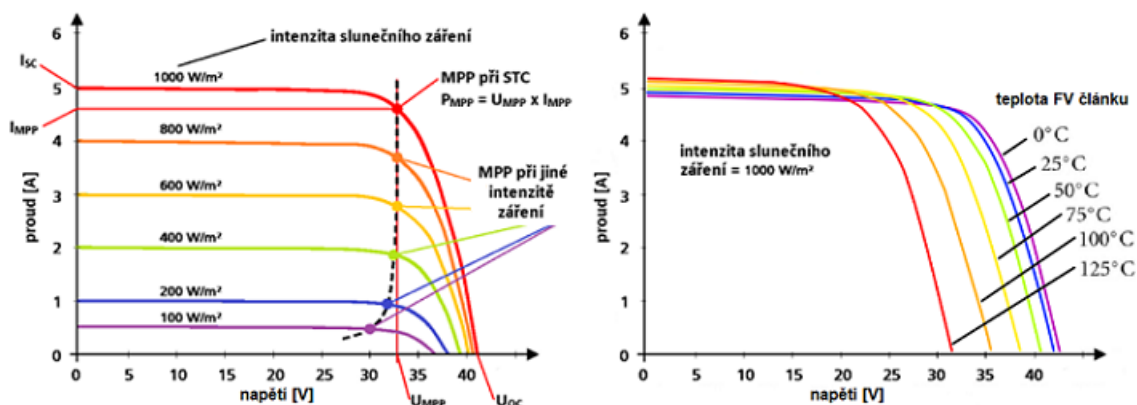
Tab. 2.1: Detekce poruch přímým měřením elektrických veličin [3]

Pro zlepšení výsledků je klíčové správně určit jmenovité hodnoty k měřeným hodnotám napětí a proudu. K tomu je možné použít referenční FV článek, měřené hodnoty porovnávat s hodnotami okolních částí FVE anebo do měření promítnout aktuální povětrnostní podmínky z blízkosti diagnostikované části FVE.

2.3.2 VA charakteristiky FV panelů

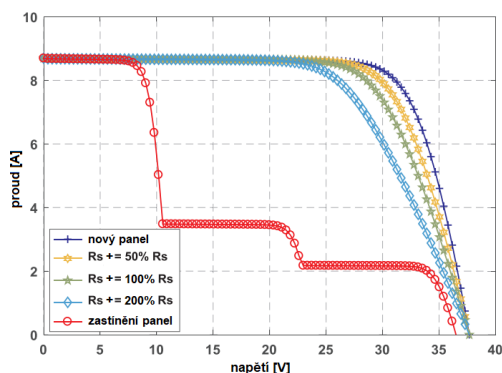
Při běžném chodu by odpovídaly hodnoty napětí a proudu naměřené na FV článku příslušné křivce VA charakteristiky vynesené na obrázku 2.10. To stejné bude platit i pro celý panel, pokud bude každý z jeho článků plně funkční. Pokud by ale byl jakýkoliv z článků poškozen nebo zastíněn, začne se VA charakteristika celého panelu deformovat, tak jak je naznačeno na obrázku 2.11. Také je patrné, že proud

nakrátko (I_{SC}) je silně závislý na intenzitě slunečního záření, která ale nemá takový vliv na napětí naprázdno (U_{OC}). Opačný účinek pro I_{SC} a U_{OC} má pak teplota FV článku. Pro správnou detekci poruch, kterými jsou typicky přehřívání FV článků (2.1.3) nebo poruchy bypass a blokovacích diod (2.1.2), je tedy důležité kromě měření napětí a proudu také měření intenzity záření a teplotu FV panelu. [3]



Obr. 2.10: Volt-ampérové charakteristiky FV článků [12]

Pro sofistikovanější detekci, než je pouhé porovnávání měřených hodnot s očekávanou VA charakteristikou, je vhodné měřené hodnoty uchovávat a postupně s nimi modelovat reálnou VA charakteristiku panelu. Následnou korelací nebo jiným způsobem srovnání s očekávanou charakteristikou můžeme dosáhnout lepších výsledků. Kromě samotných měření lze při jejich uchovávání pracovat i s jejich diferencí a detekovat tak i rychlost změny charakteristiky nebo kromě VA charakteristiky pracovat i se závislostí výkonu na napětí označovanou jako PV charakteristika [9].



Obr. 2.11: Deformace VA charakteristiky vlivem zastínění a stárnutí [11]

2.3.3 Výkonové veličiny

Sledování výkonů v rámci FVE je běžné pro bilanci a monitorování účinnosti. Je ho ale možné používat i jako jednu z metod diagnostiky poruch. Nejčastěji se na základě výkonových veličin na DC straně FVE rozlišují krátkodobé vady jako například dočasné zastínění panelu od těch dlouhodobých jako je postupné stárnutí FVE. Dále je také možné srovnávat výkony mezi stringy a busem a kontrolovat tak, zda nedošlo k závadě na MPPT a podobně. [3]

Kromě samotného výkonu se používají i další ukazatelé, které lépe popisují efektivitu FVE v čase nebo zohledňují povětrnostní podmínky jako je teplota a osvětlení panelu. Takovéto ukazatele definuje například norma IEC 61724-1 [7].

$$PR = \left(\sum_k P_{out,k} \cdot \tau_k \right) / \left(\sum_k \frac{P_0 \cdot G_{i,k} \cdot \tau_k}{G_{i,ref}} \right) \quad [-] \quad (2.1)$$

kdy:

τ_k ... doba trvání kroku k [h]

$P_{out,k}$... výkon v AC části FVE v kroku k [kW]

P_0 ... očekávaný (instalovaný) výkon v DC části FVE [kW]

$G_{i,k}$... intenzita slunečního záření v kroku k [kW/m²]

$G_{i,ref}$... intenzita slunečního záření pro P_0 [kW/m²]

Rovnice 2.1 je rovnice pro výpočet takzvaného výkonnostního poměru anglicky označovaného jako 'Performance ratio', který slouží k popisu celkového vlivu ztrát na výstup FV systému. Pro zpřesnění tohoto ukazatele se zavádí jeho úprava zohledňující také teplotu, jejíž výpočet je popsán rovnicí 2.2.

$$PR_{STC} = \left(\sum_k P_{out,k} \cdot \tau_k \right) / \left(\sum_k \frac{(C_k \cdot P_0) \cdot G_{i,k} \cdot \tau_k}{G_{i,ref}} \right) \quad [-] \quad (2.2)$$

$$C_k = 1 + \gamma \cdot (T_{mod,k} - 25^\circ C)$$

kdy:

γ ... relativní teplotní koeficient maximálního výkonu [°C⁻¹]

$T_{mod,k}$... teplota FV článku popř. panelu v kroku k [°C]

Pokud bychom chtěli tyto ukazatele používat k detekci poruch uvedených výše, tak je nejjednodušším způsobem porovnávat výkonnostní poměry v čase nebo se sousedními panely, stringy či vyššími celky. Druhou možností je vytvoření modelu, který bude na základě měření intenzity slunečního záření a teploty generovat srovnávací výkonnostní poměr pro každou část FVE samostatně.

2.3.4 Přístupy na bázi zpracovávání signálu

Tato skupina diagnostických metod obsahuje celou řadu možných způsobů detekce poruch. Přehled nejpoužívanějších metod je uveden v tabulce 2.2. Tyto metody ale nejsou příliš robustní pro samostatnou detekci. Spektrum bývá často zarušeno měniči FVE nebo indukovaným rušením, což ztěžuje diagnostiku ve frekvenční oblasti. Zároveň změny impedance způsobených povětrnostními podmínkami (např. vlhkost) ztěžují diagnostiku spojenou s LCR parametry stringu. Vhodné jsou tedy spíše jako doplňkové metody pro přibližnou lokalizaci poruch.

metoda	aplikace	stručný popis
Analýza ve frekvenční oblasti [1]	detekce vzniku oblouků (2.1.1)	použití Fourierovy transformace, vlnkové transformace nebo digitálních filtrů pro detekci vyšších harmonických jejichž zdrojem mohou být hořící oblouky
Reflektometrie v časové oblasti (TDR) [3]	lokalizace místa poruchy	reflektometrie je založena na injektování impulsu do typicky stringu a měření odraženého impulsu na rozhraní s rozdílnou impedancí, typicky přerušený obvod, zkrat nebo místo se zvyšující se impedancí (degradující FV článek či vadný konektor)
Reflektometrie rozprostřeného spektra (SSTD) [9]	lokalizace místa poruchy	stejně jako při reflektometrii v časové oblasti dochází k injekci, ale zde je místo pulsu do obvodu generován šum, který se při odražení vrací a pomocí autokorelace detekován
Měření zemní kapacity (ECM) [9]	lokalizace místa poruchy	na string lze nahlížet i jako na vedení s rozprostřenými parametry (sériový odpor a kapacita PN přechodu) a proto dochází při jeho přerušení ke snížení kapacity úměrné délce vedení

Tab. 2.2: Nejběžnější metody na bázi zpracování signálu

2.3.5 Přístupy na bázi strojového učení

Tak jako všemi odvětvími momentálně prostupuje strojové učení, někdy nevhodně nazýváno jako umělá inteligence, tak se tyto postupy uplatňují i pro oblast diagnostiky a prediktivní údržby zdrojových částí FVE. Samy o sobě techniky strojového učení nepřinášejí nový pohled ve smyslu jiného přístupu k získávání informace, ale pomáhají nám v měřených datech hledat závislosti, které by nemuseli být na první pohled patrné. Pro správnou detekci a primárně pak klasifikaci musíme zajistit dostatečné množství pestrých a správně anotovaných dat.

To není bohužel pro tuto práci možné, ale v rámci přehledového článku [9] je možné dohledat spoustu příkladů použití. Často používanými technikami jsou zde systémy založené na Fuzzy logice, Bayesovské klasifikátory nebo neuronové sítě pro klasifikaci poruch. Dalšími metodami používanými spíše pro detekci konkrétních poruch nebo jejich skupin jsou podpůrné vektorové stroje, rozhodovací stromy nebo modely založené na instančním učení jako je například kNN.

2.4 Sledované veličiny

Před definicí HW požadavků a výběrem vhodných komponent je nutné vybrat jaké veličiny bude monitorovací zařízení pro svou činnost sledovat. K rozhodnutí můžeme přistoupit na základě toho jaké poruchy chceme detekovat a jaká měření tedy budeme vyžadovat. Zároveň ale musíme počítat s tím, že zařízení bude umístěno v místě připojení stringu k busu. Při výběru také můžeme postupovat na základě normy IEC 61724-1, která definuje tři třídy monitorovacích zařízení pro FV systémy a potřebná měření pro danou třídu. Ty jsou vypsány ve zjednodušené tabulce, která je součástí příloh A.

Sledovanými veličinami budou:

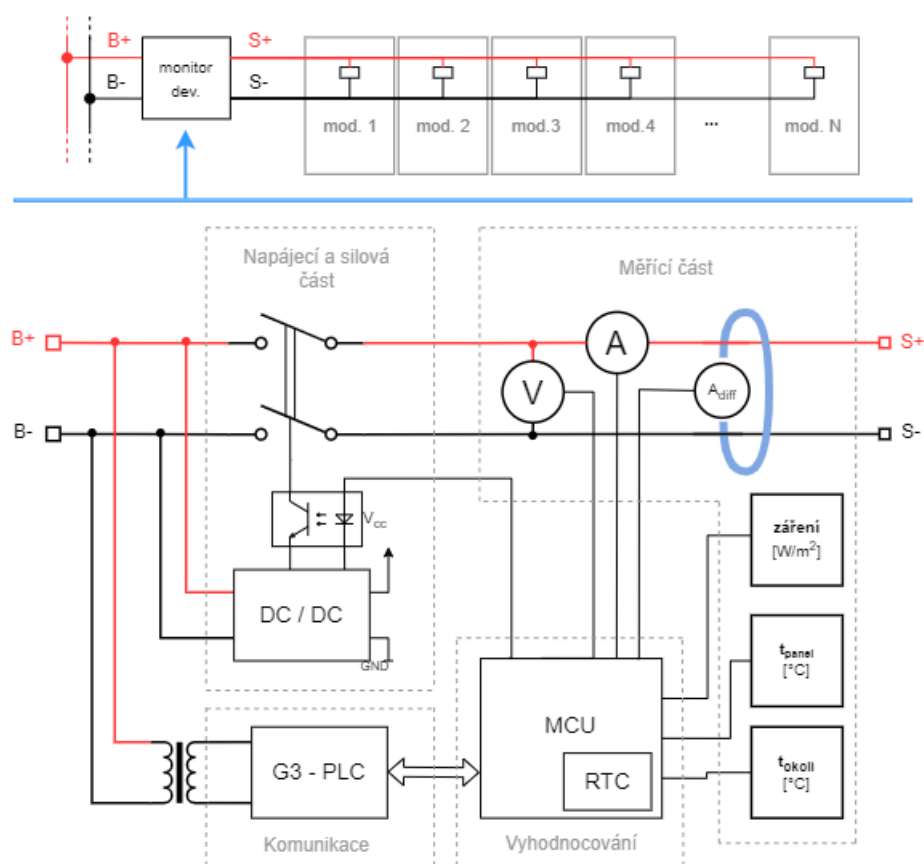
- napětí stringu [V] - napětí stringu může dosahovat až hodnoty $1500 V_{DC}$ pro měření tedy bude vhodné použít kromě děliče napětí i některý ze způsobů oddělení, aby vysoké napětí nezničilo použití A/D převodník
- proud stringu [A] - proud stringem se pohybuje běžně v rozmezí 0 až 10 A, popřípadě může proud při poruše téct i do stringu (záporná hodnota proud), vhodný převodník by měl pracovat v obou těchto stavech
- výkon stringu [kW] - pokud budou hodnoty napětí a proudu vzorkovány současně, bude možné výkon jednoduše určit jako jejich součin, pokud ale nebudou, bude nutné kompenzovat jejich fázový posun nebo použít samostatné měření
- sluneční záření [Wm^{-2}] - pro toto měření bude muset monitorovací zařízení použít speciální snímač nebo vytvořit vlastní s dostatečnou přesností
- teplota panelu [$^{\circ}C$] - teplota panelu může v ohnisku ohřevu dosahovat i více než $150^{\circ}C$ a proto je zapotřebí tyto sice lokální ale i tak vysoké teploty zohlednit při výběru vhodného snímače
- teplota okolí [$^{\circ}C$] - teplotní rozsah pro toto měření není limitující pro žádný z běžných snímačů teploty
- aktuální čas [s] - z pohledu diagnostiky by bylo vhodné, aby monitorovací zařízení obsahovalo obvod RTC, pro vytváření časových značek měřených hodnot a poruch

- energie stringu [kWh] - při znalosti výkonu a přesného času může monitorovací zařízení snadno vyhodnocovat i energii vyprodukovanou stringem
- rozdílový proud [A] - pokud bude mít měření rozdílového proudu mezi kladným a záporným terminálem stringu dostatečné rozlišení (alespoň v jednotkách miliampér), tak nám umožní detekovat svod po zemní smyčce a předcházet tak úrazům způsobeným dotykovým napětím na neživých vodivých částech instalace

3 Definice HW požadavků monitorovacího zařízení

Na základě výčtu měření (2.4), které by mělo monitorovací zařízení provádět budou v této kapitole definovány požadavky na jeho HW. Kromě samotného měření by mělo monitorovací zařízení odbavovat komunikaci se zbytkem systému a také odpojovat string v případě detekce poruchy, která odpojení vyžaduje. Těmi jsou například například zkrat na kostru (2.1.1) nebo zastínění stringu spojené s poruchou blokovací diody (2.1.2).

Na obrázku 3.1 je přehledové schéma HW monitorovacího zařízení v souladu s požadavky definovanými v následujících podkapitolách. Schéma je rozděleno do bloků dle funkce na část připojenou přímo ke stringu označenou jako silovou, měřící, vyhodnocovací a komunikační.



Obr. 3.1: Blokové schéma monitorovacího zařízení [1]

3.1 Realizace požadovaných měření

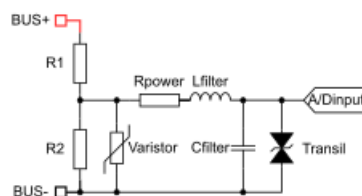
V jednotlivých podkapitolách je vždy na základě potřebného rozsahu, přesnosti a dalších klíčových parametrů zdůvodněn výběr vhodného snímače nebo snímačů pro sledovanou veličinu.

3.1.1 Elektrické napětí stringu

Pro měření napětí stringu je potřeba zvolit vhodný A/D převodník. Na stringu očekáváme napětí v rozmezí přibližně 0 až 1500 V, což pro rozlišení alespoň 1 V vyžaduje minimálně 11bitový A/D převodník. Použití externího A/D převodník se pro monitorovací neuvažuje, a proto musí být vhodný převodník součástí vyhodnocovací jednotky (3.4). Důvodem tohoto řešení je fakt, že v dnešní době obsahuje většina mikrokontrolerů A/D převodníky s více než deseti bitovým rozlišením a s vzorkovací frekvencí, která je více než dostatečná pro monitorovací zařízení všech tříd dle IEC 61724-1 [14].

A/D převodník uvnitř mikrokontroleru tedy eliminuje potřebu externího převodníku, ale zároveň zvyšuje riziko kladené na samotný mikrokontroler. Napětí stringu bude sníženo na měřitelnou úroveň odporovým děličem, ale dle IEC 61730-1 [7] by měly být zařízení pro FVE navrhována tak, aby vyhovovali stupni ochrany CAT III, což pro FV instalaci znamená transientní napětí až 8 kV.

Vstup do mikrokontroleru by měl tedy obsahovat dostatečnou přepětovou ochranu, jako například filtr kombinovaný s varistorem popřípadě i transilem, tak jak je naznačeno na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Přepětová ochrana MCU

3.1.2 Elektrický proud stringem

Při měření proudu stringem se pohybujeme v rozsahu měřených hodnot přibližně 0 až 10 A. Pro tento rozsah stejnosměrného proudu přicházejí v úvahu tyto měřicí metody:

- měření úbytku napětí na bočníku
- snímače a převodníky vycházející z Hallova jevu
- snímače a převodníky na bázi magnetorezistence

Pro námi volený rozsah proudů by musel být odpor bočníku v řádech miliohmů. S takto malým odporem by se v zapojení špatně pracovalo, a proto měření pomocí bočníku nebude dále uvažováno.

Snímače na bázi (GMR/AMR) magnetorezistence jsou při srovnání se snímače využívající Hallův jev přesnější a umožňují rychlejší měření. Nejsou bohužel tak rozšířené a limitující může být i rozsah.

parametr	ACS724LLCTR-20AB [15]	ACS70331EESA [16]
Výrobce	Allegro MicroSystems	
Princip	Hallův jev	GMR
Rozsah [A]	± 20	± 5
Citlivost [mv/A]	100	200
Celková chyba [%]	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$
Izolace V_{ISO} [V_{RMS}]	2400	500
Bandwith [kHz]	120	1000
Napájecí napětí [V]	5	3,3
Cena [Kč]	97,-	103,-

parametr	MCA1101-20-3 [18]	TMCS1123A5 [17]
Výrobce	ACEINNA	Texas Instruments
Princip	AMR	Hallův jev
Rozsah [A]	± 20	± 16
Citlivost [mv/A]	60	150
Celková chyba [%]	$\pm 0,6$	$\pm 1,75$
Izolace V_{ISO} [V_{RMS}]	4800	5000
Bandwith [kHz]	1500	250
Napájecí napětí [V]	3,3	5
Cena [Kč]	200,-	98,-

Tab. 3.1: Srovnání snímačů proudu

Při výběru byl zohledněn dostatečný rozsah, izolační vlastnosti a cena. Ostatní parametry byly pro tuto aplikaci vyhovující pro všechny snímače z tabulky 3.1. Pro monitorovací zařízení byl nakonec zvolen snímač ACS724LLCTR-20AB [15] a to i pro dobrou zkušenost se snímači od firmy Allegro MicroSystems.

3.1.3 Rozdílový elektrický proud

Rozdílový proud mezi kladným a záporným pólem stringu by bylo možné dopočítávat, pokud by se proudový snímač zvolený v předchozí kapitole (3.1.2) nainstaloval do obou větví stringu. Toto řešení by ale bylo zatížené příliš velkou chybou na to,

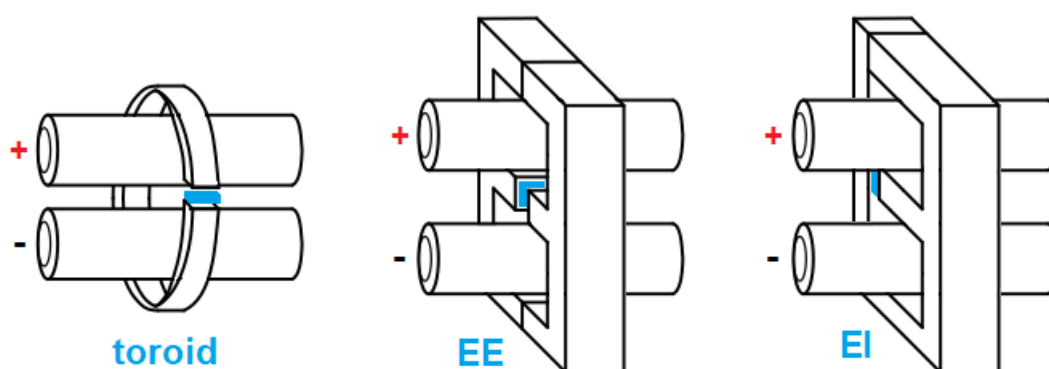
aby se dle něj dal detekovat svod (2.1.1) na úrovni jednotek miliampér, tak jak je požadováno.

Jelikož pracujeme s DC proudem, nemůžeme použít proudový transformátor tak, jako se používá například v proudovém chrániči. Můžeme ale použít existující alternativy, kterými by mohly být snímače typu:

- Flux-gate: princip rozvažování indukovaného napětí v sekundáru mag. polem
- Hallova sonda: využití Hallova jevu

Pokud do magnetického obvodu snímačů uzavřeme oba výstupní vodiče stringu, tak se jejich magnetické pole odečte a my budeme schopni měřit na mnohem menším rozsahu a tedy i s větší citlivostí. Změřený proud by měl být již z principu měření roven svodovému proudu. Pokud zvolíme při vyhodnocení vhodný práh, který může být doplněn o průměrování pro snížení chyby měření, můžeme tak vytvořit ekvivalent proudového chrániče pro DC proud s vybavovací hodnotou v jednotkách miliampér. Pro realizaci měření svodového proudu (zkratu na kostru) byl vybrán snímač typu flux-gate T60404N4641X900 [19]. Tento snímač je se svou citlivostí až 0,2 mA plně dostačující. Výstupem jsou pak buď vybavovací výstupy s otevřeným kolektorem, které spínají při 6 mA a 30 mA, nebo PWM výstup jehož střída odpovídá s chybou 3,33 %/mA rozdílovému proudu.

Druhou možností je vyvinout vlastní snímač dle náčrtu na obrázku 3.3 za pomoci vhodného magnetického obvodu (jádra) s vloženou Hallovou sondou, jejíž pozice je na obrázku naznačena modrou barvou. Vhodným jádrem může být toroidní jádro se vzduchovou mezerou nebo kombinace jader EI či lepší symetrická EE se vzduchovou mezerou.

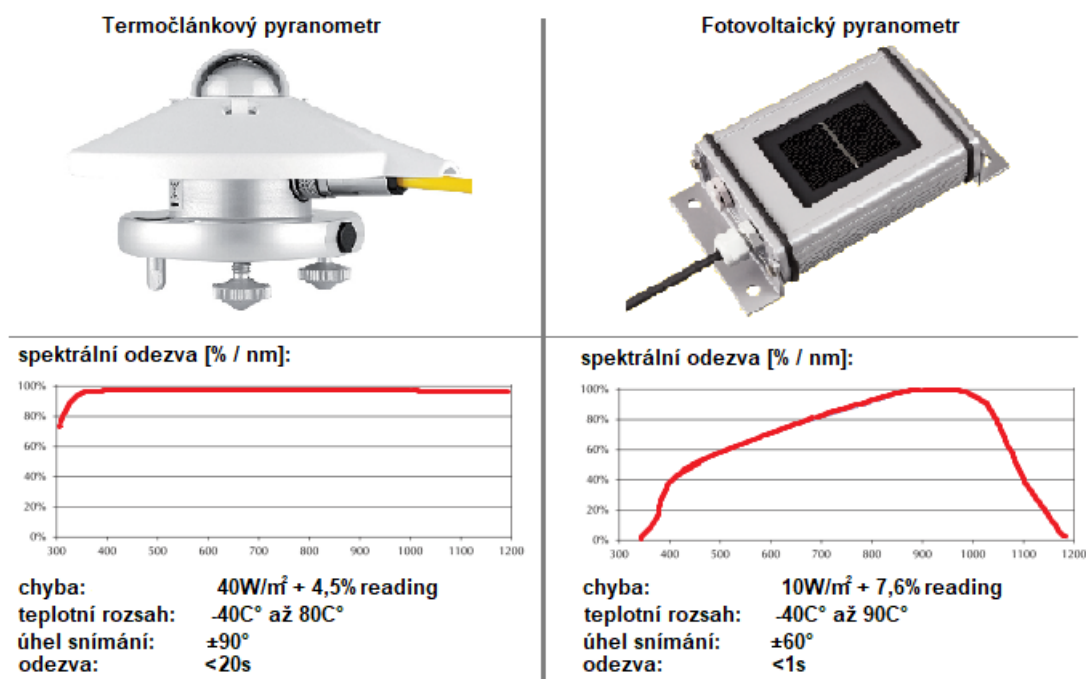


Obr. 3.3: Návrh snímače rozdílového proudu s Hallovou sondou

3.1.4 Referenční hodnota osvitu

Nejdůležitější neelektrickou veličinou pro monitorování zdrojové části FVE je bezpochyby intenzita slunečního záření. Tato veličina se vyčísluje jako aktuálně dopadající výkon na jednotku plochy. Norma IEC 61724-1 rozlišuje sluneční záření na celkové G_i či POA , přímé a difúzní GHI , přímé normální DNI a difúzní horizontální G_d či DHI . Pro výpočet očekávaného výkonu FV panelu a dalších výkonových metrik (2.3.3) se používá velikost celkového slunečního záření G_i , které je sumou přímo dopadajícího, difúzního a od země odraženého záření [14]. Ostatní typy slunečního záření se používají jako ukazatele pro zvyšování účinnosti FVE, které umožňují například naklánění FV panelů pro maximalizaci dopadajícího záření.

Pro měření intenzity slunečního záření se používá přístroj zvaný pyranometr. Tento měřicí přístroj vyhodnocuje intenzitu slunečního záření na základě tepelných účinků, kdy o intenzitě rozhoduje teplotní rozdíl mezi osvětlenými a zastíněnými sektory termočlánků. Pyranometry mají širokou spektrální odezvu s konstantním útlumem a používají se tedy jako certifikovaná měřidla v radiometrii. Druhým způsobem měření slunečního záření jsou moduly s referenčním FV článkem někdy označované jako fotovoltaické pyranometry. Tyto moduly nejsou tak přesné ani teplotně stálé jako pyranometry, ale uvnitř FVE se používají častěji. Důvodem je nižší cena a totožná spektrální a teplotní odezva při použití referenčního FV článku ze stejného materiálu jako u panelů FVE.



Obr. 3.4: Srovnání termočlánkového [20] a fotovoltaického [21] pyranometru

Pro monitorovací zařízení je hodnota celkového slunečního záření G_i důležitá z pohledu diagnostiky, a to pro výpočet výkonnostního poměru PR (2.3.3) a dalších ukazatelů. Jelikož jsou pro detekci poruch důležitější spíše trendy těchto ukazatelů než aktuální hodnoty, tak není pro monitorovací zařízení kritické měření G_i s vysokou přesností.

Z důvodu úspory by tedy bylo pro monitorovací zařízení vhodné navrhnout vlastní snímač intenzity slunečního záření, který by byl termočláňkovým či fotovoltaickým pyranometrem následně kalibrován. Takovýto snímač by mohl využívat některé ze součástek citlivých na světlo jako například fotorezistor, který byl použit pro vývoj snímače v rámci článku [22] a byla s ním dosažena shoda $91,41\%$ s referenčním pyranometrem. Ještě lepších výsledků pak dosahují snímače vytvořené z malých FV článků jako je například ten z článku [23], kde bylo dosaženo shody s referenčním měřením až $99,94\%$. Kromě samotných fotocitlivých součástek jsou na trhu dostupné i IO pro měření záření. Příkladem je multi-spektrální senzor AS7343L [24], který je citlivý na vlnové délky v rozsahu 380 až 1000 nm.

3.1.5 Teplota FV panelu a okolí

Druhou veličinou, která má vliv na účinnost a dodávaný výkon FV panelu je teplota. Kvůli možnosti srovnání teplot se u monitorovacího zařízení počítá s umístěním dvou snímačů teploty. Jeden bude umístěn uvnitř monitorovacího zařízení a bude sloužit pro měření teploty okolí. Snímač by měl být umístěn tak, aby hodnotu teploty nezakresloval vlastní ohřev uvnitř monitorovacího zařízení. Druhý snímač bude přilepen na zadní stranu nejbližšího panelu a bude sloužit pro přibližné měření teploty všech panelů v rámci stringu. Pro měření teploty okolí byl zvolen IO TCN75A [25]. Jedná se o digitální teploměr s komunikačním rozhraním I²C pro rozsah teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s typickou přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z důvodu použití tohoto snímače by měla vyhodnocovací jednotka obsahovat periférii pro odbavování komunikace po I²C.

Stejný snímač byl pak zvolen i pro měření teploty panelu, i když by mohla měřená teplota překročit měřicí rozsah snímače. Důvodem je požadavek na srovnávání teploty okolí a FV panelu. Pokud budou použity totožné snímače, lze předpokládat, že měření budou zatížena přibližně stejnou chybou. To znamená, že by chyba neměla mít velký vliv na porovnávání teplot mezi panelem a okolím, jelikož by měla být pro obě měření stejná nebo se přímo odečte, pokud budeme zjišťovat rozdíl těchto teplot. Pro omezení způsobené horním limitem rozsahu snímače na $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze počítat s tím, že je málo pravděpodobné, aby se přehřátý FV článek nacházel přímo nad snímačem a zároveň i kdyby FV článek dosáhl teploty vyšší než je $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, která je pro IO stále bezproblému měřitelná, mělo by monitorovací zařízení již zareagovat a takovýto panel, respektive string odpojit nebo alespoň varovat před možným pře-

hřátím (2.1.3). Možnou překážkou pro použití tohoto IO k měření teploty panelu by ale mohla být délka sběrnice I²C. Ta se totiž používá jen pro komunikaci na krátké vzdálenosti typicky na desce plošných spojů. Sběrnice není limitovaná přímo délkou vodičů, ale jejich vzájemnou kapacitou, která by neměla překročit 400 pF. S tímto omezením je třeba počítat jak při návrhu modulu pro měření teploty panelu, tak při jeho následné instalaci. Připojení sběrnice k MCU by také mělo obsahovat dostatečnou přepětovou ochranu podobně jako u připojení A/D převodníku (3.1.1).

3.2 Realizace silových obvodů

Silovými obvody v této kapitole jsou části monitorovacího zařízení, které jsou připojeny přímo k stringu. Konkrétně se jedná o odpojovače stringu od busu a popřípadě další obvody pro měření na stringu.

Odpojovače by měly sloužit k dálkovému odpojení a uvést tak string do režimu izolované soustavy. Dle bezpečnostních požadavků definovaných ve standardu NEC článku 690 národní asociace požární ochrany NFPA by měly odpojovače splňovat následující požadavky [8]:

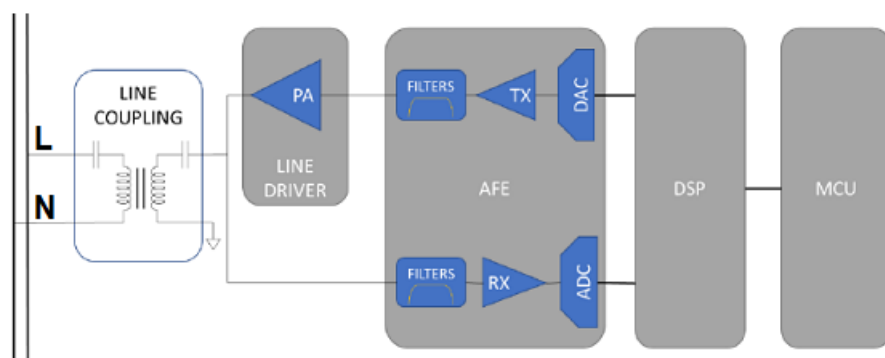
- Odpojovač musí být dimenzován alespoň na hodnoty zkratového proudu a napětí naprázdno.
- Odpojovač se musí automaticky rozepnout v případě výpadku řídicího signálu.
- Odpojovače by měly přerušovat všechny připojené nezeměnné proudové cesty, to znamená kladnou i zápornou větev stringu.
- Odpojovač musí být přímo přístupný operátorům nebo instalován na flexibilních spojkách, aby je bylo možné posunout.
- Odpojovače musí být izolované nebo při montáži izolovatelné tak, aby odolávaly povětrnostním podmínkám.
- Každý odpojovač by měl být permanentní označen jednoznačným popisem (např. "ODPOJENÍ FV SYSTÉMU") nebo podobným a měl by indikovat svůj stav sepnuto/rozepnuto.

Odpojovače vyhovující nárokům kladeným článkem 690 standardu NEC by mohly být dvojice odpojovačů P115 Mini-Tactor [26] popřípadě varianta P126 určená pro montáž na desce plošných spojů. Odpínač obsahuje jeden spínací kontakt ovládaný cívkou na 12, 24 či 48 V pro spínání/rozpínání 1500 V_{DC} a kontinuální proud 50 A. Obvody pro další měření na stringu by se pak měly být schopné připojit ke stringu a umožnit měření odporu pro možné detekování poruch usměrňovacích diod (2.1.2) popřípadě některá z měření pro lokalizaci poruch na základě TDR nebo ECM (2.2).

3.3 Realizace komunikačního rozhraní

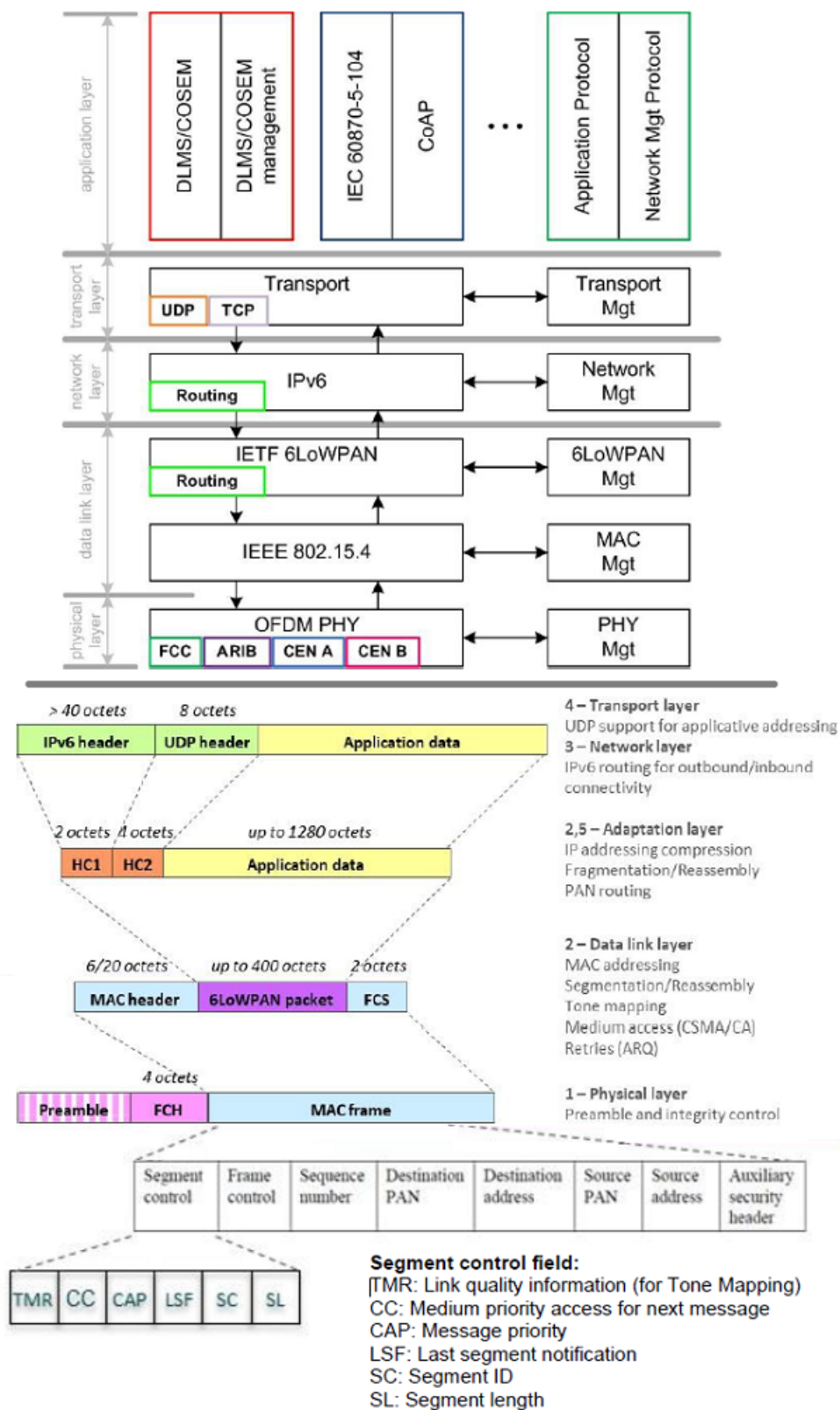
Zadání na tvorbu monitorovacího zařízení počítá s komunikací s nadřazeným systémem, popřípadě mezi sebou pomocí komunikačního standardu G3-PLC.

Standard G3-PLC, dále už jen PLC, definuje vysokorychlostní a robustní komunikační kanál na velké vzdálenosti po stávající rozvodné síti. Pro komunikaci na fyzické vrstvě se využívá širokopásmová (3 až 500 kHz) OFDM modulace, která paralelně dělí digitální informaci do více subnosných frekvencí. Na tyto subnosné jsou pak jednotlivé bity modulovány pomocí některé z rodiny fázových modulací PSK. Pro linkovou vrstvu pak PLC používá 6LoWPAN, což je zkrácené označení pro nízkopříkonové bezdrátové osobní IPv6 síť. PLC tedy nativně podporuje protokol IPv6 a je tak univerzálním řešením pro inteligentní rozvodné sítě (SmartGrid). Na obrázku 3.6 níže je pak naznačena struktura PLC komunikace pokrývající fyzickou, linkovou a částečně síťovou (MAC) vrstvu OSI modelu a tomu odpovídající skladbu paketu pro PLC síť. Samotná síť je pak tvořena takzvanými PAN-zařízeními, z nichž každé má svůj vlastní 16bitový identifikátor. Každá síť má pak ještě svého PAN-koordinátora, který umožňuje na základě identifikátorů připojení PAN-zařízení, udržuje síť aktivní a také zprostředkovává spojení s externími sítěmi nebo podsítěmi v rámci rozsáhlé PLC sítě. [27]



Obr. 3.5: Obvodové schéma zapojení G3-PLC modemu [27]

Pro realizaci PLC modemu je dle schématu 3.5 zapotřebí galvanické oddělení, výstupní budič linky, analogové zpracování, signálové zpracování pro demodulaci a část spravující PLC protokol. Pro realizaci PLC modemu v rámci zařízení byl zvolen IO SM2400 [28], který obsahuje fyzickou vrstvu s modulací OFDM a budičem, dále linkovou vrstvu pro G3-PLC a PRIME, vhodnou jednotku pro šifrování dat a komunikační rozhraní UART a SPI pro připojení hostovského procesoru v případě monitorovacího zařízení vyhodnocovací jednotky. Dále bude tedy monitorovací zařízení potřebovat jen vhodné oddělení pro připojení k busu FVE.



Obr. 3.6: Typický model a skladba paketů G3-PLC komunikace [27]

3.4 Realizace vyhodnocovací jednotky

Jako vyhodnocovací jednotka byl zvolen mikrokontroler STM32F415. Tento 32bitový mikrokontroler splňuje všechny výše uvedené nároky na periferie i výpočetní výkon. Zároveň disponuje dostatečně velkou pamětí, a to i pro ukládání dlouhých IPv6 paketů, přijímaných z PLC sítě nebo ukládání měřených údajů při výpadku PLC sítě. Mikrokontroler v sobě také integruje požadovaný obvod RTC pro přesné měření času. Kompletní popis mikrokontroleru lze nalézt v katalogovém listu [29] a manuálu [30].

Základní charakteristika mikrokontroleru STM32F415:

- Jádro ARM 32-bit Cortex-M4 CPU s FPU
- Pracovní frekvence až 168 MHz
- Integrovaný Watchdog a RTC
- 1 MB paměti typu Flash
- 192 + 4 kB paměti typu SRAM
- 512 B jednorázově programovatelné paměti
- Až 140 vstupně-výstupních linek
- 3× 12bitový A/D převodník s možností souběžného vzorkování
- 2× 12bitový D/A převodník
- 16× DMA stream (kanál)
- 17× univerzální časovač
- 3× rozhraní I²C
- 4× rozhraní USART
- 3× rozhraní SPI
- 2× rozhraní CAN
- 2x rozhraní pro USB 2.0
- 1× rozhraní pro Ethernet 10/100
- Generátor náhodných čísel
- Jednotka pro výpočet CRC
- Jednotka pro akceleraci šifrování
- Podpora lazení pomocí JTAG

4 Rozšiřující požadavky na HW

Tato práce navazuje na semestrální práci, jejímž cílem bylo na základě nejčastějších poruch FVE vydefinovat požadavky na HW pro monitorovací zařízení. V průběhu vývoje zařízení byla navržena další rozšíření HW, která jsou popsány v následujících podkapitolách. Tyto změny se týkají vyhodnocovací jednotky a silových obvodů.

4.1 Oddělení měření a komunikace

Hlavním rozšířením požadavků na HW bylo rozšíření vyhodnocovací jednotky (3.4). Ta měla být původně tvořena pouze mikrokontrolerem STM32F415, který měl zprostředkovávat jak komunikaci, tak i samotné měření. V novém návrhu bude tento mikrokontroler společně s IO SM2400 sloužit pouze jako PLC modem a měření budou realizována pomocí mikrokontroleru TMS320F28069 od Texas Instruments. Tento čip je součástí řady mikrokontrolerů C2000 vhodných pro real-time aplikace, kterými je například zpětnovazební řízení nebo online zpracování signálu. Klíčovými parametry tohoto mikrokontroleru jsou:

- Jádru TMS320C28x s FPU
- Jádru CLA pro akceleraci real-time výpočtů
- Pracovní frekvence 90MHz
- 256 kB paměti typu Flash
- 100 kB paměti typu RAM
- 2 kB jednorázově programovatelné paměti
- 12bitový A/D převodník s dvojitým vzorkováním
- 3× DMA stream (kanál)
- 3× běžný časovač
- 8× časovač s podporou Pulse-Width modulation
- 4× časovač s podporou High-Resolution capture
- 2× rozhraní USART
- 1× rozhraní I²C
- Podpora lazení jader C28x a CLA pomocí JTAG

Bližší informace lze pak dohledat v katalogovém listu [31] či manuálu [32].

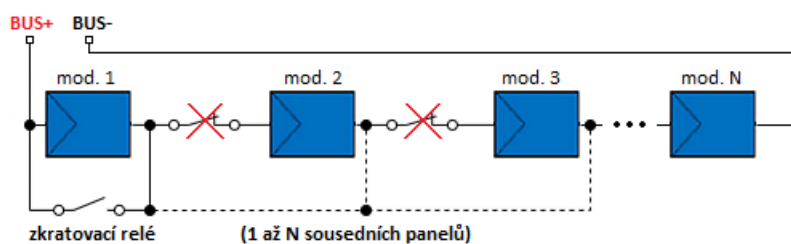
Důvodem oddělení měřicí a komunikační části vyhodnocovací jednotky byl požadavek na možné rozšíření pro online vyhodnocování proudového, popřípadě napětového obrazu ve frekvenční doméně. Zahoření oblouku (2.1.1) by tedy bylo detekovatelné dříve, než je běžné u komerčních řešení, které oblouky detekují až při nárůstu teploty v kontaktech nebo jejich okolí [2].

4.2 Funkce Rapid-shutdown

Druhé rozšíření se týká silových obvodů (3.2), konkrétně odpojovačů. V původním návrhu mělo docházet při poruše k odpojení celého stringu. Nový návrh počítá s podporou funkce Rapid-shutdown definované v standardu NEC [8]. Zařízení realizující tuto funkci musí zajistit:

- uvedení do stavu nízkého napětí do 30 sekund od poruchy
- nízké napětí uvnitř stringu - hodnoty do 80 V
- nízké napětí mimo string (bus) - hodnoty do 30 V
- možnost dálkového odpojení

Navrhovanou možností realizace je použití zkratovacích relé pro jeden nebo více sousedících panelů ve stringu. Na rozdíl od běžně dostupných řešení jako jsou například odpojovače BENY BFS-21 [33] by toto řešení nevnikalo přímo do stringu další kontakty. Relé by se připojovala paralelně tak, jak je naznačeno na obrázku 4.1. Každé zkratovací relé by muselo být dimenzováno na maximální proud stringu a napětí odpovídající součtu napětí sousedících zazkratovaných panelů. Pro příklad zkratování jednoho panelu by mělo být relé dimenzováno na přibližně 10 A_{DC} a 40 V_{DC}.



Obr. 4.1: Použití zkratovacích relé ve funkci Rapid-shutdown

Použití takového řešení by nemělo mít na panely negativní vliv, protože zazkratování i při plném osvětlení by nemělo způsobit takovou výkonovou ztrátu, která by panel poškozovala (viz. bod maximálního proudu VA charakteristika na obrázku 2.10). Zároveň by toto řešení mohlo snížit nároky na relé odpojující string od busu (3.2), protože napětí celého stringu by při zazkratování řádově snížilo napětí stringu nebo by se mohlo zazkratování panelů využít i při vizuální inspekci stavu panelů (2.2).

5 Implementace SW vybavení

V následujících kapitolách je popsána implementace řídicího FW pro měřicí část realizovanou mikrokontrolerem TMS320F28069 a komunikační část složenou z mikrokontroleru STM32F415 a IO SM2400.

Pro zachování jednotného stylu s ostatním SW vybavením a to primárně s tím, které slouží k obsluze periférií mikrokontrolerů, ctí funkce realizující jejich obsluhu styl POSIX. Důvodem je mimo vyšší přehlednost také možnost zařazení těchto funkcí mezi drivery firmy ModemTec používané pro práci nejen s mikrokontrolery ale i jinými platformami a zařízeními. Obecný popis driverů, který odpovídá stylu POSIX v programovacím jazyce C, je součástí přílohy B.

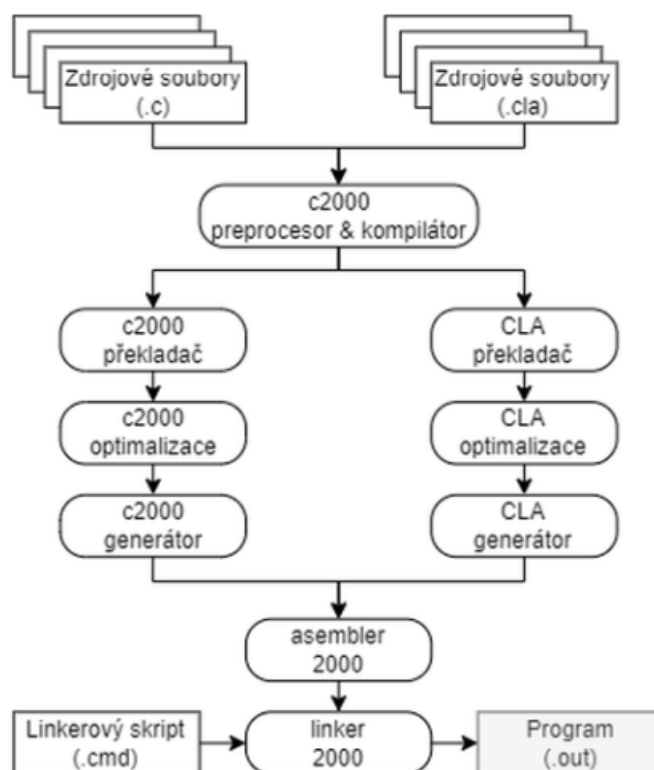
5.1 Mikrokontroler TMS320F28069

Jak bylo již zmíněno ve stručném popisu mikrokontroleru (4.1), TMS320F28069 je dvoujádrový mikrokontroler, respektive obsahuje jádro CLA sloužící k akceleraci výpočtů v reálném čase. Ačkoliv mají obě jádra mikrokontroleru sdílený paměťový prostor a mohou obsluhovat stejné periferie, tak nemají stejnou instrukční sadu nebo shodné datové typy. Nejdůležitější rozdíly mezi oběma jádry mikrokontroleru při jejich programování v jazyce C jsou popsány v tabulce 5.1.

rozdíly	jádro C28x	jádro CLA
podpora standardních knihoven	ano	ne
podpora dynamické alokace paměti	ano	ne
zásobník	vlastní	nahrazen částí RAM
inicializace globálních proměnných	automatická	manuální
rekurze a ukazatele na funkce	ano	ne
bitová šířka ukazatele	22bit	16bit
bitová šířka datového typu <i>int</i>	16bit	32bit
bitová šířka datového typu <i>float</i>	32bit	32bit

Tab. 5.1: Porovnání jader mikrokontroleru TMS320F28069 [34]

Pro mikrokontrolery řady C2000, kterým je i TMS320F28069, je nejběžnějším způsobem programování použití vývojového prostředí Code Composer Studio. Jedná se o vývojové prostředí vycházející z prostředí Eclipse rozšířené o nástroje pro programování a lazení mikrokontrolerů od výrobce Texas Instruments. Toto prostředí používá vlastní kompilátor, který zajišťuje správný překlad jak pro běžná jádra C28x, tak i pro jádra CLA. Průběh kompilace je naznačen na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Překlad programu v prostředí Code Composer Studio [34]

Prostředí odlišuje zdrojové soubory pro CLA jádro na základě koncovky *.cla*, popřípadě pomocí příznaku pro překlad v nastavení projektu. Při samotném překladu těchto zdrojových souborů je pak vyvolán speciální překladač pro omezenou instrukční sadu jader CLA. Následně jsou oba překlady do assembleru sloučeny a na základě linker skriptu namapovány do paměti.

Druhým důležitým prvkem vývojového prostředí Code Composer Studio je integrace vývojářské sady C2000Ware. Jedná se o balík obsahující dokumentaci, SW implementovaný v jazycích C a assembler a soubor vzorových řešení pro mikrokontrolery z rodiny C2000. Na své nejnižší úrovni definuje struktury pro přístup k registrům periférií a jádra mikrokontroleru. Nad těmito strukturami poté implementuje knihovní funkce pro práci s perifériemi. Dále C2000Ware obsahuje knihovní funkce pro digitální zpracování signálu, digitální řízení, běžné matematické funkce, komunikaci (USB, Ethernet, EtherCAT), kryptografii a podporu operačního systému reálného času FreeRTOS.

Použitý mikrokontroler TMS320F28069 je z druhé generace čipů C2000, pro které neexistují v rámci C2000Ware knihovní funkce pro obsluhu periférií ale pouze struktury pro přístup k jejich registrům, které jsou stručně popsány v příloze C. Tyto funkce tedy bylo nutné vytvořit a jejich zdrojové kódy ve verzi aktuální k datu odevzdání této práce jsou součástí elektronických příloh (viz. seznam v příloze E).

5.1.1 Program pro jádro CLA

Jádro CLA bude sloužit pro zpracování dat z A/D převodníků, kterými jsou souběžně navzorkované hodnoty proudu a napětí stringu a odpor, respektive napětí na odporovém děliči s fotorezistorem pro výpočet referenční hodnoty osvitu panelu.

Program pro CLA jádro se dělí do takzvaných tasků. Jedná se o rutiny, které se spouštějí dle stanovené priority. Podobně jako rutiny přerušení jsou tasky spouštěné na základě události, kterou může být buď softwarové vynucení nebo signál od periferie. V případě monitorovacího zařízení je spouštěcím signálem start A/D převodu. Druhou podobností tasku a rutiny přerušení je implementace v podobě funkce bez vstupních argumentů a bez návratové hodnoty. Pro účely předávání argumentů a návratových hodnot slouží dvě fronty v předem stanovené části paměti RAM. Fronta z jádra CLA pro výsledky a fronta do jádra CLA pro argumenty. Proměnné argumentů a výsledků musí být namapovány právě do těchto front. Ostatní proměnné jako například konstanty a podobně musí být také namapovány a to do části RAM, ke které má periferie CLA jádra přístup a je nutné je inicializovat buďto pomocí hlavního jádra C28x, které musí mít povolený přístup do paměti RAM CLA jádra nebo pro inicializaci vyhradit task softwarově spouštěný v úvodu programu.

Zpracování hodnot z A/D převodníku

Při zpracování dat z A/D převodníku se v obou případech postupuje podobně. Při spuštění tasků, které jsou popsány v tabulce 5.2, způsobené začátkem A/D převodu se nejdříve posunou předchozí výsledky převodů ve frontě tak, že vzorek N je nahrazen vzorkem $N-1$. Po posunutí všech vzorků ve frontě a dokončení A/D převodu se vyčte 12bitový výsledek z příslušného datového registru převodníku a následně je převeden na inženýrskou veličinu dle vztahu:

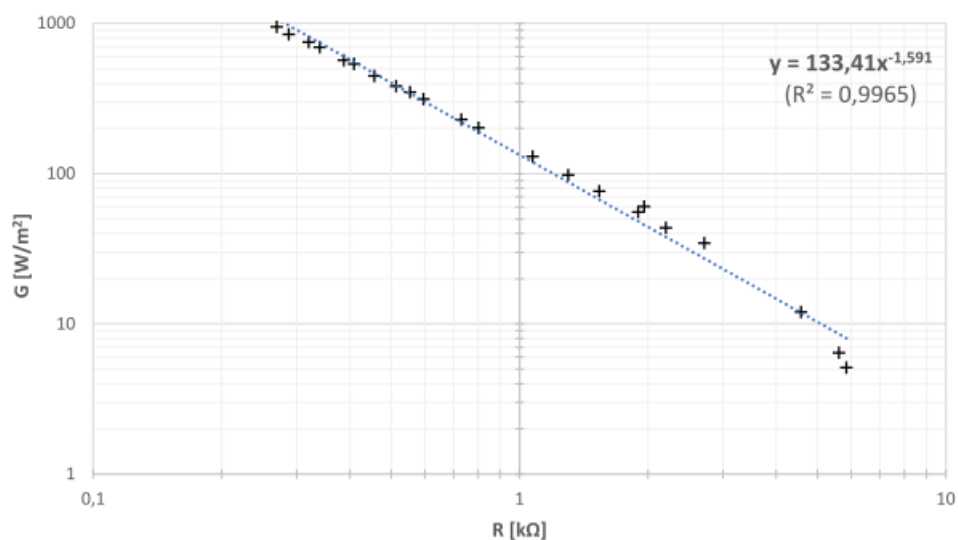
$$sample = ((float)ADC_{12bit} \times scale) + offset$$

Takto získaný vzorek odpovídá nejnovější měřené inženýrské hodnotě. V případě CLA-tasku 1 je inženýrskou hodnotou přímo napětí a proud stringu a tak se po převodu vloží na první pozice výstupní fronty. V případě CLA-tasku 2 se jedná o nepřímé měření osvitu a je nutné změřený odpor fotorezistoru na referenční hodnotu osvitu panelu převést. V obou případech ale fronta slouží k průměrování výsledků.

Na základě srovnávacího měření provedené kolegou Ing. Janem Petrovem z VŠB–TU Ostrava byla stanovena převodní charakteristika odporu na osvit, která je vynesena v grafu na obrázku 5.2. Při měření byl použit fotorezistor GL5528 [35], referenční měřící jednotka osvitu Voltcraft PL-110SM [36] a jako zdroj světla halogenová žárovka. Pro zlepšení přesnosti referenční hodnoty osvitu bude vhodné tato měření opakovat při osvitu slunečním světlem o intenzitě 0 až 1000 W/m².

CLA-task 1 (MVECT1)	
spuštění	start A/D převodu - SOC kanál 1
funkce	<i>void adcCla_VAProcessTask(void);</i>
argumenty	<i>float adcCla_VAInput[2][N];</i>
konstatny a parametry	<i>float adcCla_currentScale;</i> <i>float adcCla_currentOffset;</i> <i>float adcCla_voltageScale;</i> <i>float adcCla_voltageOffset;</i> <i>float adcCla_arcFilterNumCoefs[8][M];</i> <i>float adcCla_arcFilterDenCoefs[8][M];</i>
návratové hodnoty	<i>float adcCla_VAResult[2];</i> <i>float adcCla_arcFilterOutputs[M];</i>
CLA-task 2 (MVECT2)	
spuštění	start A/D převodu - SOC kanál 2
funkce	<i>void adcCla_irrProcessTask(void);</i>
argumenty	<i>float adcCla_irrInput[N];</i>
konstatny a parametry	<i>float adcCla_irrScale;</i> <i>float adcCla_irrOffset;</i> <i>float adcCla_irrExp;</i> <i>float adcCla_irrMult;</i>
návratové hodnoty	<i>float adcCla_irrResult;</i>

Tab. 5.2: Seznam použitých CLA tasků

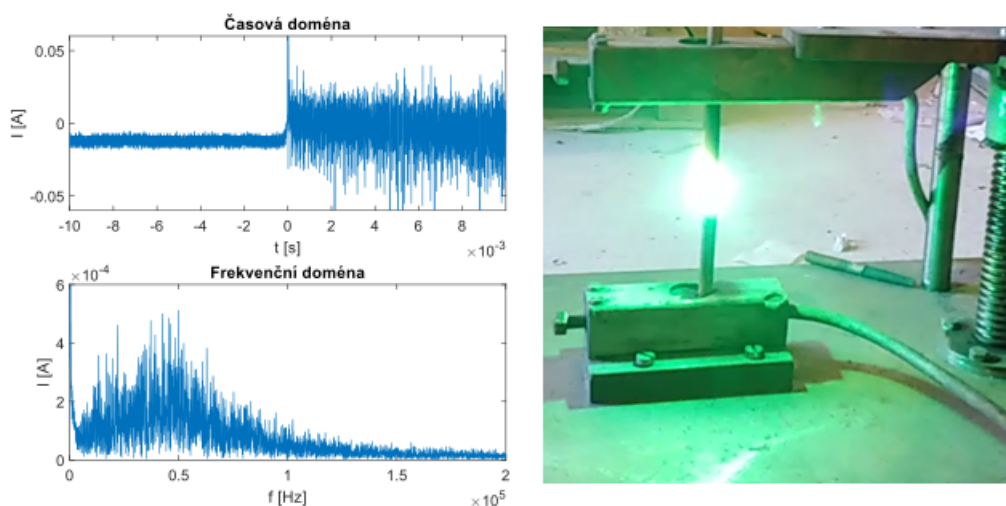


Obr. 5.2: Závislost hodnoty osvitu na odporu fotorezistoru [1]

Detekce zahoření oblouku

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.4, tak jedním ze způsobů detekce elektrických oblouků je analýza proudu, popřípadě napětí stringu ve frekvenční doméně.

Pro analýzu byla data opět naměřená kolegou Janem Petrovem. Ukázka toho jak oblouk na FVE může vypadat a jak se projeví v časové a frekvenční doméně je možné vidět na obrázku 5.3. Výsledky dalších měření jsou součástí přílohy D.



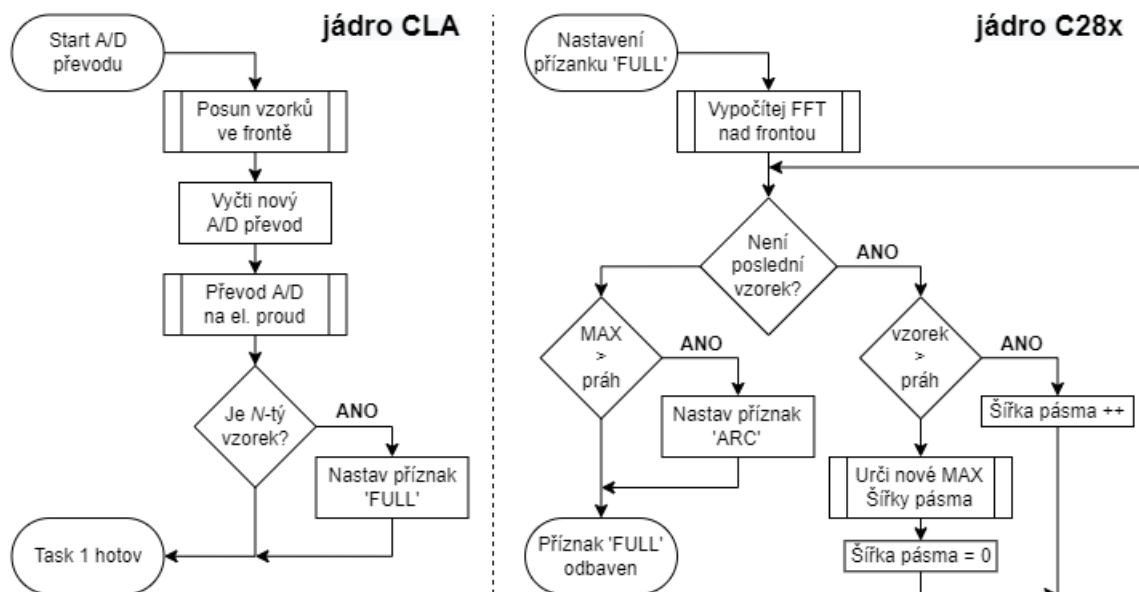
Obr. 5.3: Měření pro detekci zahoření oblouku [1]

Měření byla prováděna na malé FVE s šesti solárními panely a střídačem Huawei SUN2000 [37]. Pro vytvoření oblouků byl použit přípravek s posuvným jiskřištěm a pro měření proudu byl použit osciloskop DSOX3034A [38] s proudovou sondou.

Z měření je patrné že oblouk, jak při proražení elektrické pevnosti, tak i při samotném hoření, generuje šum v oblasti do 150kHz s maximem okolo 40kHz. Zároveň je ale potřeba počítat s vyššími harmonickými, které mohou být ve FVE generované střídači (viz. příloha D) nebo naindukované ve stringu z okolí. Z tohoto důvodu nestačí pouze detekovat přítomnost vyšších harmonických, ale je potřeba zjistit, zda je jejich zdrojem zahoření oblouku. Hlavním rozdílem mezi spektrem oblouku a vnějším rušením je šířka spektra. Vnější zdroje generují rušení na určitých frekvencích, kdy například pro střídače platí, že to jsou násobky spínací frekvence střídače. Oproti tomu šum způsobený obloukem je generován v celém intervalu do 150 kHz. K odlišení zahoření oblouku od vnějšího rušení je tedy potřeba sledovat celý interval spektra nebo spektrum rozdělit do více intervalů a následně tyto intervaly vyhodnocovat odděleně. Na základě kombinace výsledků v jednotlivých částech odlišit oblouk s vlivem ve všech částech od vnějšího rušení působící jen v některých.

Pro samotnou implementaci detekce zahoření oblouku byly navrženy dva algoritmy popsané diagramy na obrázcích 5.4 a 5.5.

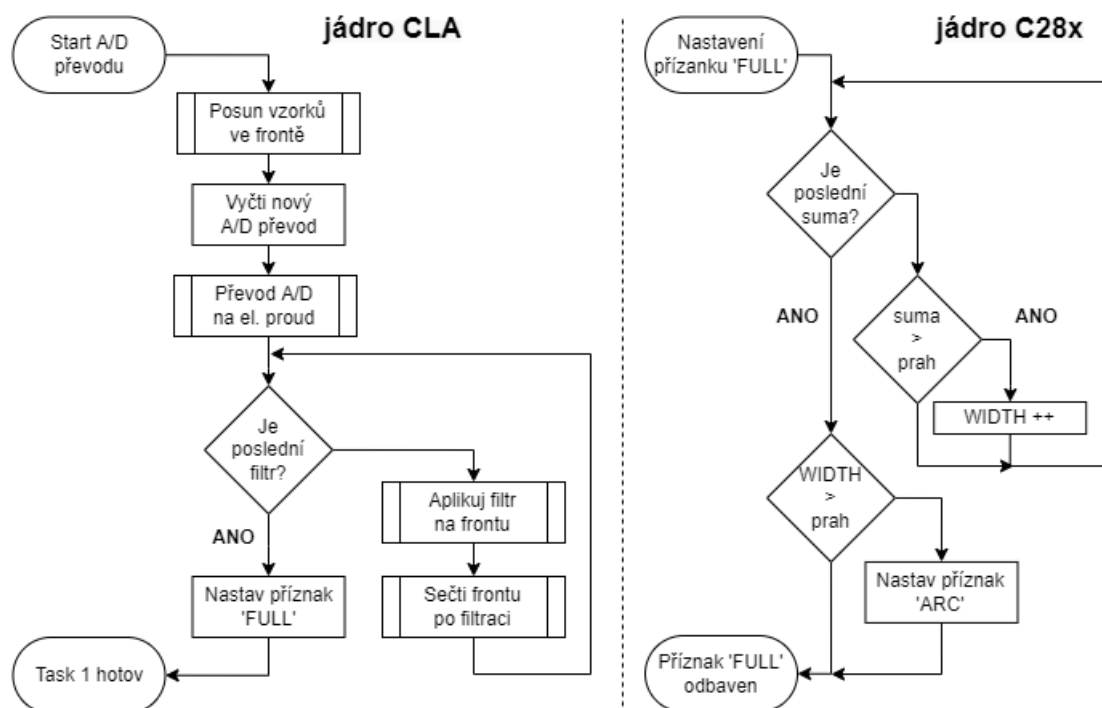
První vychází z Fourierovy transformace proudového obrazu. Po naměření a převodu N vzorků CLA jádro signalizuje naplnění fronty jádru C28x, které vyvolá funkci pro výpočet Fourierovy transformace. Spektrum je následně naprahováno v intervalu do 150kHz. Z naprahovaného spektra je pak odečtena nejdelší šířka spektra rušení, která určí, zda se jedná o širokospektrální šum způsobený zahořením oblouku nebo o úzkospektrální vnější rušení.



Obr. 5.4: Popis detekce oblouku využívající Fourierovu transformaci

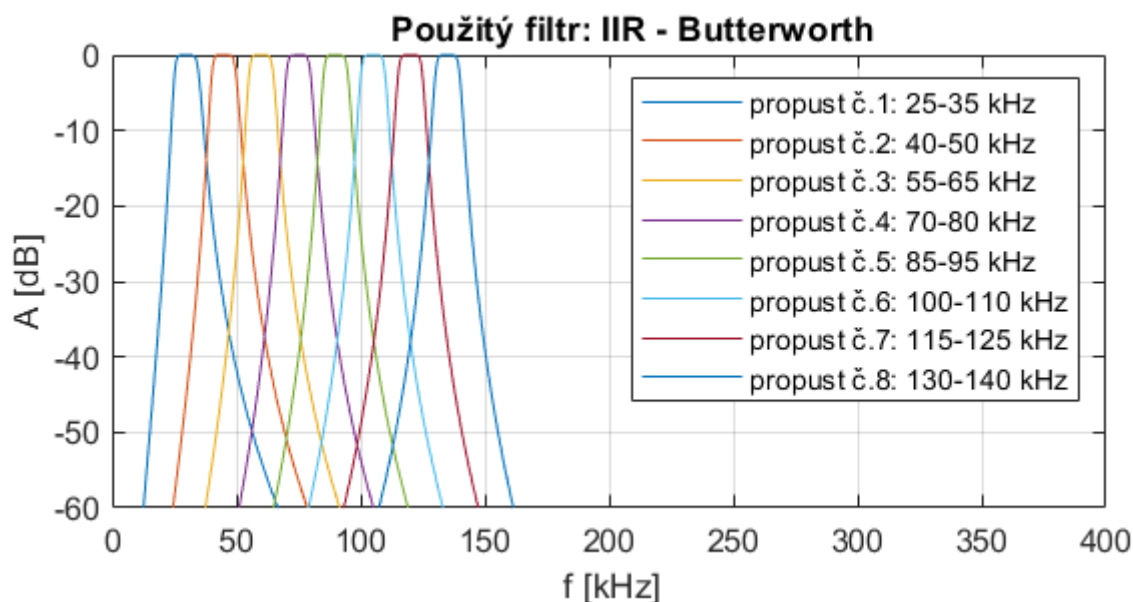
Druhá implementace vychází z použití digitálních filtrů. Každý filtr realizuje pásmovou propust pro určitou část frekvencí mezi 0 až 150kHz. Pokud amplituda některého filtrovaného signálu překročí určitý práh, je tato část spektra považována za zarušenou. Následně se z kombinace jednotlivých částí spektra určí celková šířka spektra rušení a stejně jako v případě detekce vycházející z Fourierovy transformace je za zdroj vyšších harmonických prohlášen buď oblouk či vnější rušení.

Nevýhodou prvního algoritmu je zpracovávání po dávkách. Tento přístup by nebyl výhodný pro zpracovávání na zvoleném mikrokontroleru TMS320F28069, který je uzpůsoben pro zpracovávání signálu v reálném čase. Proto byl pro prototyp monitorovacího zařízení zvolen algoritmus využívající banku pásmových propustí. Tento algoritmus zároveň provádí většinu výpočtů na jádře CLA a lze jej implementovat tak, že výstup filtrů lze z většiny určit ještě před získání nejnovějšího vzorku A/D převodu, tzn. hned při spuštění tasku. To zrychlí odezvu a zároveň nebude zbytečně zatěžovat jádro C28x spravující komunikace směrem k G3-PLC síti.



Obr. 5.5: Popis detekce oblouku využívající banku pásmových propustí

Pro návrh banky pásmových propustí bylo použito prostředí MATLAB, ve kterém byli navrženy IIR filtry typu Butterworth osmého řádu. Jejich amplitudová odezva pro signál vzorkovaný s frekvencí 500 kHz je vykreslena v grafu 5.6. Průběhy po použití filtrů na reálné měření je pak možné vidět v druhé části přílohy D.

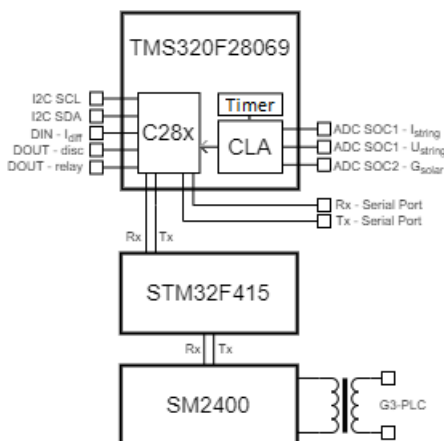


Obr. 5.6: Amplitudová odezva pásmových propustí

5.1.2 Program pro jádro C28x

Jádro C28x bude sloužit jako koncentrátor dat jednotlivých měření a zároveň jako server, který je bude předávat nadřazenému systému.

Jednotlivé vstupy a výstupy obsluhované jádrem C28x jsou naznačeny na obrázku 5.7. Jedná se o vstupy A/D převodníku, digitální vstup snímače rozdílového proudu, připojení I²C snímačů teploty, digitální výstupy pro spínání odpojovačů a zkratovacích relé a komunikační rozhraní UART pro spojení s STM32F415 respektive G3-PLC modemem a možnost výpisu chybových a informačních zpráv.



Obr. 5.7: Vstupy a výstupy jádra C28x

Obsluha periférií

Monitorovací zařízení využívá následující periferie mikrokontroleru TMS320F28069, pro které byly implementované knihovní funkce v POSIX stylu (viz. příloha B):

1. GPIO pro obsluhu digitálních vstupů a výstupů
2. Watchdog časovač pro možnost obnovení při zacyklení běhu
3. I²C (master) pro vyčítání dat ze snímačů teploty
4. UART pro komunikaci s STM32F415 (G3-PLC modemem) a možnosti výpisů pro lazení programu
5. ePWM ve funkci časovače pro přesné vzorkování A/D převodu a měření procesorového času
6. A/D převodník ve spojení s CLA jádrem pro měření napětí stringu, proudu stringem a referenčního osvitu

Jednotlivé knihovní funkce pro obsluhu periférií pak dohromady tvoří abstrakční úroveň označovanou jako HAL. Díky ní je možné jednotnými funkcemi obsluhovat periferie bez znalosti konkrétní realizace dané periferie uvnitř mikrokontroleru. Zároveň jsou tyto funkce kompatibilní s drivers firmy ModemTec a lze je tak mezi ně zařadit. Veškeré periferie jsou pak skrze tyto drivers dostupné jako struktury *devio_t*. Jedinou nutnou operací při tvorbě nového programu je pak správná instanciací struktur periférií v hlavičkovém souboru *conf_driver.h* a následně pouze používání obecných funkcí popsanych v příloze B.

1. GPIO

Driver pro obsluhu vstupně výstupních linek GPIO, při inicializaci vypne pull-up rezistory a nastaví všechny své piny na vstupní. Toto nastavení lze pak změnit nebo vyčíst pomocí funkce *io_ioctl* a příslušných příkazů. Další příkazy umožňují nastavit logickou úroveň výstupních pinů nebo ji překlopit a funkcí *io_read* vyčíst logickou úroveň z datového registru vstupně/výstupní linky.

2. Watchdog

Struktura periférie watchdog časovače je instanciována s požadovým dělicím poměrem hodinového signálu, jehož hodnota, popřípadě nejbližší vyšší možná hodnota, se nastaví v rámci inicializace a nelze měnit. Následně je možné pomocí funkce *io_ioctl* watchdog spustit, zastavit a nebo vynulovat čítač, aby nedošlo k resetu mikrokontroleru.

3. I²C

Při instanciaci I²C driveru jsou trvale zvoleny piny, které budou použity pro datový a hodinový vstup-výstup do periférie a zda bude periférie inicializována jako master či slave zařízení¹. Pomocí příkazů funkce *io_ioctl* lze nastavit rychlost komunikace, způsob adresování (7/10bitové) a případně adresu slave zařízení, která bude použita, pokud je periférie inicializována jako master. Samotná komunikace po sběrnici je možná buďto pomocí *io_read* respektive *io_write*, které budou blokovacím (pool) způsobem dotazovat, respektive zapisovat na zvolenou slave adresu anebo pomocí příkazu funkce *io_ioctl* na zaslání povelu doplněného o data či zaslání povelu a čekání na odpověď.

4. UART

Při instanciaci se také volí piny, konkrétně piny pro příjem (Rx) a odesílání (Tx). Při inicializaci jsou tyto piny inicializovány jako piny pro periférii UART, dále jsou nastaveny výchozí parametry komunikace na rychlost 9600 Baudů, 8 datových bitů, bez parity a 1 stopbit a je povoleno přerušování při přijetí zprávy. V přerušovací rutině se přijmutá data vkládají do vnitřního bufferu UART driveru, který musí být driveru poskytnutý v rámci jeho instanciaci. Funkce *io_ioctl* a příslušné příkazy pak umožňují vyčítat a měnit parametry komunikace, funkce *io_read* neblokujícím způsobem vyčítá data z vnitřního bufferu driveru a funkce *io_write* blokujícím způsobem pošle poskytnutá data.

5. ePWM (TIM)

Drivery firmy ModemTec definují driver pro časovač, popřípadě časovač s možností input-capture a output-compare. Oproti tomu použitý mikrokontroler

¹Aktuální verze driveru podporuje jen inicializaci jako I²C master

TMS320F28069 tuto funkcionalitu rozděluje mezi periferie 'ePWM module' pro generování výstupních a synchronizačních impulsů a 'eCAP module' pro měření délky vstupních impulsů.

Z tohoto důvodu je při instanciaci nutné dle požadavků na driver časovače vložit adresu registrů ePWM modulu, eCAP modulu nebo obě². Následně se příslušné moduly inicializují do režimu běžného časovače. Pomocí funkce *io_ioctl* je pak možné přepnout režim časovače na generování výstupních pulsů nebo na měření délky vstupních. V obou případech je také možné nastavit callback volaný z příslušné rutiny obsluhy přerušení. Dále je pomocí funkce *io_ioctl* možné nastavit požadovanou frekvenci časovače, nastavit a vyčíst hodnotu čítače časovače, nastavit střidu pro výstupní signál nebo ji vyčíst při měření vstupního signálu a spouštět čítání.

6. ADC & CLA

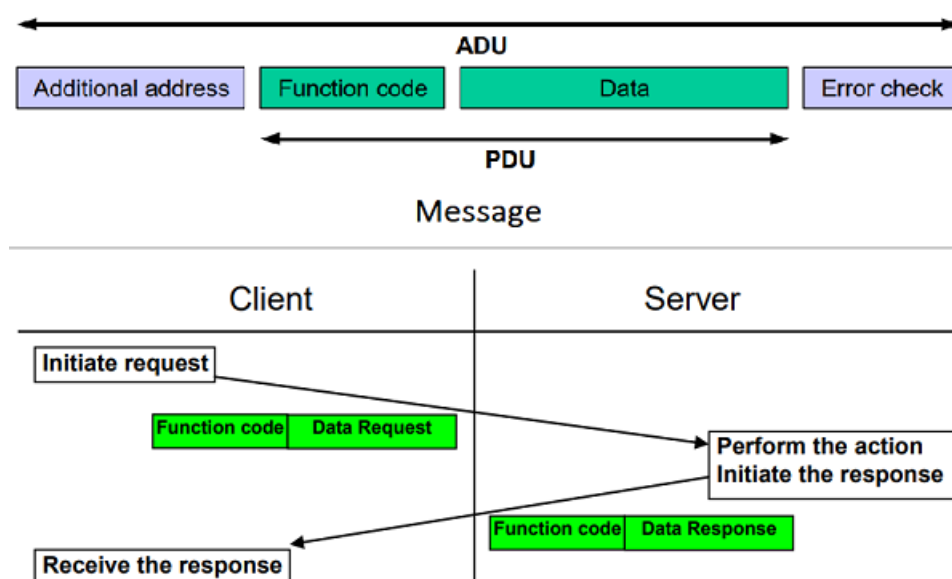
Posledním driverem je driver obsluhující A/D převodník, jehož výsledky jsou odbavovány pomocí CLA jádra. V rámci driverů firmy ModemTec je možné definovat více druhů implementací driveru pro A/D převodník, jako je například ADC s využitím DMA přenosu výsledků, ADC využívající spouštění časovačem pro přesné vzorkování anebo právě implementace speciální pro mikrokontrolery řady C2000 využívající CLA jádro pro zpracování dat z převodu. Pro instanciaci tohoto driveru je kromě adres registrů ADC a CLA jádra také nutné vložit odkaz na driver časovače, který bude sloužit ke spouštění vzorkování, adresu funkce implementovanou pro CLA task a adresu kam bude CLA jádro ukládat výsledky společně s jejich délkou. Při inicializaci se ve funkci *io_init* nejprve zkopíruje kód CLA tasků do příslušné části paměti RAM. Poté se na základě zvoleného CLA tasku nastaví adresa funkce, která jej obsluhuje a povolí se přerušení od dokončení CLA tasku. Následuje inicializace A/D převodníku a analogových vstupních linek. Při zavolání funkce *io_open*, respektive *io_close*, se kromě spuštění respektive zastavení A/D převodníku také spouští a zastavuje vzorkovací časovač. Funkce *io_ioctl* umožňuje pomocí multiplexoru A/D převodníku zvolit vstupní analogovou linku, dále nastavit zda bude docházet k vzorkování jednoho kanálu anebo souběžnému vzorkování dvou párových kanálů, zvolit vzorkovací frekvenci a nastavit callback funkci zavolanou při chybě nebo dokončení převodu. Samotný převod je spouštěn funkcí *io_read*, která na začátku povolí spouštění A/D převodů vzorkovacím časovačem na požadovaný počet provedených převodů. Následně spouštění opět přeruší a zkopíruje výsledek z paměti CLA jádra do poskytnutého bufferu.

²Aktuální verze driveru podporuje jen inicializaci ePWM

Modbus server

Pro komunikaci hodnot naměřených mikrokontrolerem TMS320F28069 byl zvolen ve vestavných systémech a průmyslu populární protokol Modbus.

Jedná se o protokol definující pouze aplikační vrstvu. Komunikace probíhá na principu klient/server a to i mezi zařízeními připojenými k různým typům sítí. Nejčastěji se Modbus provozuje buďto jako sériový komunikační protokol používající RS485 nebo RS232 pod označením Modbus RTU nebo využívající internetovou komunikaci TCP/IP na portu 502 pod označením Modbus TCP do jehož paketu je vkládána vlastní Modbus zpráva, jejíž struktura je naznačena na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: Struktura zpráv v rámci Modbusu [39]

Datový model Modbusu se skládá ze čtyř tabulek. Každá tabulka obsahuje maximálně 65536 datových záznamů, které se ukládají do registrů o šířce 16 bitů. Těmito tabulkami, respektive skupinami registrů, jsou:

Discrete inputs: bitově orientované registry určené pouze pro čtení

Coils: bitově orientované registry určené pro čtení i zápis

Input registers: registry obsahující 16bitové slova určená pouze pro čtení

Holding registers: registry obsahující 16bitová slova určená pro čtení a zápis

Pro každou tabulku pak existují odpovídající funkční kódy, které říkají, zda chceme číst či zapisovat do jednoho nebo více registrů dané skupiny, popřípadě zda chceme vyčítat některý ze stavových registrů Modbus zařízení.

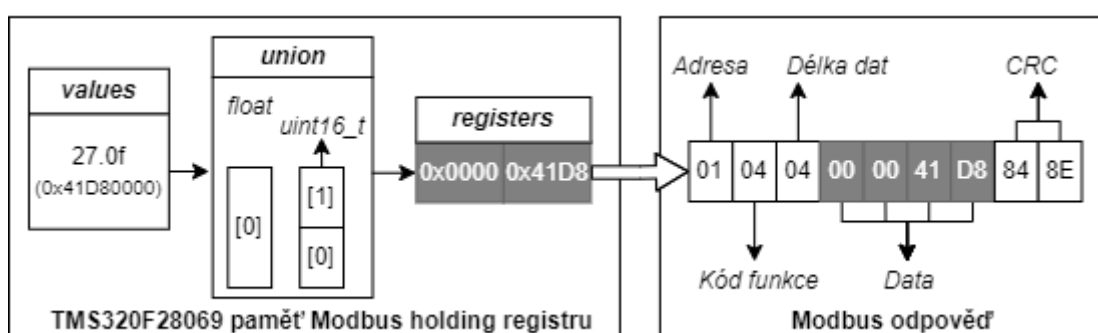
Pro realizaci Modbus serveru byla použita volně dostupná knihovna nanoMODBUS [40]. Tato knihovna implementuje Modbus server i Modbus klient, a to jak pro Modbus RTU tak i pro Modbus TCP.

Při práci s touto knihovnou je nutné implementovat timeout mechanismus, v případě jádra C28x realizovaný pomocí ePWM časovače, a na platformě závislé funkce pro čtení a zápis:

```
int32_t read(uint8_t* buf, uint16_t count, int32_t byte_timeout_ms);
int32_t write(const uint8_t* buf, uint16_t count, int32_t byte_timeout_ms);
```

Dále je možné pro každou zprávu, respektive její funkční kód, registrovat callback funkci, pomocí které lze namapovat registry z Modbus tabulek na konkrétní proměnné v zařízení nebo realizovat další funkcionalitu spojenou s přijmutím zprávy. Zároveň je možné nepoužívané funkce funkčních kódů vyřadit z překladu pomocí speciálních definic uvedených v popisu repozitáře knihovny. Pro jádro C28x bylo zároveň nutné knihovnu mírně upravit tak, aby místo osmibitových datových typů používala šestnáctibitové, které jsou pro toto jádro nejmenší podporované.

Výsledný Modbus RTU server monitorovacího zařízení spravovaný mikrokontrolerem obsahuje registry popsané v tabulce 5.3. Při implementaci Modbus klienta bude nutné dbát na to, že vyčítaná data obsahují proměnné i s 32 a 64 bitovými čísly, která jsou rozděleny mezi více registrů. V rámci modbus registru jsou hodnoty ve formátu big-endian (MSb je v paměti uložen jako první). Registry popisující širší proměnné jsou za sebou ale řazeny ve smyslu little-endian (LSb jako první). Toto řazení a sktruktura odpovědi s 32 bitovým číslem s plovoucí desetinnou čárkou jsou naznačeny na obrázku 5.9.



Obr. 5.9: Endianita implementované Modbus komunikace

Modbus registry	Datový typ proměnné	Popis
1	bitfield (uint16_t)	dva nejvyšší bity ovládají odpojovače na kladné a záporné větvi stringu [‘1’ = string odpojen, ‘0’ = string připojen]
2	bitfield (uint16_t)	ovládání až šestnácti zkratovacích relé [‘1’ = relé sepnuto, ‘0’ = relé rozepnuto]
10001	bitfield (uint16_t)	nejvyšší bit indikuje stav snímače rozdílového proudu [‘1’ = proud detekován, ‘0’ = bez detekce]
10002	bitfield (uint16_t)	příznakové bity stavu monitorovacího zařízení (viz. tabulka 5.4)
30001-30002	float (32bit)	Hodnota napětí na stringu [V]
30003-30004	float (32bit)	Hodnota proudu stringem [A]
30005-30006	float (32bit)	Hodnota výkonu stringu [W]
30007-30008	float (32bit)	Hodnota referenčního osvitu [W/m ²]
30009-30010	float (32bit)	Teplota panelu [°C]
30011-30012	float (32bit)	Teplota okolí [°C]
40001-40004	uint64_t	Aktuální (procesorový) čas [s]
40005-40006	float (32bit)	Hodnota energie stringu [J]
40007	uint16_t	Čítač detekovaných oblouků [-]

Tab. 5.3: Registrová mapa Modbus RTU serveru

Pozice	Popis příznaku
bit 15	Chyba při měření proudu stringem
bit 14	Chyba při měření napětí stringu
bit 13	Chyba při určování výkonu stringu
bit 12	Chyba při určování energie stringu
bit 11	Chyba při měření rozdílového proudu
bit 10	Chyba při detekci zahoření oblouku
bit 9	Chyba při měření referenčního osvitu
bit 8	Chyba při měření teploty panelu
bit 7	Chyba při měření teploty okolí
bit 1	Indikace běhu zařízení (bit se překlápí)
bit 0	Indikace dokončení inicializace zařízení

Tab. 5.4: Popis příznakových bitů monitorovacího zařízení

5.2 Mikrokontroler STM32F415

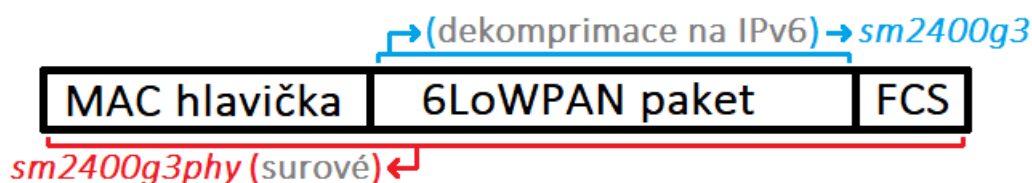
Tento mikrokontroler společně s IO SM2400 bude pro monitorovací zařízení vytvářet modem, který mu umožní připojení se k G3-PLC síti. Zároveň platí, že v G3-PLC síti musí vždy existovat zařízení zvané koordinátor (3.3), a tak bude muset jeden z modemů zajišťovat tuto funkci v rámci sítě uvnitř FVE.

5.2.1 G3-PLC

Firma ModemTec má ve svém portfoliu již existující modemy pro komunikaci v rámci G3-PLC sítě, které používají pro správu fyzické a linkové vrstvy IO SM2400. Z tohoto důvodu není potřeba vytvářet driver obsluhující tento komunikační IO, ale pro práci je možné využít již existující knihovny.

Pro správnou inicializaci IO SM2400 je nutné po připojení napájení nahrát firmware buďto skrze připojené host zařízení, kterým je v případě monitorovacího zařízení mikrokontroler STM32F415, popřípadě z externí paměti připojené k SM2400 skrze sběrnici SPI. Volbou firmwaru pro DSP uvnitř SM2400 vybereme způsob zpracovávání na fyzické vrstvě. Pro správu linkové vrstvy je v SM2400 32bit RISC procesor, který na základě vybraného firmwaru podporuje síť typu G3-PLC, PRIME a další. Zároveň také umožňuje CSMA/CA, adaptační IP vrstvu, šifrování v souladu s AES128 nebo AES256 a mechanismy pro sebelokolizaci v rámci sítě. [28]

Z pohledu ModemTec driverů lze IO SM2400 inicializovat jak skrze host zařízení, tak skrze externí paměť. Této funkcionality je docíleno rozdělením driveru na část pro nahrávání firmwaru *sm2400loader* a pro komunikaci *sm2400g3*, popřípadě *sm2400g3phy*. Pokud bychom chtěli, aby se firmware nahrál z host zařízení je potřeba instanciovat *sm2400loader*, skrze který je pak možné i za běhu firmware měnit, protože je nahráván přímo do paměti RAM IO SM2400. Pokud není tento driver instanciován počítá se s nahráním firmwaru z externí paměti. Pro komunikaci pak existují dvě varianty driveru. Varianta *sm2400g3*, která v sobě obsahuje celý G3 stack a tak s host zařízením komunikuje skrze běžné IPv6 pakety. Varianta *sm2400g3phy* pak umožňuje přijímání a posílání surových G3 rámců na MAC úrovni. V tomto případě se v podstatě jedná o rámce dle IEEE 802.15.4 s rozšířenou G3 hlavičkou. [1]



Obr. 5.10: Rozdíl mezi pakety v ModemTec driverech pro SM2400

5.2.2 LwIP

Pro zpracovávání příchozích IPv6 paketů byla zvolena volně dostupná knihovna lwIP, která je široce rozšířená při síťové komunikaci ve vestavných zařízeních kvůli možnosti provozu na širokém množství platform a to i bez OS.

Popis knihovny

LwIP je implementace protokolu TCP/IP optimalizovaná na nízkou spotřebu paměti RAM. Celková paměťová náročnost plnohodnotného TCP protokolu je přibližně 40 kB kódu a typicky desítky kB v paměti RAM pro vstupně/výstupní buffery a pomocné proměnné. [41]

V rámci lwIP jsou implementovány funkce pro podporu protokolů od linkové po aplikační vrstvu OSI modelu. Jejich výpis je součástí tabulky 5.5.

Linková vrstva	– PPP (Point-to-Point Protocol) – ARP (Address Resolution Protocol)
Síťová vrstva	– IP (Internet Protocol) s podporou IPv4 i IPv6 – ICMP (Internet Control Message Protocol) – IGMP (Internet Group Management Protocol)
Transportní vrstva	– UDP (User Datagram Protocol) – TCP (Transmission Control Protocol)
Aplikační vrstva	– DNS (Domain names resolver) – SNMP (Simple Network Management Protocol) – DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)

Tab. 5.5: Podpora knihovny lwIP [41]

Pro přístup k funkcím z tabulky 5.5 lwIP definuje tříúrovňové API:

Raw (native): Nízkoúrovňové API bez zabezpečení vláken, založené na callback funkcích pro maximální výkon a minimální paměťovou náročnost. Provádění programu je řízeno pomocí callback funkcí, které jsou volány jádrem lwIP, když dojde k činnosti související s danou akcí. Rozhraní je tedy řízeno přímo událostmi bez použití OS. [41]

Sequential-style: Rozhraní API s větší režii založené na blokovacích funkcích. Model provádění tedy vychází z blokovacího otevřít-číst-zapsat-zavřít. Tyto funkce lze ale volat z libovolného vlákna (kromě vlákna TCPIP). Stále ale platí, že TCP/IP je ze své podstaty založen na událostech, jeho kód a aplikační program se tedy musí nacházet v různých kontextech provádění (vláknech), což již vyžaduje přítomnost OS. [41]

Socket: Vysokoúrovňové API ve stylu POSIX socketů s největší režii a zabezpečením pro vlákna. Toto rozhraní je kompatibilní s existujícími aplikacemi a mělo

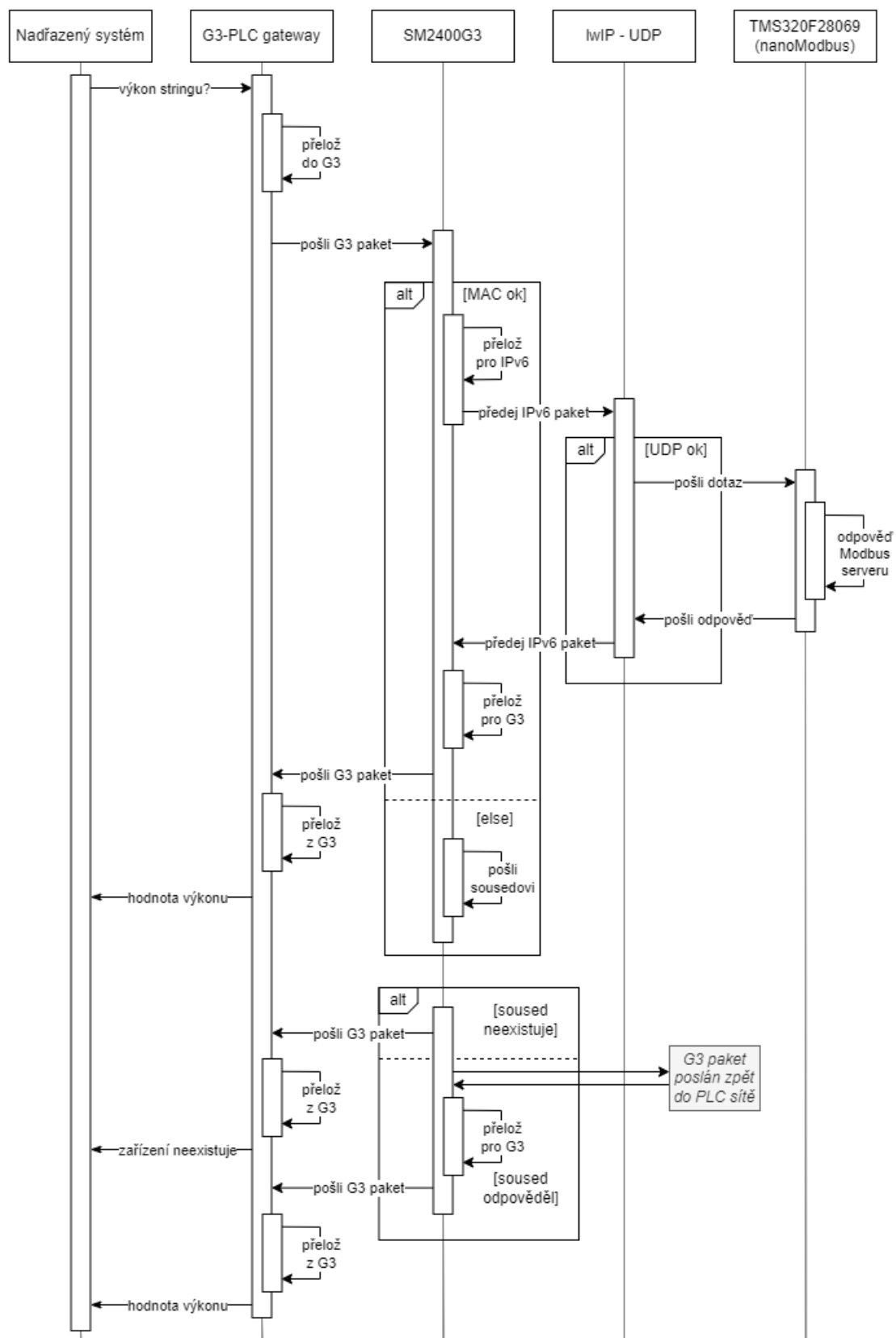
by tak poskytovat veškeré funkce potřebné pro spuštění aplikací využívající socket API na jiných platformách (např.: Unix, Windows a další). Rozhraní je vystavěno nad Sequential-style API a tak také vyžaduje přítomnost OS. [41]

Použití knihovny

Při implementaci SW s využitím knihovny lwIP se stejně jako v případě obsluhy G3-PLC (5.2.1) respektive IO SM2400 stavělo na již existujícím SW pro PLC modemy, který pro práci s datovými zprávami používá také lwIP.

Pro příjem a posílání IPv6 paketů byla využita implementace driveru *sm2400g3*. Ta IPv6 pakety přeloží tak, aby vyhovovaly protokolu 6LoWPAN a předá je IO SM2400, který je pošle skrze PLC síť, nebo naopak pokud jde o příjem IPv6 paketu. Jelikož fyzickou, linkovou a síťovou vrstvu OSI modelu pokrývá IO SM2400 a příslušný driver, tak bude lwIP knihovna použita pouze pro obsluhu na vrstvě transportní.

Průběh zpracovávání komunikace přicházející z G3-PLC sítě je popsán diagramem na obrázku 5.11. Jak bylo již řečeno, tak driver IO SM2400 zajišťuje příjem a odesílání IPv6 paketů. Příchozí a odchozí pakety jsou poté předávány protokolu transportní vrstvy UDP. Předávání probíhá ve skrze callback funkce registrované v rámci volání funkce *udp_bind*, která je součástí lwIP Raw API. Kolem UDP funkcí Raw API pro vyčítání a zápis jsou pak implementovány wrapper funkce, které z respektive do TCP/IP stacku existujícího v rámci lwIP vyčítají respektive zapisují data aplikace monitorovacího zařízení.



Obr. 5.11: Průběh zpracovávání komunikace G3-PLC sítě

6 Prototyp monitorovacího zařízení

Pro otestování funkčnosti monitorovacího zařízení byla sestavena jednoduchá PLC síť se dvěma modemy MT49S a vývojovým kitem LaunchXL-F28069M.

Modem MT49S je produkt firmy ModemTec, který umožňuje komunikaci a diagnostiku sítí G3-PLC. Modem pracuje buď v transparentním režimu, kdy je veškerá komunikace považována za datovou a modem pouze přijatou zprávu ze vstupního sériového portu zabalí do IPv6 paketu a pošle skrze PLC síť, nebo v příkazovém režimu, kdy jsou do IPv6 paketu zapouzdřeny příkazy ovládající speciální funkce modemu definované firemním protokolem. Jádro tohoto modemu také vychází z kombinace mikrokontroleru STM32F415 a IO SM2400 a bylo na něm tedy možné otestovat zjednodušenou verzi SW vybavení pro správu komunikace monitorovacího zařízení, která po G3-PLC síti v IPv6 paketech posílá Modbus RTU zprávy pro měřící kartu realizovanou mikrokontrolerem TMS320F28069.

Vývojový kit LaunchXL-F28069M je kit osazený mikrokontrolerem TMS320F28069 a programátorem Texas Instruments XDS100v2, který umožňuje připojení kitu pomocí USB a následné nahrání program do paměti RAM i Flash nebo jeho lazení.

6.1 Výsledky testování

Na prototypu byla otestována funkčnost Modbus serveru a aktualizování sledovaných veličin (viz. obrázek 6.1). Při testu Modbus serveru byl kit LaunchXL-F28069M připojen pomocí ladícího UART a sériové rozhraní přímo k PC, který realizoval funkci Modbus klienta v režimu RTU. Při testu se potvrdilo, že Modbus server je schopen odpovídat na dotazy klienta a odesílat aktuální hodnoty měření.

Druhou testovanou funkcí byla komunikace skrze G3-PLC síť (viz. obrázek 6.2), tedy test firmwaru pro mikrokontroler STM32F415 na PLC modemu MT49S. Výstupem tohoto testu byla úspěšná odpověď na dotaz Modbus klienta i po PLC síti. Aktuální verze firmwaru, ale plně nevyužívá možnosti UDP vrstvy lwIP. Pro Modbus je totiž v rámci UDP vyhrazený port 502. V následujících verzích se tedy uvažuje úprava firmwaru tak, aby nebalil Modbus RTU zprávy do obecných IPv6 paketů, ale aby byl využit port 502. Neuvažuje se ale použití Modbusu v režimu TCP. Důvodem jsou nekompatibilní timeout mechanismy mezi spojovanou TCP a G3-PLC komunikací, která už sama o sobě stejně tak jako TCP zajišťuje potvrzování komunikace.

Registers List:

Expression	Type	Value
modbus_coils	union coils	{values={discontactorP=0, discontac...
modbus_discpln...	union displn...	{values={diffCurrent=1, rsvd1=0, curr...
modbus_holdReg	union holdin...	{values={localTime=10, stringEnergy=...
localTime	unsigned lon...	10
stringEnergy	float	+Inf
arcCounter	unsigned int	0
registers	unsigned int[7]	{10,0,0,0,...}
modbus_inputReg	union inputR...	{values={stringVoltage=-7.57997127e+36, str...
stringVoltage	float	-7.57997127e+36
stringCurrent	float	-3.7716443e+33
stringPower	float	+Inf
solarIrradiance	float	0.00856981799
panelTemperature	float	27.0
ambientTemperature	float	27.0
registers	unsigned int[...	{31534, 64694, 62680, 63289, 0, ...}
[0]	unsigned int	31534
[1]	unsigned int	64694
[2]	unsigned int	62680
[3]	unsigned int	63289
[4]	unsigned int	0
[5]	unsigned int	32640
[6]	unsigned int	26732
[7]	unsigned int	15372
[8]	unsigned int	0x0000 (Hex)
[9]	unsigned int	0x41D8 (Hex)
[10]	unsigned int	0
[11]	unsigned int	16856
msTickCounter	unknown	identifier not found: msTickCounter

Modbus RTU příkaz na vyčtení registrů 40 001-40 004

30011-30012	float (32bit)	Teplota okolí [°C]
40001-40004	uint64_t	Aktuální (procesorový) čas [s]
40005-40006	float (32bit)	Hodnota energie stringu [J]

Source Code (nanomodbus_port.c):

```

57 * @param byte_timeout_ms timeout in milliseconds
58 * @param argc user variable argument
59 * @return Number of bytes actually wrote of error code when
60 */
61 int32_t modbus_write(const uint16_t* buf, uint16_t count, int
62 {
63     int32_t toSend = (int32_t)count;
64     char* pTxBuffer = (char*)buf;
65     int32_t sendend;
66     uint64_t byteTimeout = (uint64_t)byte_timeout_ms;
67     uint64_t txTimeout = tickCounter + byteTimeout;
68
69     do
70     {
71         sendend = (int32_t)io_write(arg, pTxBuffer, (int)toSend);
72         toSend -= sendend;
73         pTxBuffer += sendend;
74
75         //Check timeout
76         if(byte_timeout_ms > 0UL)
77         {
78             if(sendend > 0)
79             {
80                 txTimeout = tickCounter + byteTimeout;
81             }
82             else if(tickCounter > txTimeout)
83             {
84                 break;
85             }
86         }
87     } while(toSend);
88
89     return (int32_t)count - toSend;
90 }
91
92

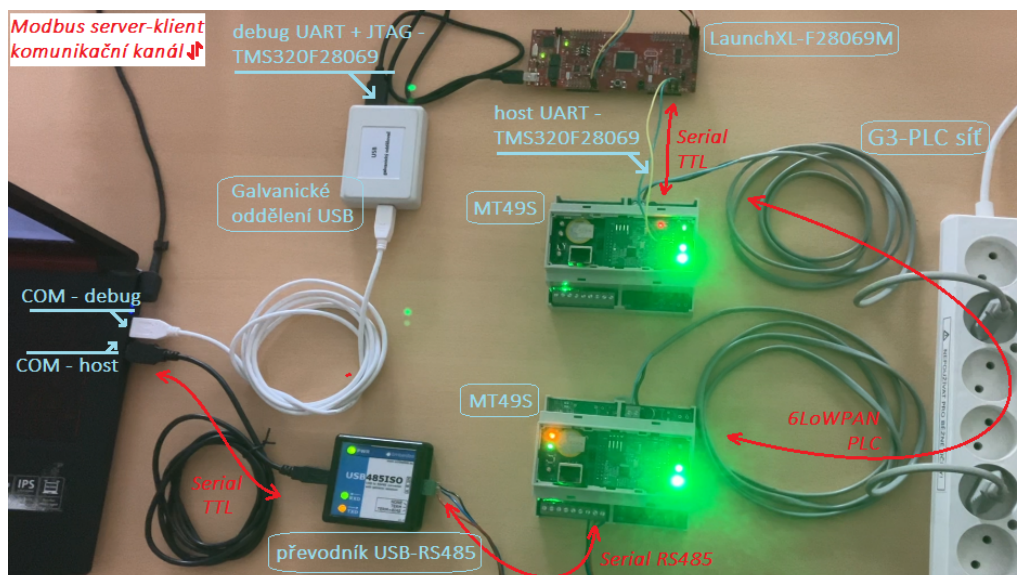
```

Serial Capture Program 2.0.0.70

Display: 01 03 00 00 16 00 00 00 00 00 E2 16
01 03 00 00 19 00 00 00 00 00 1D 16
01 03 00 00 1C 00 00 00 00 00 49 16
01 03 00 00 1E 00 00 00 00 00 6B D6

Port: 5 115200 8N1 N

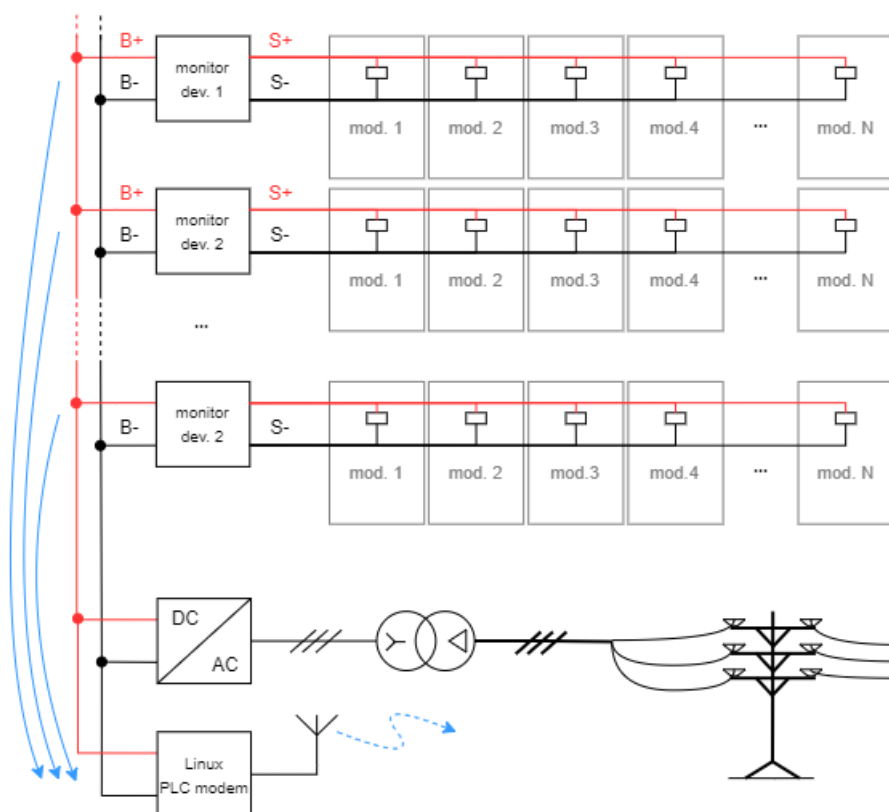
Obr. 6.1: Test odezvy Modbus serveru



Obr. 6.2: Test komunikace po G3-PLC síti

6.2 Plánovaná topologie

Při reálném nasazení monitorovacího zařízení se oproti testovacímu prototypu počítá s hvězdicovou topologií sítě naznačenou na obrázku 6.3. Každé monitorovací zařízení bude skrze PLC síť spojeno s koordinátorem, kterým může být například malý linuxový počítač. Z tohoto počítače pak bude možné sledovat stav v celé FVE popřípadě může tento počítač sloužit jako gateway a posílat data skrze jinou síť do vyššího dohledového systému. Z místa koncentrátoru bude také možné odstavit celou FVE a vyhovět tak požadavkům Rapid-shutdown (4.2) na centrální možnost odpojení.



Obr. 6.3: Plánovaná topologie pro monitorovací zařízení v rámci FVE [1]

Závěr

Tato práce je zaměřená na problematiku monitorovacích zařízení pro zdrojové části FVE. Základním předpokladem pro návrh takového zařízení je znalost poruch, které se zde vyskytují. Práce tedy v úvodu stručně popisuje nejčastější poruchy, kterými jsou paralelní a sériový zkrat, vznik svodového proudu, poruchy blokovacích a bypass diod, přehřátí FV článku, delaminace, změna barvy a koroze FV panelu, vysokonapěťový stres a mechanické poškození instalace.

V následujících kapitolách první části práce jsou uvedeny vizuální a na elektrických veličinách založené metody pro včasnou detekci poruch. Vyšší důraz je zde kladen na metody založené na měření elektrických veličin, které jsou stěžejní pro definici požadavků na HW monitorovacího zařízení. To se skládá z vyhodnocovací jednotky tvořené mikrokontrolery TMS320F28069 pro obsluhu měření a STM32F415 společně s IO SM2400 pro správu komunikace s nadřazeným systémem dle standardu G3-PLC. Dále zařízení obsahuje obvody pro měření napětí a proudu stringem, obvod pro měření rozdílového proudu, modul pro měření intenzity slunečního záření a teploty FV panelů a okolí a sadou odpojovačů a zkratovacích relé schopných plně odpojit string od busu a tím i od zbytku FVE a zároveň uvést odpojený string do bezpečného stavu. Všechny požadavky na HW byly definovány s ohledem na standard NEC [8] článek 690 o fotovoltaických systémech a normami IEC 61724-1 [14] o monitorování účinnosti FVE a IEC 61730-1 [7] o požadavcích na konstrukci a zařízení provozovaných v rámci FVE.

V kapitolách druhé části práce je popsána implementace SW vybavení pro mikrokontrolery tvořící vyhodnocovací jednotku monitorovacího zařízení. Jmenovitě pro mikrokontroler TMS320F28069, který na svém CLA jádře s použitím A/D převodníku provádí měření intenzity slunečního záření, napětí na stringu, proudu stringem a detekci zahoření elektrického oblouku. Na druhém jádře C28x jsou pak obsluhovány ostatní periferie pro získávání hodnot zbylých měřených veličin, kterými jsou teplota panelu a okolí a unikající proud. Zároveň toto jádro spravuje Modbus server pro propagování naměřených hodnot směrem k druhému mikrokontroleru STM32F415. Ten společně s IO SM2400 vytváří modem umožňující připojení monitorovacího zařízení do G3-PLC sítě. Mikrokontroler STM32F415 tedy ovládá komunikační IO SM2400, který spravuje fyzickou a linkovou vrstvu PLC sítě, a zpracovává příchozí a odchozí IPv6 pakety s využitím knihovny lwIP.

V závěrečné kapitole je pak popsán prototyp monitorovacího zařízení, na kterém byl testován správný chod programů pro měření a komunikaci.

Literatura

- [1] Interní dokumentace firmy Modemtec
- [2] Dokumentace firmy SolarEdge
- [3] SUNDARAM, K.Mohana, Sanjeevikumar PADMANABAN, P. PANDIYAN a Jens Bo HOLM-NIELSEN. *Photovoltaic Systems: Artificial Intelligence-based Fault Diagnosis and Predictive Maintenance*. 2. vydání, Boca Raton: Crc Press, 2022. ISBN 9781000545890
- [4] Počet fotovoltaických elektráren zapojených do sítě se od začátku roku 2022 více než zdvojnásobil. MPO pracuje na zjednodušení jejich povolování. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2023 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/pocet-fotovoltaickych-elektraren-zapojenych-do-site-se-od-zacatku-roku-2022-vice-nez-zdvojnasil-mpo-pracuje-na-zjednoduseni-jejich-povolovani-275690/>
- [5] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ 2022). ČEPS. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2023 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>
- [6] JOHNSON, Jay, Michael MONTROYA, Scott MCCALMONT a Gil KATZIR. Differentiating Series and Parallel Photovoltaic Arc-Faults. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, DOI: 10.1109/PVSC.2012.6317708. 2012.
- [7] ČSN EN IEC. *ČSN EN IEC 61730-1 Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 1: Požadavky na konstrukci*. 2. 2018.
- [8] NFPA. *NFPA 70 - National Electrical Code*. 2023 edition. 2023.
- [9] HONG, Ying-Yi a Rolando A. PULA. Methods of photovoltaic fault detection and classification: A review. *Energy Reports*, DOI: 10.1016/J.EGYR.2022.04.043. 2022.
- [10] JAHN, Ulrike a Magnus HERZ. *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications*. 1. IEA-PVPS, 2018. ISBN 9783906042534.
- [11] FADHEL, S., C. DELPHA, D. DIALLO a I. BAHRI. PV shading fault detection and classification based on I-V curve using principal component analysis: Application to isolated PV system. *Solar Energy*, DOI: 10.1016/J.SOLENER.2018.12.048 2019.

- [12] BECHNÍK, Bronislav. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2023-12-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [13] LAHKÝ, Martin. Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu. *Tzbinfo* [online]. 2015 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [14] IEC. *IEC 61724-1 Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring*. 1. 2017.
- [15] ALLEGRO MICROSYSTEMS. *ACS724 Automotive-Grade, Galvanically Isolated Current Sensor IC with Common-Mode Field Rejection in a Small-Footprint SOIC8 Package*. Rev. 22. 2023. Dostupné také z: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS724-Datasheet.ashx>
- [16] ALLEGRO MICROSYSTEMS. *ACS70331 High Sensitivity, 1 MHz, GMR-Based Current Sensor IC in Space-Saving, Low Resistance QFN and SOIC-8 Packages*. Rev. 6. 2023. Dostupné také z: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS724-Datasheet.ashx>
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *TMCS1123 $\pm 1100V$ reinforced isolation, 75ARMS 250kHz Hall-effect current sensor with AFR, reference and ALERT*. 1. 2023. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/gpn/tmcs1123>
- [18] ACEINNA. *MCA1101-xx-3 High Accuracy Current Sensor IC with 1.5MHz 3dB Bandwidth and Isolation $\pm 5A$, $\pm 20A$, $\pm 50A$, $\pm 65A$, 3.3V, Fixed Gain*. Rev D. Dostupné také z: https://www.mouser.com/datasheet/2/940/6020_1104_01_RevD_MCA1101_Fix_Gain_3V_10112021-2907617.pdf
- [19] VACUUMSCHMELZE. *T60404-N4641-X900 Differential Current Sensor for IC-CPD acc. to the standard IEC62752-2016*. 2021. Dostupné také z: https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Datasheets%20-%20Drawings/Current%20Sensors/4641-X900.pdf
- [20] KIPP & ZONEN. *Pyranometer For reliable entry-level measurement of solar irradiance*. 2023. Dostupné také z: <https://www.kippzonen.com/Download/1067/Datasheet-CMP3-SMP3-pyranometers-EN>

- [21] INGENIEURBÜRO MENCKE & TEGTMEYER GMBH. *SILICON IRRADIANCE SENSOR Measurement of Solar Irradiance*. 2023. Dostupné také z: https://www.imt-solar.com/fileadmin/docs/en/products/Si-Sensor_202307_E.pdf
- [22] BARROS, Rodrigo Cassio de, William Caires Silva AMORIM, João Marcus Soares CALLEGARI a Matheus Pereira SILVA. Low-Cost Solar Irradiance Meter using LDR Sensors. In: *13th IEEE International Conference on Industry Applications*. 2018. ISBN 978-1-5386-7995-1.
- [23] RONILAYA, Ferdian, Putra Fahri RAMADHANI, Moh. Noor HIDAYAT a Sapto WIBOWO. A Development of a Low Cost Solar Irradiance Meter Using Mini Solar Cells. *International Conference on Informatics Electrical and Electronics (ICIEE)*, DOI: 10.1109/ICIEE55596.2022.10010326. 2022.
- [24] OSRAM. *AS7343L 13-Channel Multi-Spectral Sensor*. v2-00. 2022. Dostupné také z: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-26546504/AS7343L_DS001038_1-00.pdf
- [25] MICROCHIP. *TCN75A 2-Wire Serial Temperature Sensor*. 2010. Dostupné také z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21935D.pdf>
- [26] SENSATA TECHNOLOGIES. *P115 MINITACTOR*. Rev:23-Mar-2022. 2022. Dostupné také z: <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-gigavac-p115-series-minitactor-contactors-datasheet.pdf>
- [27] G3-ALLIANCE. *Introduction of G3-PLC for non-experts*. version 1.2. 2022. Dostupné také z: https://g3-alliance.com/download/139/plc-introduction-for-non-experts/3376/g3-alliance_plc-introduction-for-non-experts_1-2_pub_march2022.pdf
- [28] SEMITECH SEMICONDUCTOR. *SM2400 N-PLC Transceiver Multi-Standard Narrowband Power Line Communications Modem*. Rev.DS-SM2400-v2.0-Mar-23. 2021. Dostupné také z: https://semitechsemi.com/wp-content/uploads/2023/03/DS-SM2400-5_0.pdf
- [29] STMICROELECTRONICS. *STM32F415xx STM32F417xx Datasheet - production data*. Rev 9. 2020. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f415rg.pdf>
- [30] STMICROELECTRONICS. *RM0090 Reference manual*. Rev 19. 2021. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0090-stm32f405415-stm32f407417-stm32f427437-and-stm32f429439-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf

- [31] TEXAS INSTRUMENTS. *SPRS698J TMS320F2806x Real-Time Microcontrollers*. REVISED SEPTEMBER 2021. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/sprs698j/sprs698j.pdf?ts=1712418095526>
- [32] TEXAS INSTRUMENTS. *SPRUH18I TMS320x2806x Microcontrollers Technical Reference Manual*. REVISED JUNE 2022. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ug/spruh18i/spruh18i.pdf?ts=1712410531926>
- [33] BENY. *SUNSPEC MODULE-LEVEL RAPID SHUTDOWN DEVICE NEC2020 BFS-21*. 20240120. Dostupné také z: <https://www.beny.com/wp-content/uploads/2021/03/Rapid-Shutdown-Catalogue-BENY-2024-2-1.pdf>
- [34] TEXAS INSTRUMENTS. *C2000™ CLA Software Development Guide*. 1.2. 2020 Dostupné také z: https://software-dl.ti.com/C2000/docs/cla_software_dev_guide/_static/pdf/C2000_CLA_Software_Development_Guide.pdf
- [35] HADEx. *CdS Photoconductive cells GL5528* Dostupné také z: <https://www.hadex.cz/u670-fotooodpor-5528-ldr-8-20kohm-1mohm/>
- [36] VOLTcraft. *PL-110SM Solar Radiation Measuring Instrument*. Version 11/09. Dostupné také z: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/gl/000101038ML03/manual-101038-voltcraft-pl-110sm-lux-meter-0-1999-wm.pdf>
- [37] Huawei. *SMART ENERGY CONTROLLER SUN2000-3/4/5/6/8/10KTL-M1 (High Current Version)* 03-202403. Dostupné také z: https://solar.huawei.com/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fdatasheet%2FSUN2000-3_4_5_6_8_10KTL-M1_High_Current_Version.pdf
- [38] Keysight. *InfiniiVision 3000A X-Series Oscilloscopes* Dostupné také z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02734/data-sheets/5990-6619.pdf>
- [39] Modbus. *MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION*. V1.1b3 Dostupné také z: https://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [40] DE BENEDETTO, Valerio. nanoMODBUS. *GitHub* [online]. 2024 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://github.com/debev/nanoMODBUS/releases/tag/v1.17.1>

- [41] DUNKELS, Adam a Leon WOESTENBERG. lwIP Lightweight IP stack. *nongnu* [online]. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www.nongnu.org/lwip/2_1_x/index.html

Seznam symbolů a zkratek

FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HW	Hardware – Fyzické části monitorovacího zařízení
SW	Software – Sada programů provádějící určitou činnost
DC	Steady-state el. proud (napětí) (<i>angl. "Direct current"</i>)
AC	Střídavý el. proud (napětí) (<i>angl. "Alternating current"</i>)
UV	Ultrafialové (<i>angl. "Ultraviolet"</i>)
PID	Potenciální indukovaná degradace (<i>angl. "Potential induced degradation"</i>)
IR	Infračervené (<i>angl. "Infrared"</i>)
EL	Elektroluminiscenční (<i>angl. "Electroluminescence"</i>)
VA	Volt-ampérová
MPPT	Sledovač bodu maximálního výkonu (<i>angl. "Maximum power point tracker"</i>)
TDR	Reflektometrie v časové oblasti (<i>angl. "Time-domain reflectometry"</i>)
SSTDR	Reflektometrie rozprostřeného spektra (<i>angl. "Spearred spectrum time-domain reflectometry"</i>)
ECM	Měření zemní kapacity (<i>angl. "Earth capacitance measurement"</i>)
A/D	Analogově-digitální (<i>angl. "Analog to digital"</i>)
D/A	Digitálně-analogový (<i>angl. "Digital to analog"</i>)
RTC	Obvod reálného času (<i>angl. "Real time clock"</i>)
MCU	Mikrokontroler (<i>angl. "Microcontroller unit"</i>)
GMR	Obří magnetorezistence (<i>angl. "Giant magnetoresistance"</i>)
AMR	Anizotropní magnetorezistence (<i>angl. "Anisotropic magnetoresistance"</i>)
IO	Integrovaný obvod (<i>angl. "Integrated circuit"</i>)
I2C	Typ sériové master-slave sběrnice (<i>angl. "Inter-integrated circuit"</i>)

PLC Komunikace po silových rozvodech (*angl. "Power line communication"*)

OFDM Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením (*angl. "Orthogonal frequency division multiplexing"*)

PSK Klíčování fázovým posuvem (*angl. "Phase-shift keying"*)

OSI Referenční komunikační model (*angl. "Open systems interconnection"*)

IPv6 Internetový protokol verze 6 (*angl. "Internet protocol version 6"*)

RAM Paměť s libovolným přístupem (*angl. "Random access memory"*)

FFT Rychlá Fourierova transformace (*angl. "Fast Fourier transfer"*)

IIR Nekonečná impulzní odezva (*angl. "Infinite impulse response"*)

GPIO Univerzální vstup/výstup (*angl. "General purpose input-output"*)

UART Univerzální asynchronní přijímač-vysílač (*angl. "Universal asynchronous receiver-transmitter"*)

ePWM Modul pulzně šířkové modulace (*angl. "Enhanced pulse width modulation"*)

ePWM Modul pro časování vstupních signálů (*angl. "Enhanced Capture"*)

HAL Hardwarová abstraktní vrstva (*angl. "Hardware Abstraction Layer"*)

MSb Nejvíce významný bit (*angl. "Most significant bit"*)

LSb Nejméně významný bit (*angl. "Least significant bit"*)

SPI Typ sériové master-slave sběrnice (*angl. "Serial peripheral interface"*)

DSP Signálový procesor (*angl. "Digital signal processor"*)

RISC Procesor s redukovanou instrukční sadou (*angl. "Reduced instruction set computer"*)

CSMA/CA Metoda libovolný přístup k síti se zabráněním kolizím (*angl. "Carrier sense multiple access with collision avoidance"*)

OS Operační systém (*angl. "Operating system"*)

TCP/IP Sada protokolů používaných v síti internet (*angl. "Transmission control protocol/Internet protocol"*)

- API** Programovací rozhraní (*angl. "Application programming interface "*)
- UDP** Protokol transportní vrstvy TCP/IP (*angl. "User datagram protocol"*)
- PC** Osobní počítač (*angl. "Personal computer"*)

Seznam příloh

A Požadavky na měření dle IEC 61724-1 [14]	87
B POSIX style drivery v jazyce C [1]	89
C Přístup k periferiím pomocí C2000Ware	91
D Detekci zahoření oblouku	93
E Obsah elektronické přílohy	97

A Požadavky na měření dle IEC 61724-1 [14]

Veličina	Vyžadováno?			poznámka
	třída C	třída B	třída A	
celkové sluneční záření dopadající na FV panel [kW/m^2]	×	×	×	pro třídu B a C lze použít meteorologická data z okolí
přímé a difúzní sluneční záření [kW/m^2]	×	×		pro třídu B lze použít meteorologická data z okolí
přímé normální sluneční záření [kW/m^2]	×	×		použití pouze pro systémy s koncentrátory či sledovači záření, pro třídu B lze použít meteorologická data z okolí
difúzní horizontální sluneční záření [kW/m^2]	×	×		použití pouze pro systémy s koncentrátory či sledovači záření s koncentrací $< 20\times$, pro třídu B lze použít meteorologická data z okolí
teplota FV panelu [$^{\circ}\text{C}$]	×	×		pro třídu B lze hodnotu odvozovat z meteorologických a satelitních dat
teplota okolího vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]	×	×	×	pro třídu B a C lze použít meteorologická data z okolí
rychlost větru [m/s]	×	×		pro třídu B lze použít meteorologická data z okolí
směr větru [$^{\circ}$]	×			-
poměr znečištění [%]	×			pouze při očekávaných ztrátách $> 2\%$
srážky [mm]	×	×		pro třídu B lze použít meteorologická data z okolí

Veličina	Vyžadováno?			poznámka
	třída C	třída B	třída A	
sníh [mm]				-
vlhkost [%]	×	×		-
chyba natočení dvouosého sledovače záření (primární úhel) [°]	×			natočení v příslušné ose pro systémy s koncentrací > 20×
chyba natočení dvouosého sledovače záření (sekundární úhel) [°]	×			natočení v příslušné ose pro systémy s koncentrací > 20×
chyba natočení jednoosého sledovače záření [°]	×			natočení v příslušné ose pro systémy s koncentrací > 20×
Napětí na DC straně [V]	×			na každém střídači (dle uvážení pak v každém stringu)
Proud na DC straně [A]	×			na každém střídači (dle uvážení pak v každém stringu)
Výkon na DC straně [kW]	×			na každém střídači (dle uvážení pak v každém stringu)
Napětí na AC straně [V]	×	×		na každém střídači a na výstupech FV systému
Proud na AC straně [A]	×	×		na každém střídači a na výstupech FV systému
Výkon na AC straně [kW]	×	×	×	na každém střídači a na výstupech FV systému
Energie na AC straně [kWh]	×	×	×	na každém střídači a na výstupech FV systému
Účinník [-]	×	×	×	na výstupech FV systému (dle uvážení pak na každém střídači)

B POSIX style drivery v jazyce C [1]

Výpis B.1: Výpis kódu v jazyce C

```
/* Standardní rozhraní POSIX-style driverů */
1
2
// Callback struktura
3
typedef struct io_callback
4
{
5
    int (*function)(void*); ///< Callback function
6
    void* argument;          ///< Callback argument
7
} io_callback_t;
8
9
// inicializace periferie
10
int io_init(void);
11
12
// otevření periferie 'void* io_device'
13
void* io_open(const char *pPath);
14
15
// uzavření periferie 'void* io_device'
16
int io_close(void *device);
17
18
// nastavení periferie dle příkazu 'request'
19
int io_ioctl(void *device, int request, ...);
20
21
// změna pozice pro io_read/io_write
22
int io_seek(void *device, int offset, int whence);
23
24
// čtení ze streamu periferie
25
int io_read(void *device, void *pBuffer, int bytes);
26
27
// zápis do streamu periferie
28
int io_write(void *device, const void *pBuffer, int bytes);
29
30
// zápis formátovaného textu do streamu periferie
31
int io_printf(void *device, const char *pFormat, ...);
32
33
// zápis formátovaného textu do streamu periferie
34
// dle listu argumentů
35
int io_vprintf(void *device, const char *pFormat, va_list arg);
36
```

(pozn.: Pro každou periferii není nutné implementovat všechny uvedené funkce)

C Přístup k periferiím pomocí C2000Ware

Periferie mikrokontrolerů C2000 lze ovládat buď přímo skrze registry mapované na hierarchické struktury (bitfield):

```
SECTIONS
{
  /*** Peripheral Frame 0 Register Structures ***/
  :
  DmaRegsFile      : > DMA,          PAGE = 1
  Cla1RegsFile     : > CLA1,         PAGE = 1
  :
}

#pragma DATA_SECTION(Cla1Regs, "Cla1RegsFile");
volatile struct CLA_REGS Cla1Regs;

struct CLA_REGS
{
  Uint16 MVECT1; // Task 1 Vector
  :
  Uint16 MVECT8; // Task 8 Vector
  Uint16 rsvd1[8]; // Reserved
  union MCTL_REG MCTL; // CLA Control
  union MMEMCFG_REG MMEMCFG; // CLA Memory Configuration
  Uint16 rsvd2[2]; // Reserved
  union MPISRCSEL1_REG MPISRCSEL1; // CLA Interrupt Source Select
  :
  union MPISRCSEL1_REG
  {
    Uint32 all;
    struct MPISRCSEL1_BITS bit;
  }
  struct MPISRCSEL1_BITS
  {
    Uint16 PERINT1SEL:4; // 3:0 Source for CLA Interrupt 1
    :
    Uint16 PERINT8SEL:4; // 31:28 Source for CLA Interrupt 8
  };
};
```

The diagram illustrates the bitfield structure for the CLA_REGS register. It shows the main CLA_REGS struct containing various fields like MVECT1, MVECT8, reserved fields, and unions for MCTL_REG, MMEMCFG_REG, and MPISRCSEL1_REG. The MPISRCSEL1_REG union is further detailed, showing a Uint32 all field and a struct MPISRCSEL1_BITS containing bitfields for PERINT1SEL and PERINT8SEL. Red annotations highlight the linker pragma and volatile struct declarations, and the nested struct definitions.

Obr. C.1: Vývojářská sada C2000Ware - bitfield

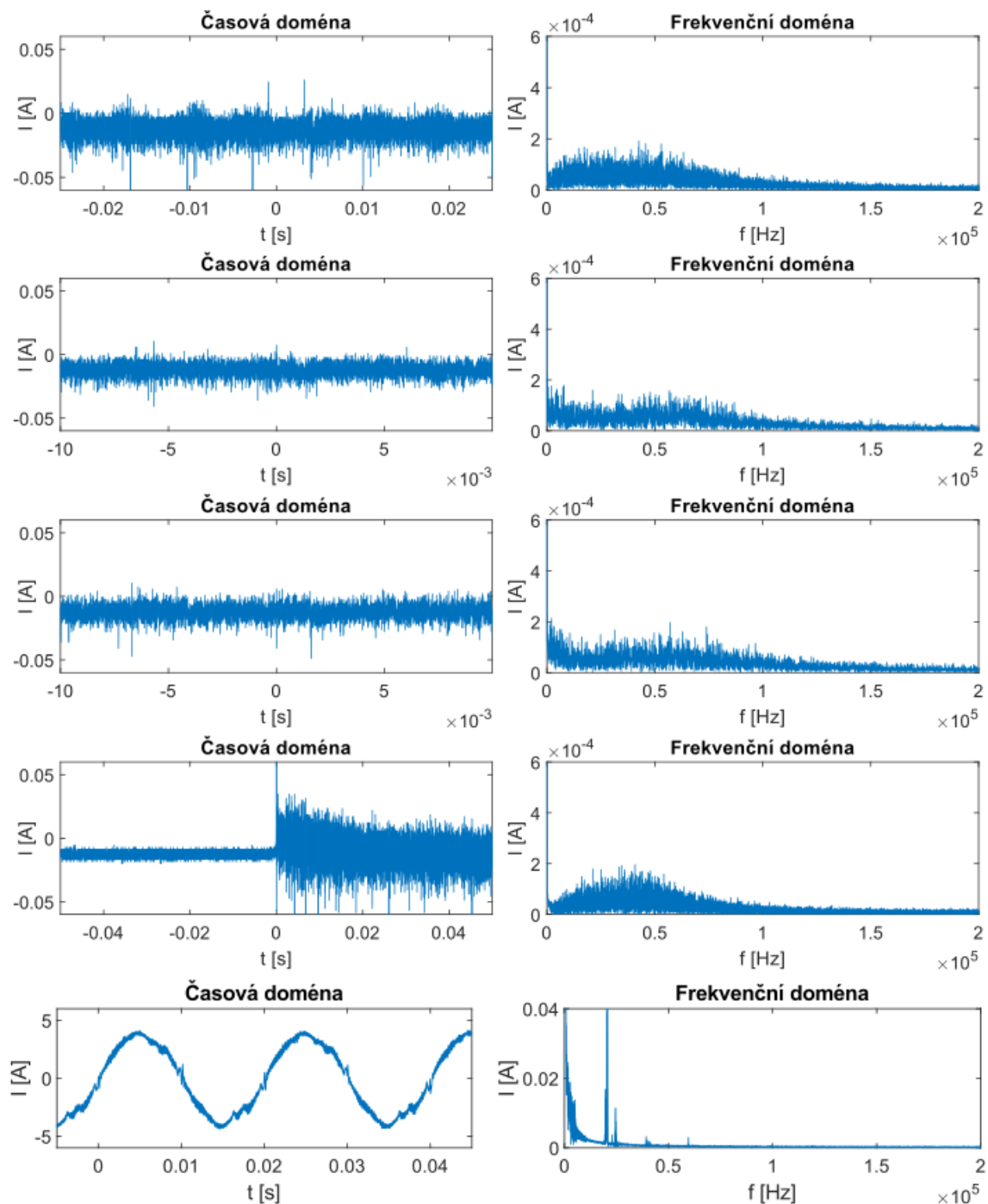
Nebo je pro nové řady možné použít HAL funkce (driverlib):

```
static inline void
CLA_mapTaskVector(uint32_t base, CLA_MVECTNumber claIntVect, uint16_t claTaskAddr);
static inline bool
CLA_getPendingTaskFlag(uint32_t base, CLA_TaskNumber taskNumber);
static inline void
CLA_clearTaskFlags(uint32_t base, uint16_t taskFlags);
static inline void
CLA_forceTasks(uint32_t base, uint16_t taskFlags);
static inline void
CLA_enableTasks(uint32_t base, uint16_t taskFlags);
static inline void
CLA_disableTasks(uint32_t base, uint16_t taskFlags);
```

Obr. C.2: Vývojářská sada C2000Ware - driverlib

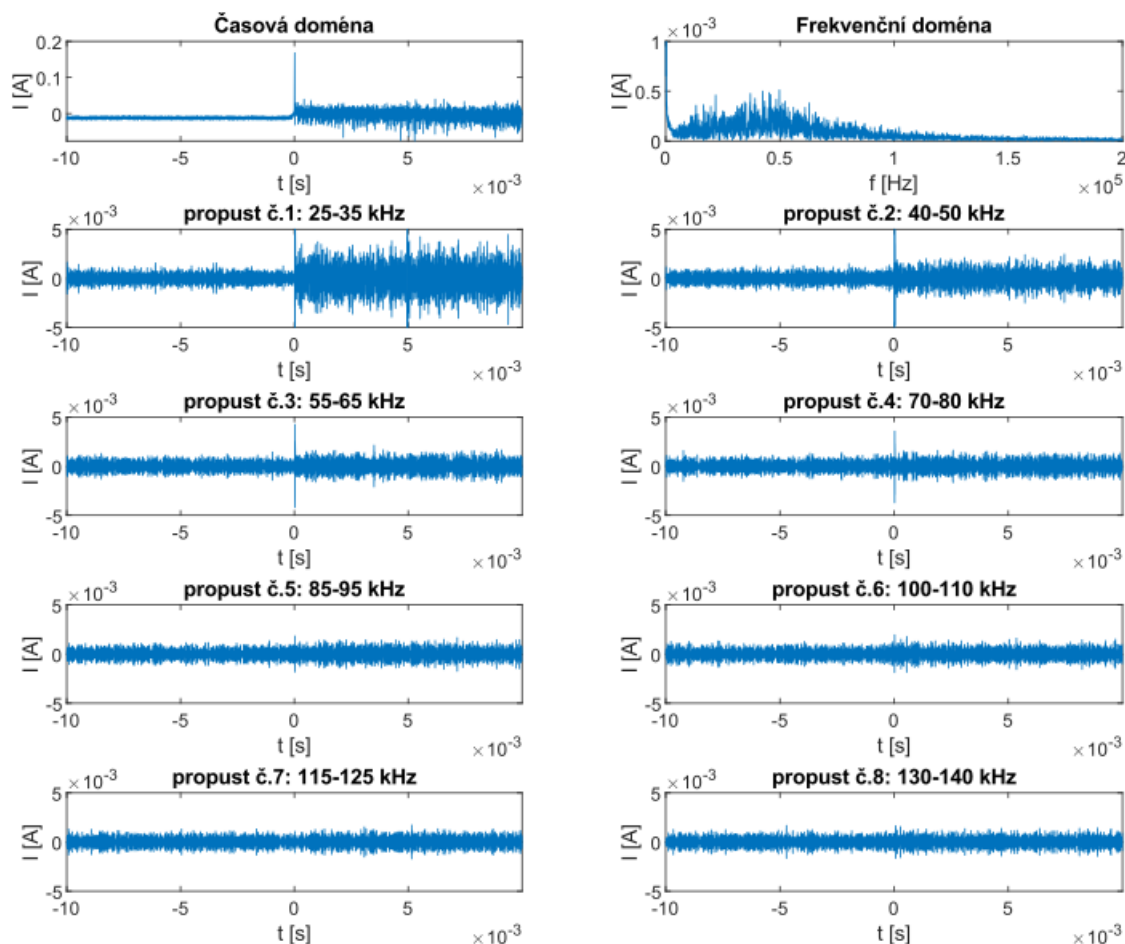
D Detekci zahoření oblouku

První tři grafy odpovídají již hořícímu oblouku o různých délkách, čtvrtý zachycuje proražení elektrické pevnosti a samotné zahoření oblouku a poslední rušení bez oblouku způsobené střídačem.



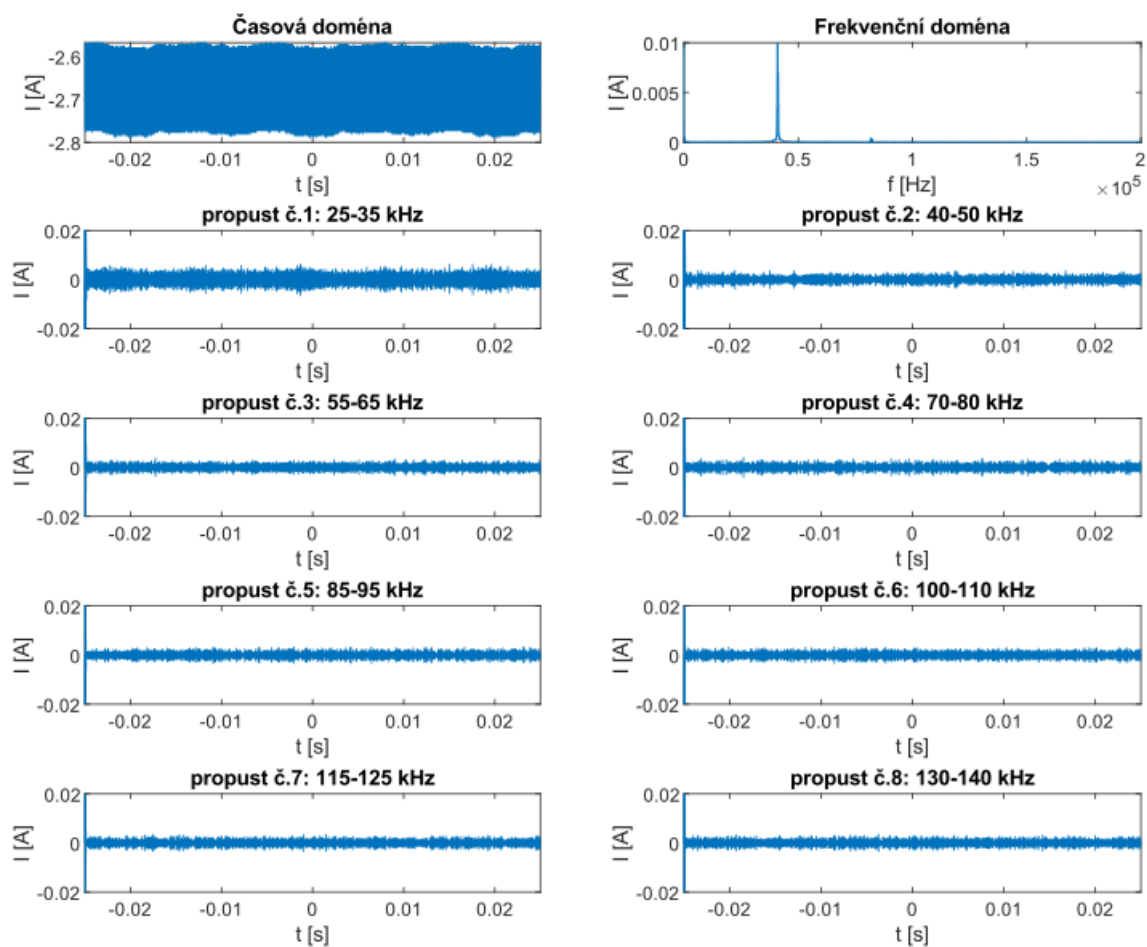
Obr. D.1: Měření pro detekci zahoření oblouku [1]

Na následujících grafech je srovnání signálu po filtraci jednotlivými pásmovými propustmi pro signál s obloukem a bez něj. Je patrné, že nejvyšší vliv mám oblouk v pásmech od 25 do 50 kHz a proto by bylo vhodné přikládat těmto pásmům vyšší váhu.



Obr. D.2: Aplikace filtrů na měření s hořícím obloukem [1]

Při srovnání signálu bez oblouku níže s předchozím signálem je nutné dbát na to, že proud pro měření s obloukem byl takřka o dva řády nižší než pro měření bez oblouku.



Obr. D.3: Aplikace filtrů na měření bez oblouku [1]

E Obsah elektronické přílohy

./	Kořenový adresář přiloženého archivu
└─ LaTeX/	Zdrojové souboru pro sazbu diplomové práce
└─ logo/	Loga školy a ústavů (.pdf)
└─ obrazky/	Grafy, schémata, foto (.png)
└─ pdf/	Stránky generované informačním systémem (.pdf)
└─ text/	Texty diplomové práce (.tex)
└─ a_trqo3o.enc	
└─ beamercolorthemeVUT.sty	
└─ beamerthemeVUT.sty	
└─ nastaveni.tex	
└─ obhaj.tex	
└─ prace.tex	
└─ t1vafle.fdx	
└─ T1-Vafle-Regular.vf	
└─ thesis.sty	
└─ vafle.map	
└─ VafleVUT-Regular.pfb	
└─ VafleVUT-RegularLCDFJ.pfb	
└─ Program/	Zdrojové soubory SW vybavení (verze z 10.5.2024)
└─ MATLAB/	MATLAB skript a měření pro frekvenční zpracování
└─ measurements/	Naměřená data (.csv)
└─ main.m	
└─ STM32F415/	Firmware pro mikrokontroler STM32F415
└─ inc/	Hlavičkové soubory (.h)
└─ src/	Zdrojové soubory (.c)
└─ TMS320F28069/	Firmware pro mikrokontroler TMS320F28069
└─ C28x/	Program jádra C28x - drivery, modbus
└─ inc/	Hlavičkové soubory (.h)
└─ src/	Zdrojové soubory (.c)
└─ CLA/	Program jádra CLA - sdílené proměnné, tasky
└─ inc/	Hlavičkové soubory (.h)
└─ src/	Zdrojové soubory (.c)
└─ ldscripts/	Linkerové skripty (.cmd)
└─ demo.mp4	Demonstrační video - prototyp monitorovacího zařízení
└─ obhaj.pdf	Prezentace pro obhajobu diplomové práce
└─ prace.pdf	Elektronická verze diplomové práce