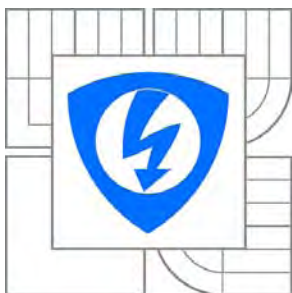




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

FILTRÁČNÍ STRUKTURY PRO FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

FILTERING STRUCTURES FOR FOTOVOLTAIC POWER STATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR HRUŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Petr Hruška

ID: 74437

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Filtrovací struktury pro fotovoltaické elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě měření identifikujte příčinu chvňatosti fotovoltaických článků a s tím související degradaci panelů, tedy snížení celkového výkonu panelů oproti hodnotám udávaným výrobcem. Chvňatost se projevuje na technologii CIGS, kdy dochází k rozkmitání panelů, které toto chvňatění přenesou do konstrukce.

Navrhněte a zkonstruujeďte filtr, který zamezí pronikání signálu nežádoucích kmitů do fotovoltaických panelů. Tento filtr detailně vyzkoušejte v praxi a objektivně posuďte, do jaké míry se provoz fotovoltaické elektrárny optimalizoval.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PETRZELA, J. Teorie elektronických obvodů. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.

[2] DOSTAL, T. Elektrické filtry. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 druhé části druhé, hlavy VI. dílu 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Semestrální práce se věnuje problematice chvění fotovoltaických panelů, která se projevuje především ve slyšitelné oblasti. Od fotoelektrického jevu se postupně dílčími kroky dostává přes fotovoltaický článek, panel, string, elektrárnu k definování příčiny chvění. Cílem práce je návrh elektrického filtru typu dolní propust potlačujícího rušivé složky, který zamezí slyšitelnému chvění panelů a tím i celého systému fotovoltaické elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, střídač, inverter, elektrický filtr dolní propust, technologie CIGS a polykrystalická

ABSTRACT

This thesis is dedicated to an issue of vibration of photovoltaic panels, which manifests itself primarily in the acoustic field. From the photoelectric effect is gradually getting through photovoltaic cell, panel, string, power plant to define the causes of the vibration. The aim of the work is to design electrical low pass filter that suppress disruptive elements, which prevents audible vibrations of panels and the whole system of photovoltaic power plants.

KEYWORDS

photovoltaic cell, photovoltaic panel, inverter, electrical low pass filter, technology CIGS and Polycrystalline

HRUŠKA, P. *Filtrační struktury pro fotovoltaické elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 54s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph. D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Filtrační struktury pro fotovoltaické elektrárny jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. Jiřímu Petrželovi, Ph. D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji p. Janu Chlístovskému ze společnosti DUKOM s.r.o. a Ing. Pavlu Hrzinovi Ph.D z ČVUT fakulty elektrotechnické za konzultace řešených problémů.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	ix
SEZNAM TABULEK	xii
ÚVOD	13
1 FOTOELEKTRICKÝ JEV	14
2 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	15
2.1 Ozáření.....	15
2.2 Základní rozdělení fotovoltaických článků.....	16
2.2.1 Krystalické technologie 1. generace	16
2.2.2 Tenkovrstvé technologie 2. generace	17
2.2.3 CIGS fotovoltaické články	18
2.3 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	19
2.3.1 Standard test condition STC	20
2.3.2 U_{OC} napětí naprázdno	21
2.3.3 I_{SC} proud nakrátko	22
2.3.4 U_{MPP} napětí v bodě maximálního výkonu	22
2.3.5 I_{MPP} proud v bodě maximálního výkonu	22
2.3.6 P_{MAX} maximální výkon	22
2.3.7 FF fill factor	22
3 FOTOVOLTAICKÝ PANEL	23
3.1 Technické parametry fotovoltaického panelu.....	23
4 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA (FVE)	26
4.1 Instalovaný výkon	26
4.1.1 Instalovaný výkon FVE:	26
4.1.2 Instalovaný výkon jednotlivého sektoru FVE – střídače:	26
5 KONKRÉTNÍ APLIKACE FVE	27
5.1 String.....	27
5.2 A string.....	27
5.3 Super string.....	28
5.4 Střídač	29

5.4.1	Pracovní režim střídače	29
5.4.2	Povolené vstupní hodnoty střídače VACON NX (DC strana)	31
6	DEFINOVÁNÍ ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	33
6.1	Naměřené hodnoty rušení.....	34
6.2	Komerční střídače vybavené filtrem.....	35
7	URČENÍ IMPEDANCE ZÁTĚŽE Z_{IN}	37
8	URČENÍ IMPEDANCE ZÁTĚŽE Z_{OUT}	42
8.1	Metoda 1 – měření stringu	42
8.2	Metoda 2 – měření modulu.....	43
8.3	Vyhodnocení naměřených hodnot	44
9	SHRNUTÍ – VSTUPNÍ HODNOTY impedance PRO VÝPOČET FILTRU	46
10	ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH FILTRŮ	47
11	VÝPOČET ELEKTRICKÉHO FILTRU	49
11.1	Π článek.....	49
11.2	T článek	49
11.3	Výsledné vypočtené hodnoty	50
12	VÝSLEDNÉ FILTRY PRO REALIZACI	51
12.1	Π ČLÁNEK $Z_{IN} = 37\Omega$ a $Z_{OUT} = 46\Omega$, pro spínací frekvenci 5714Hz	51
12.2	Π ČLÁNEK $Z_{IN} = 46\Omega$ a $Z_{OUT} = 39\Omega$, pro spínací frekvenci 6896Hz	52
12.3	T ČLÁNEK $Z_{IN} = 37\Omega$ a $Z_{OUT} = 46\Omega$, pro spínací frekvenci 5714Hz.....	52
12.4	T ČLÁNEK $Z_{IN} = 46\Omega$ a $Z_{OUT} = 39\Omega$, pro spínací frekvenci 6896Hz.....	53
13	SESTROJENÍ FILTRU	55
13.1	Nevhodný M-článek.....	56
13.2	Schéma zapojení filtru a montáž filtru.....	56
14	HOTOVÝ VÝROBEK	57
14.1	Porovnání naměřených rušivých hodnot bez a s filtrem.....	58
14.2	Vyhodnocení vlivu filtru DP na teplotu.....	58
14.2.1	Zahřívání filtru	58
14.2.2	Změna teploty na AC sinusovém filtru	59
15	PROFESIONÁLNÍ VERZE VÝROBKU	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Rozdělení fotoelektrické jevu.....	14
Obrázek 1.2	Princip fotovoltaické přeměny (převzato z [2])	14
Obrázek 2.1	Přímé vs. difúzní záření v podmínkách ČR (převzato z [3]).....	15
Obrázek 2.2	Struktura reálného FV článku (převzato z [4])	16
Obrázek 2.3	Porovnání vzhledu monokrystalického a polykrystalického c-Si článku (převzato z [4])	17
Obrázek 2.4	Struktury různých typů tenkovrstvých fotovoltaických článků (převzato z [4])	18
Obrázek 2.5	Podrobnější popis struktury CIGS článku (převzato z [1]).....	19
Obrázek 2.6	Vzhled CIGS článku	19
Obrázek 2.7	Sluneční spektra (převzato z [5]).....	20
Obrázek 2.8	. volt – ampérová charakteristika „IDEAL STC“ CIGS panelu Q.smart UF L95 21	
Obrázek 2.9	volt – ampérová charakteristika „RAW, STC, IDEAL STC“ CIGS panelu Q.smart UF L95	21
Obrázek 3.1	Polykrystalické panely (vlevo) a CIGS panely (vpravo).....	23
Obrázek 3.2	datasheet CIGS modulů výrobce Q.CELLS (převzato z [7]).....	24
Obrázek 3.3	datasheet Polykrystalických modulů výrobce ETsolar (převzato z [8]) .	25
Obrázek 5.1	schéma zapojení stringu.....	27
Obrázek 5.2	schéma zapojení A stringu	28
Obrázek 5.3	schéma zapojení Super stringu – technologie CIGS.....	29
Obrázek 5.4	Určení bodu maximálního výkonu (MPP) pomocí derivace výkonu (převzato z [4])	30
Obrázek 5.5	Vliv spínací frekvence na výstupní proud.....	30
Obrázek 5.6	schematické zapojení střídače VACON NX.....	31
Obrázek 5.7	hodnoty (výkyvy) U_{MPP} během pracovního režimu střídače VACON	32
Obrázek 5.8	hodnoty I_{MPP} během pracovního režimu střídače VACON	32
Obrázek 6.1	Blokové zapojení FVE	33
Obrázek 6.2	konstrukce FV panelů kapacitní spojení vůči zemi.....	33
Obrázek 6.3	screen scopemeteru – měřeno na technologii CIGS, program 5,7kHz.	34
Obrázek 6.4	screen scopemeteru – měřeno na technologii Polykrystalické, program	

6,9kHz.....	35
Obrázek 6.5 screen scopemeteru – střídač SMA	35
Obrázek 7.1 Schéma zapojení výstupního AC LC filtru.....	37
Obrázek 7.2 Skutečné osazení jednotlivých součástí.....	38
Obrázek 7.3 Výsledná Z vstupní při frekvenci 5,7kHz	39
Obrázek 7.4 Zobrazení Z vstupní při frekvenci 5,7kHz ve Smithově diagramu	39
Obrázek 7.5 Výsledná Z vstupní při frekvenci 6,9kHz	40
Obrázek 7.6 Zobrazení Z vstupní při frekvenci 6,9 kHz ve Smithově diagramu	40
Obrázek 8.1 Kapacita modulu vůči uzemněné podpůrné konstrukci	42
Obrázek 8.2 Vynesené hodnoty kapacity CIGS stringu do grafů	43
Obrázek 8.3 Vynesené hodnoty kapacity CIGS modulu do grafů.....	44
Obrázek 10.1 Modulové charakteristiky filtrů (převzato z [10])	47
Obrázek 10.2 Kmitočtové charakteristiky základních typů filtrů dle aproximace (převzato z [10])	48
Obrázek 11.1 Π článek.....	49
Obrázek 11.2 T článek	50
Obrázek 12.1 Schéma zapojení Π článku v programu PSPICE.....	51
Obrázek 12.2 Modulová charakteristika Π článku v programu PSPICE.....	51
Obrázek 12.3 Schéma zapojení Π článku v programu PSPICE.....	52
Obrázek 12.4 Modulová charakteristika Π článku v programu PSPICE.....	52
Obrázek 12.5 Schéma zapojení T článku v programu PSPICE	53
Obrázek 12.6 Modulová charakteristika T článku v programu PSPICE	53
Obrázek 12.7 Schéma zapojení T článku v programu PSPICE	53
Obrázek 12.8 Modulová charakteristika T článku v programu PSPICE	54
Obrázek 13.1 Použité kondenzátory	55
Obrázek 13.2 Použitá indukčnost	55
Obrázek 13.3 Schéma zapojení filtru.....	56
Obrázek 14.1 Osazený filtr mezi střídač a Super string.....	57
Obrázek 14.2 Rušivá složka mezi DC vodiči a zemním spojením bez použití filtru	58
Obrázek 14.3 Odfiltrovaná ušivá složka mezi DC vodiči a zemním spojením při použití filtru.....	58
Obrázek 14.4 Měření teploty filtru.....	59
Obrázek 14.5 Měření teploty AC sinusového filtru při použití navrhnutého filtru DP	

	60	
Obrázek 14.6	Měření teploty AC sinusového filtru bez použití navrhnutého filtru DP 60	
Obrázek 15.1	Profesionální verze výrobku.....	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Naměřené hodnoty kapacity CIGS stringu.....	42
Tabulka 2	Naměřené hodnoty kapacity CIGS modulu.....	43
Tabulka 3	Výpočet zatěžovací impedance.....	45
Tabulka 4	Vstupní hodnoty pro výpočet filtru – impedance.....	46
Tabulka 5	Výsledných vypočtených hodnot součástek LC	50
Tabulka 6	Výroba za celý den	59

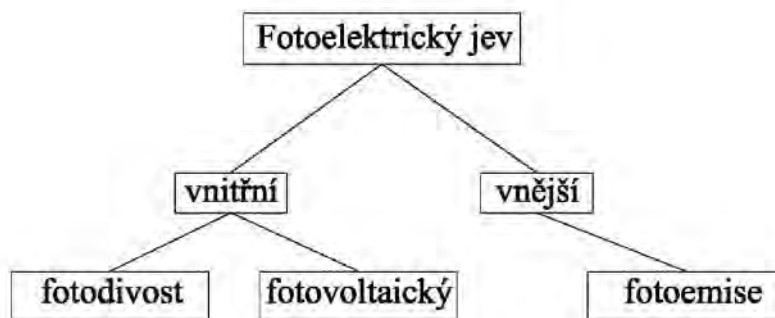
ÚVOD

Prvotním základem pro sestavení fotovoltaického článku bylo objevení fotoelektrického jevu v roce 1839 francouzským fyzikem Alexandrem Edmondem Becquerelem. Fyzikálně jev popsal Albert Einstein v roce 1905, za což roku 1921 získal Nobelovu cenu za fyziku.

Hlavním impulsem rozvoje fotovoltaiky byl nástup dobývání kosmického prostoru v 2. polovině 20. století. Solární články začaly sloužit jako zdroj energie pro vesmírné družice. Avšak komerčnímu rozšíření fotovoltaických systémů pomohla celosvětová ropná krize v 70. letech 20. století, která odstartovala zájem o alternativní zdroje energie.

1 FOTOLEKTRICKÝ JEV

Ozařujeme-li svazkem světla s dostatečně krátkou vlnovou délkou čistý kovový povrch, potom vyráží světlo z tohoto povrchu elektrony.

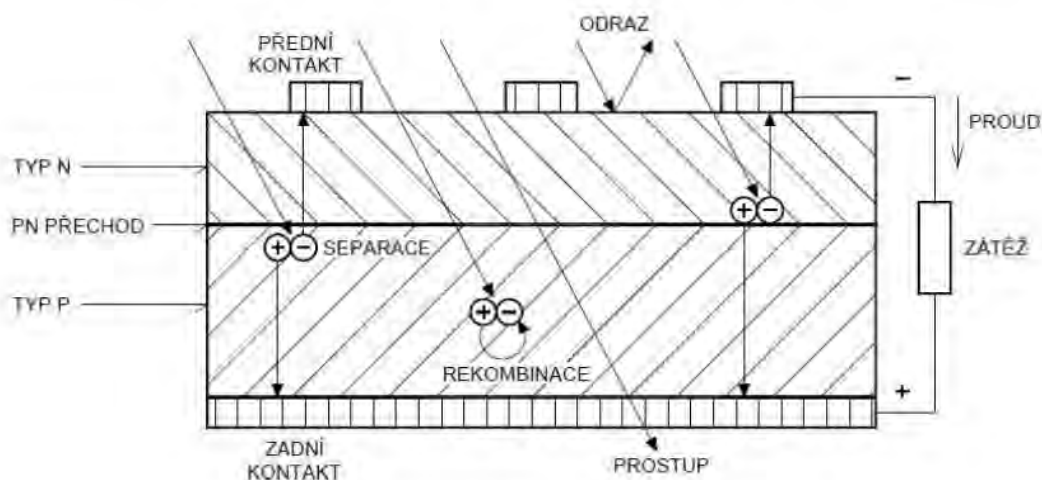


Obrázek 1.1 Rozdělení fotoelektrického jevu

Fotoelektrický jev, jak je znázorněn na Obr. 1.1, je možné rozdělit do dvou skupin. V případě, že jev probíhá na povrchu látky a působením elektromagnetického záření jsou elektrony uvolňovány do okolního prostředí, nazýváme takovou situaci vnějším fotoelektrickým jevem. Takto uvolněné elektrony bývají často označovány jako fotoelektrony a celý děj fotoemisí.

V případě fotovoltického jevu se jedná o takzvaně vnitřní fotoelektrický jev, který probíhá při ozáření určitých druhů polovodičů, kdy dodáním kvanta energie se elektron neuvolní z látky, ale pouze se z něj stane volný elektron v látce.

Vzájemným působením slunečního záření a hmoty dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů, v polovodiči pak vznikají volné elektrické náboje (páry elektron-díra)[1].



Obrázek 1.2 Princip fotovoltické přeměny (převzato z [2])

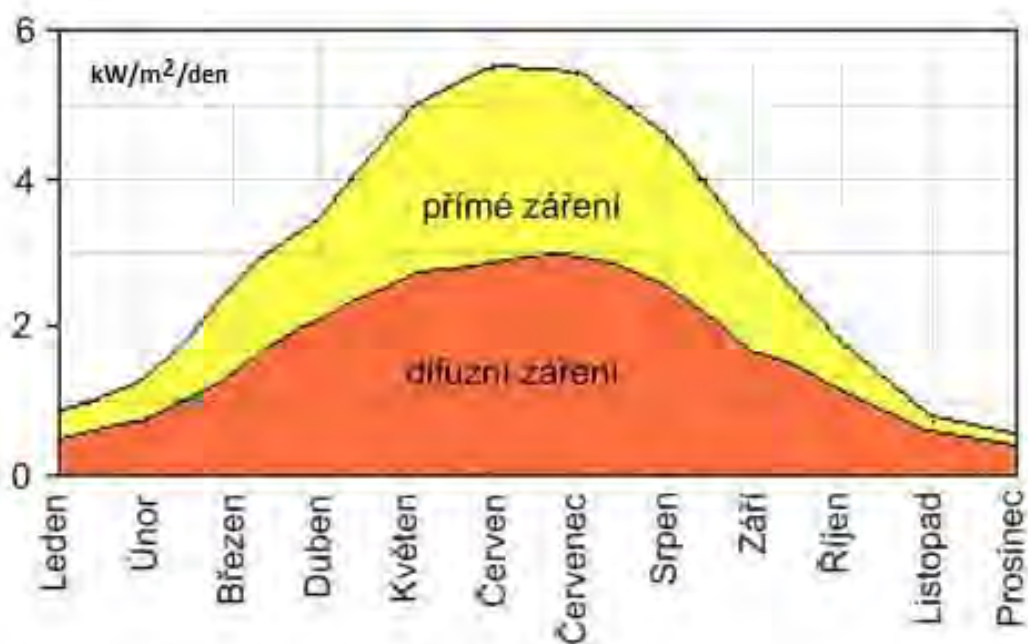
2 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka (P-N přechod) o velké ploše (obvykle dm^2), která přeměňuje světelnou energii na elektrickou. K přeměně využívá fotoelektrický jev, kdy je při dopadu fotonu generován pár elektron – díra. Spojení fotovoltaických článků nazýváme fotovoltavaickým panelem (obvykle 1m^2 - $1,5\text{m}^2$).

2.1 Ozáření

Pro funkci fotovoltaického článku je potřeba dopad dostatečného množství slunečního záření. Intenzita slunečního záření je charakterizována hustotou výkonu dopadajícího na povrch země. Intenzita záření – ozáření - $G[\text{W}/\text{m}^2]$ je součtem dílčích intenzit přímého, difúzního a odraženého záření dopadajícího na plochu odkloněnou o úhel α od jihu a úhel β od horizontální roviny.

- přímé záření B
paprsky světla, které nejsou ani odražené, ani rozptýlené
- difúzní záření D
přichází z celé oblohy mimo sluneční kotouč
- odražené záření R
je záření odražené od okolních předmětů
- celkové záření G
 $G = B + D + R [\text{W}/\text{m}^2]$



Obrázek 2.1 Přímé vs. difúzní záření v podmínkách ČR (převzato z [3])

2.2 Základní rozdělení fotovoltaických článků

Je vyvinuta celá řada technologií, která lze rozdělit do 3 základních generací.

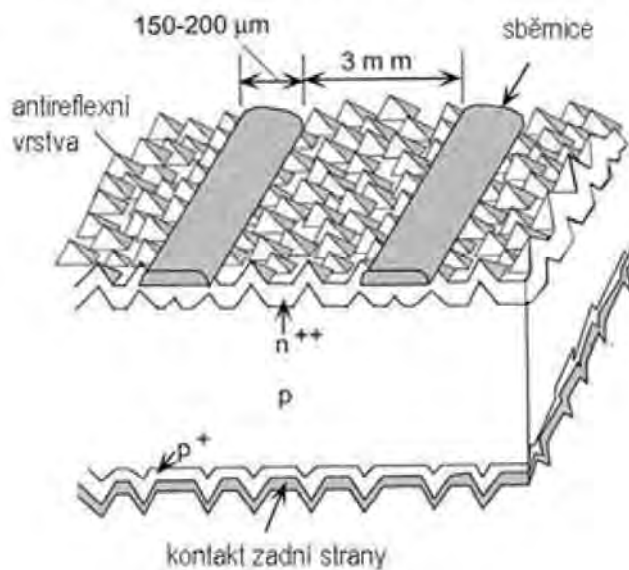
- První generace fotovoltaických článků je založena na zpracování krystalického křemíku
- Druhá generace fotovoltaických článků je založena na depozici velmi tenkých mikrometrických vrstev na nosnou podložku
- Třetí generace fotovoltaických článků navazuje na generaci druhou a je založena na přípravě nových materiálů jako jsou nanomateriály, fotocitlivá barviva, polymerní vrstvy nebo vícevrstvé struktury

Hlavním stavebním materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Můžeme jej roztrždit podle struktury, v jaké se v daném článku nachází.

- Monokrystalický křemík
- Polykrystalický křemík
- Amorfní křemík

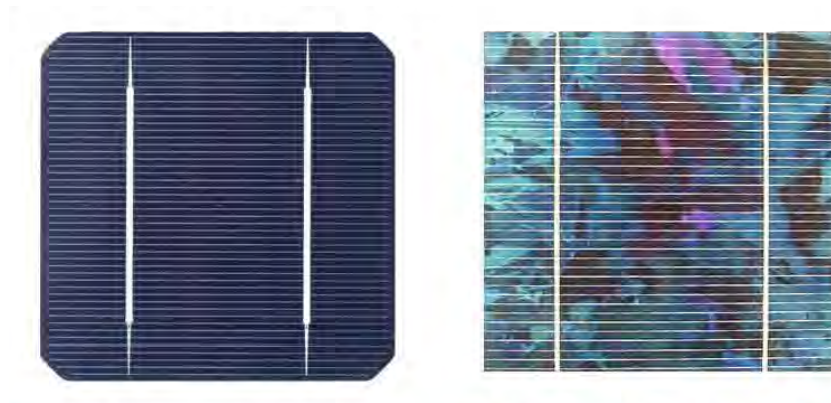
2.2.1 Krystalické technologie 1. generace

Křemík je velmi vhodný materiál pro výrobu fotovoltaických článků, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur.



Obrázek 2.2 Struktura reálného FV článku (převzato z [4])

Výchozím materiálem pro výrobu FV článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky (obvykle typu P) čtvercového tvaru o rozměrech až 200x200 mm a rezistivitě řádově jednotky Ωcm . Počátek výroby FV článků byl spojen s monokrystalickým (CZ) křemíkem. Potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla v sedmdesátých letech k vývoji multikrystalického křemíku (řízené tuhnutí taveniny v blocích). Tato technologie přispěla k úsporám materiálu a snížení investičních nákladů, na druhé straně náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a hranice zrn zvyšují ztráty rekombinací. Vývojem technologie se podařilo značně přiblížit účinnost článků z multikrystalického křemíku účinnosti článků z křemíku monokrystalického [4].



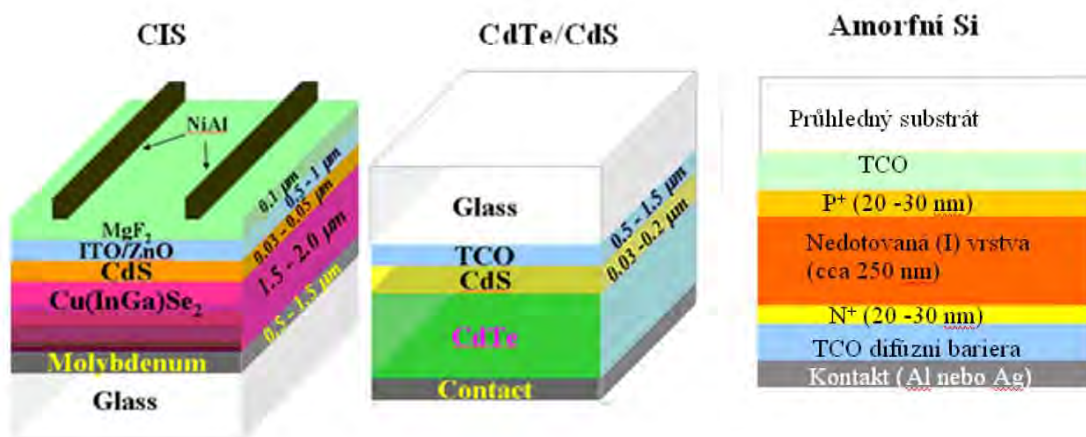
Obrázek 2.3 Porovnání vzhledu monokrystalického a polykrystalického c-Si článku (převzato z [4])

2.2.2 Tenkovrstvé technologie 2. generace

U technologie druhé generace bylo dosaženo minimalizace surovin potřebných k výrobě fotovoltaického panelu. Technologie umožnila vyrábět fotovoltaické fólie, jejichž užitečnou vlastností je ohebnost. FV články vyrobené tenkovrstvou technologií (THPV thin film photovoltaic cells) mají nanesenou jednu nebo více vrstev fotovoltaického materiálu na sklo. Tloušťka těchto vrstev se pohybuje od několika nanometrů po řády desítek mikrometrů. Nejběžnější materiály jsou:

- amorfni křemík a-Si
- mikrokrystalický křemík
- telurid kademnatý (CdTe) a sulfid kadmia (CdS)
- CIS nebo CIGS články

C	měď (copper)
I	indium
G	galium
S	selen

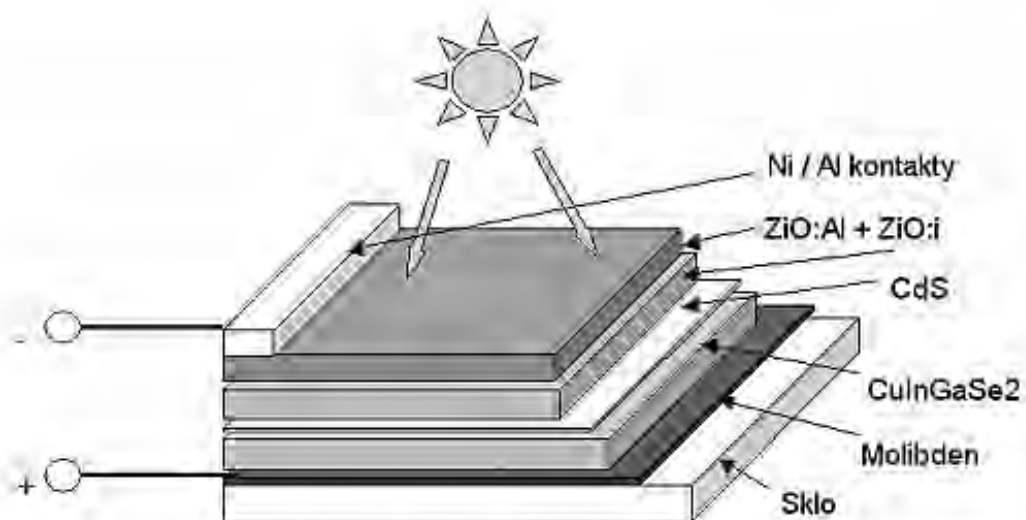


Obrázek 2.4 Struktury různých typů tenkovrstvých fotovoltaických článků (převzato z [4])

2.2.3 CIGS fotovoltaické články

CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide) FV články využívají jako aktivní vrstvu sloučeninový polovodič ze čtyř prvků: měď, indium, galium a selen (CIGS). Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny napařovací technologií. Mezi hlavní výhody článku patří jeho schopnost reagovat na červenou složku světla, která převládá při zatažené obloze nebo mlze. To představuje velkou výhodu v oblastech s počasím typickým pro střední Evropu. CIGS technologie je účinnější při malém osvětlení a proto množství vyrobené elektrické energie bývá často větší než u křemíkových článků. Často bývá, jako další velká výhoda, uváděna velká stabilita účinnosti, tedy nižší míra degradace než v případě ostatních tenkovrstvých technologií, jejichž výkon může rapidně klesat s dobou užívání. Za jistou nevýhodu této technologie můžeme považovat to, že zásoby materiálů použitých při její výrobě, především In, Te, jsou omezené [1].

CIGS je pevný kompozitní polovodičový materiál (typ P) se šířkou zakázaného pásu od 1,0 do 1,7 eV. V případě CIGS FV článků se nejčastěji používají polovodiče ve formě polykrystalické tenké vrstvy. Na rozdíl od křemíku, který světlo absorbuje až hluboko v objemu, u CIGS se až 95% veškerého dopadajícího záření zachytí již v prvním mikrometru materiálu pod povrchem. Solární článek může existovat jako heteropřechod obsahující nejčastěji vrstvu CdS, která slouží jako polovodič typu N. Je však možné použít i heteropřechod, který obsahuje pouze CIGS polovodič, a přímo na něj nanést průhlednou ZnO₂ elektrodou (katodu). Tato vlastnost umožňuje vyrábět fotovoltaické články velmi tenké, řádově jen několik mikrometrů. Oba druhy struktur pak bývají umístěny na podložce z molybdenu, který tvoří anodu. [1]



Obrázek 2.5 Podrobnější popis struktury CIGS článku (převzato z [1])



Obrázek 2.6 Vzhled CIGS článku

2.3 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU

Parametry článku jsou popsány čtyřmi, respektive pěti, základními parametry. Graficky je lze velmi dobře znázornit na volt – ampérovou (V-A) charakteristice.

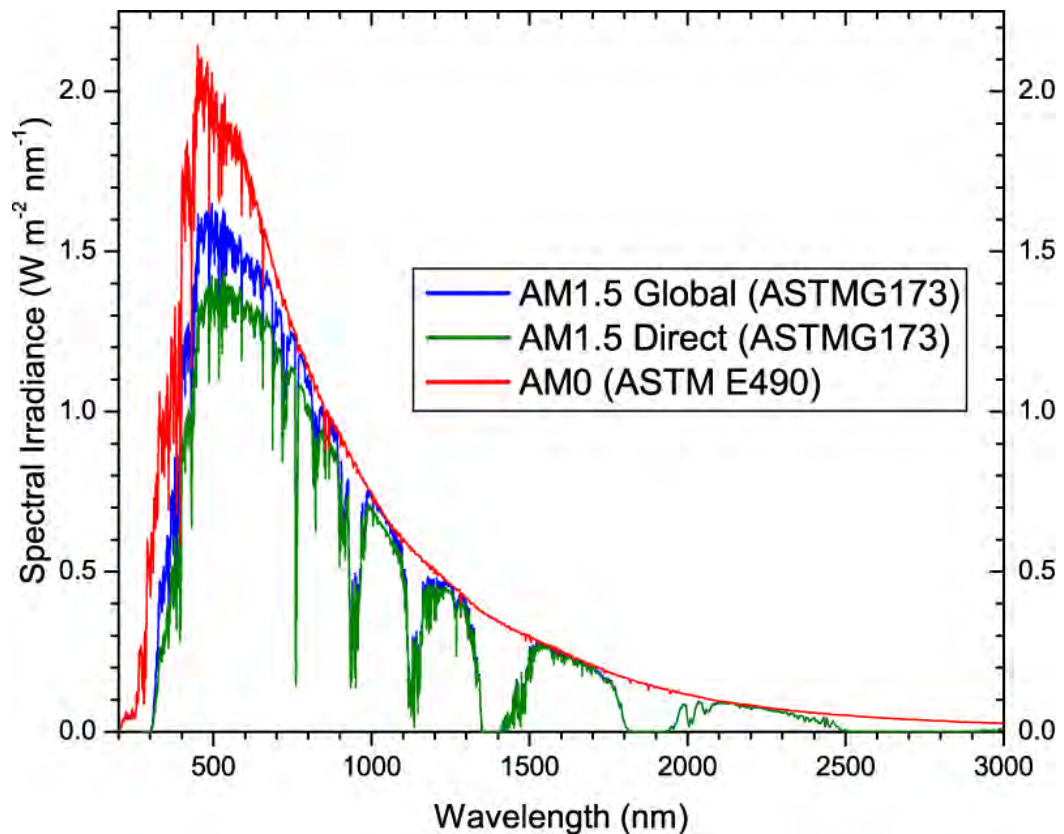
- U_{OC} napětí naprázdno
- I_{SC} proud nakrátko
- U_{MPP} napětí v bodě maximálního výkonu
- I_{MPP} proud v bodě maximálního výkonu
- P_{MAX} výkon, který může článek maximálně dodávat

Uvedené parametry lze na volt – ampérové charakteristice znázornit třemi způsoby.

- Ideální hodnoty (Ideal STC)
udávané výrobcem za standardních testovacích podmínek (STC – standard test condition)
- Měřené hodnoty (Raw)
získané měřicími přístroji v reálném terénu při různých povětrnostních podmínkách
- Přepočtené hodnoty (STC)
měřené hodnoty dopočítané k STC

2.3.1 Standard test condition STC

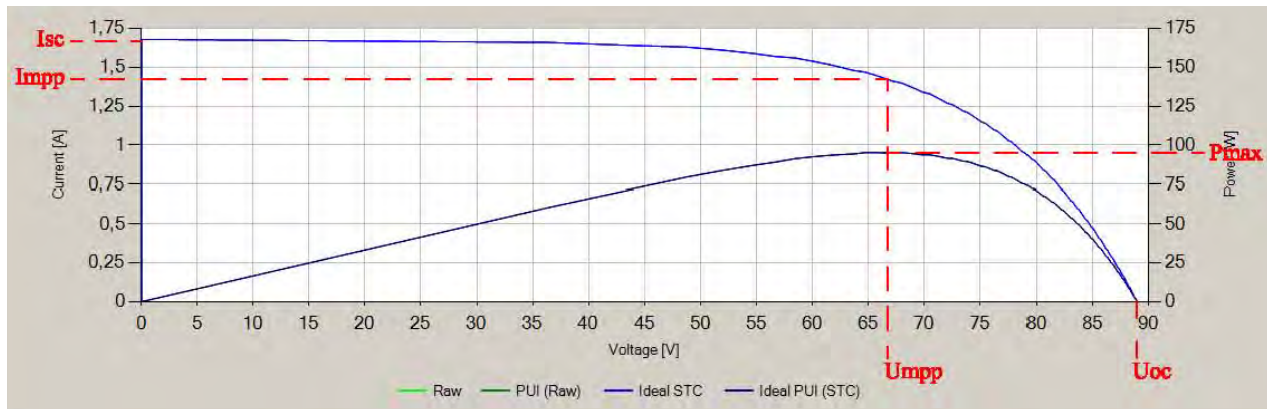
Jsou to normalizované podmínky pro měření určené hodnotou ozáření $G = 1000$ $[W/m^2]$, teplotou okolí $25^\circ C$ a AM 1,5G spektrum.



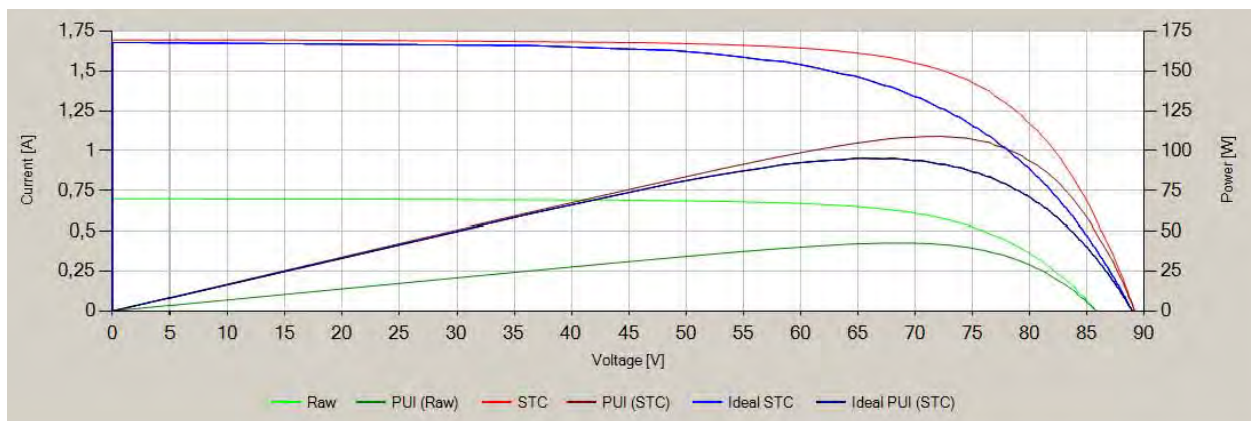
Obrázek 2.7 Sluneční spektra (převzato z [5])

- AM0 – sluneční spektrum před průchodem zemskou atmosférou. Výkon $1366,1 W/m^2$
- AM1,5D a AM1,5G jsou dva definované standardy pro pozemní použití po průchodu zemskou atmosférou.
- AM1,5D – přímá složka záření

- AM1,5G – celkové množství dopadajícího záření včetně difúzní složky



Obrázek 2.8 . volt – ampérová charakteristika „IDEAL STC“ CIGS panelu Q.smart UF L95



Obrázek 2.9 volt – ampérová charakteristika „RAW, STC, IDEAL STC“ CIGS panelu Q.smart UF L95

2.3.2 U_{OC} napětí naprázdno

Jedná se o napětí fotovoltaického článku bez zátěže, tedy při proudu $I=0A$. V případě, kdy budeme uvažovat sériový odpor $R_S = 0 \Omega$ a paralelní odpor $R_P = \infty \Omega$, můžeme použít pro napětí naprázdno výraz

$$U_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right) \quad (2.1)$$

- $q = 1,602176565 \cdot 10^{-19} [C]$ velikost elementárního náboje
- I_S saturační proud
- $T [K]$ termodynamická teplota
- $k [J/K]$ Boltzmannova konstanta

Sériový odpor R_S je dán součtem odporů kontaktů, substrátů, přechodů a vrstev daného článku.

Paralelní odpor R_p je způsoben především ztrátami (zkraty) na hranách článku. Projevují se zde také krystalové defekty a částice cizích příměsí v oblasti přechodu [6].

2.3.3 I_{sc} proud nakrátko

Proudem nakrátko nebo také zkratovým proudem je označován proud, tekoucí fotovoltaickým článkem při napětí 0 V.

2.3.4 U_{MPP} napětí v bodě maximálního výkonu

Napětí, při němž fotovoltaický článek dodává maximální výkon

2.3.5 I_{MPP} proud v bodě maximálního výkonu

Proud, při němž fotovoltaický článek dodává maximální výkon

2.3.6 P_{MAX} maximální výkon

Maximální výkon, který může článek dodávat při U_{MPP} a I_{MPP} . Bod maximálního výkonu lze na V-A charakteristice najít zhruba uprostřed ohybu. Zátěž článku je vhodné dimenzovat tak, aby článek pracoval právě v okolí bodu maximálního výkonu. Jen tak může FV článek maximálně využít dopadající sluneční energii.

$$P_{MAX} = U_{MPP}I_{MPP} \quad (2.2)$$

2.3.7 FF fill factor

Činitel plnění je procentuální poměr nejvyššího dosažitelného výkonu článku P_{MAX} a výkonu vypočteného jako součin napětí naprázdno a proudu nakrátko. Fill factor je možné považovat za klíčový parametr sloužící ke klasifikaci a kategorizaci fotovoltaických článků. Hodnota FF se u komerčně vyráběných článků pohybuje v okolí hodnoty 70% [6]. Vzorec pro výpočet je

$$FF = \frac{I_{MPP}U_{MPP}}{I_{sc}U_{oc}} = \frac{P_{MAX}}{P_o} \quad (2.3)$$

3 FOTOVOLTAICKÝ PANEL

Fotovoltaický panel (modul) se skládá z několika propojených fotovoltaických článků vložených mezi dvě skleněné nebo plastové desky, které je tak chrání před povětrnostními vlivy. Fotovoltaické články jsou v zapojení sériovém, paralelním nebo sério – paralelním zapojením do jednoho nerozebíratelného celku.

Panely se zpravidla instalují v rámech (typicky Polykrystalická technologie) nebo bez rámu (typicky CIGS technologie) na nosnou konstrukci elektrárny.



Obrázek 3.1 Polykrystalické panely (vlevo) a CIGS panely (vpravo)

3.1 Technické parametry fotovoltaického panelu

Různé modely a technologie panelů dosahují různých parametrů. Krystalické technologie jsou oproti CIGS větších rozměrů (plocha 2m^2), napětí jsou výrazně nižší (cca 40V), proudy výrazně vyšší (cca 7A). Naopak CIGS technologie jsou menších rozměrů (plocha 1m^2), avšak vyšších napětí (cca 100V), proudově nižší (cca 1,5A).

Hodnoty panelů se liší dle zvoleného typu. V datasheetu jsou uvedené parametry měřené při STC.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS							
PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS (STC: 1000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5 SPECTRUM) ¹							
POWER CLASS			95	100	105	110	115
Nominal Power (+5/-0 Wp)	P _{MAX}	[W]	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0
Short Circuit Current	I _{SC}	[A]	1.68	1.68	1.68	1.69	1.69
Open Circuit Voltage	V _{OC}	[V]	89.0	90.1	91.6	93.3	95.1
Current at Maximum Power	I _{MPP}	[A]	1.43	1.46	1.49	1.52	1.54
Voltage at Maximum Power	V _{MPP}	[V]	66.4	68.5	70.5	72.4	74.7
Nominal Efficiency	η	[%]	≥10.1	≥10.6	≥11.2	≥11.7	≥12.2
PERFORMANCE AT NORMAL OPERATING CELL TEMPERATURE (NOCT: 800 W/m ² , 51 ±2 °C, AM 1.5 SPECTRUM)							
POWER CLASS			95	100	105	110	115
Nominal Power	P _{MAX}	[W]	68.7	72.3	75.9	79.5	83.1
Short Circuit Current	I _{SC}	[A]	1.34	1.34	1.34	1.35	1.35
Open Circuit Voltage	V _{OC}	[V]	81.0	82.0	83.4	84.9	86.5
Current at Maximum Power	I _{MPP}	[A]	1.14	1.16	1.18	1.21	1.22
Voltage at Maximum Power	V _{MPP}	[V]	60.2	62.1	64.0	65.7	67.8

¹ Measurement accuracy: ±10 %. All STC measurements based on pre-treatment of modules with 1 hour light soak (1000 W/m² [1 kWh/m²], in open circuit) followed by cool down to 25 °C. For the system conception, please take into account the typical relative V_{OC} and V_{MPP} power increase of 2.5 % after 215 kWh/m² light soaking. This power boost is not included in the nominal values of this data sheet.

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE				CHARACTERISTICS AT DIFFERENT TEMPERATURES AND IRRADIANCES			
<p>The typical relative change in module efficiency (at nominal power) at an irradiance of 200 W/m² in relation to 1000 W/m² (both at 25 °C and AM 1.5 spectrum) is -4.0 % rel.</p>							
TEMPERATURE COEFFICIENTS (AT 1000 W/m ² , AM 1.5 SPECTRUM)							
Temperature Coefficient of I _{SC}	α	[%/K]	+ 0.00 ± 0.04	Temperature Coefficient of V _{OC}	β	[%/K]	-0.29 ± 0.04
Temperature Coefficient of P _{MAX}	γ	[%/K]	-0.38 ± 0.04				
PROPERTIES FOR SYSTEM DESIGN							
Maximum System Voltage V _{ETRS}	[V]	1000 (IEC) / 600 (UL 1703)	Safety Class	II			
Maximum Reverse Current I _R	[A]	5.1	Fire Rating	C			
Wind/Snow Load	[Pa]	2400	Permitted module temperature on continuous duty	-40 °C up to +85 °C			

Obrázek 3.2 datasheet CIGS modulů výrobce Q.CELLS (převzato z [7])

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Model type	ET-P672280	ET-P672275	ET-P672270	ET-P672265	ET-P672260	ET-P672255
Peak power (Pmax)	280W	275W	270W	265W	260W	255W
Cell Efficiency	16.47%	16.18%	15.89%	15.59%	15.30%	15.00%
Module Efficiency	14.43%	14.17%	13.92%	13.66%	13.40%	12.14%
Maximum power voltage (Vmp)	36.72V	36.72V	36.40V	36.40V	36.00V	35.20V
Maximum power current (Imp)	7.63A	7.49A	7.42A	7.28A	7.23A	7.23A
Open circuit voltage (Voc)	43.78V	43.78V	43.63V	43.63V	43.49V	43.88V
Short circuit current (Isc)	7.98A	7.96A	7.90A	7.90A	7.79A	7.85A
Power Tolerance	-1 to +3%					
Maximum system voltage	DC 600V					
Normal Operating Cell Temperature	45.3±2°C					
Series fuse rating (A)	15A					
Number of bypass diode	3					

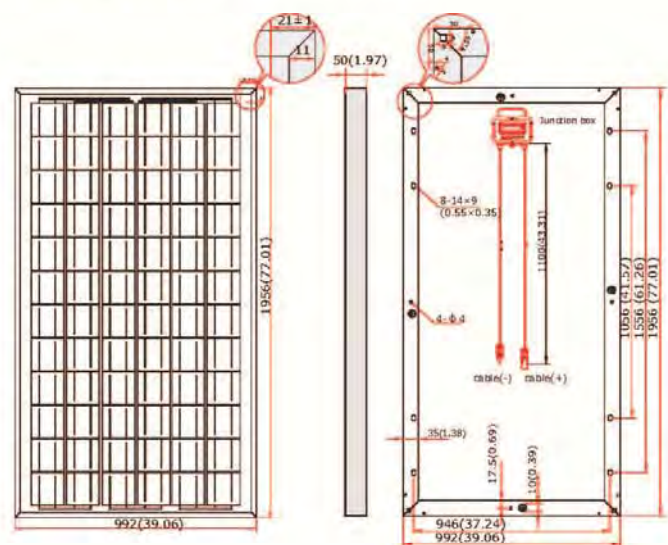
MECHANICAL SPECIFICATIONS

Cell type	156mm x 156mm
Number of cells	72 cells in series
Weight	22.86 kg (50.4 lbs)
Dimensions	1956×992×50 mm (77×39.1×1.97 inch)
Max Load	2400Pascals (50 lb/ft ²)

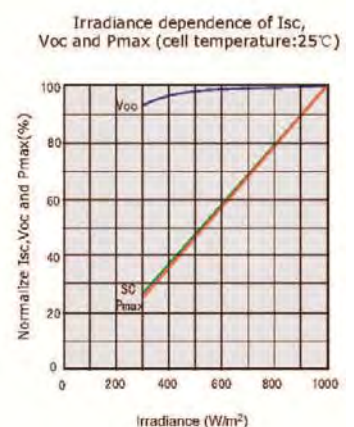
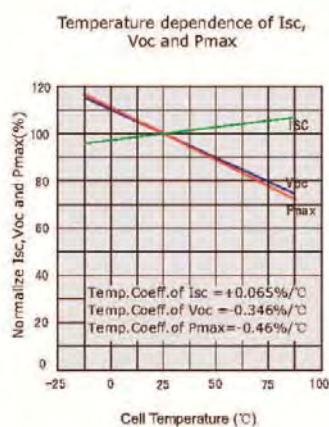
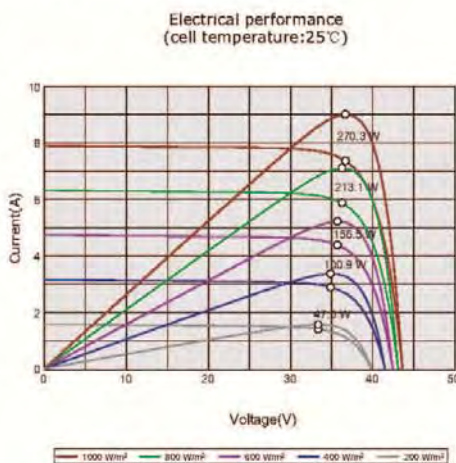
TEMPERATURE COEFFICIENT

Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.065 %/°C
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.346 %/°C
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.46 %/°C

PHYSICAL CHARACTERISTICS Unit:mm (inch)



ELECTRICAL CHARACTERISTICS



Obrázek 3.3 datasheet Polykrystalických modulů výrobce ETsolar (převzato z[8])

4 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA (FVE)

Výrobna přeměňuje na prvním kroku sluneční energii na energii elektrickou fotovoltaickými články. Vygenerovaná energie odchází z fotovoltaických článků v tzv. strinzích vedením do střídačů, kde dochází k přeměně stejnosměrné energie na střídavou.

4.1 Instalovaný výkon

Udává se v jednotce Wattpeak [Wp]. Instalovaný výkon jednoho panelu je roven hodnotě P_{MAX} daného panelu při Ideal STC.

4.1.1 Instalovaný výkon FVE:

Instalovaný výkon FVE je dílčí součet výkonů P_{MAX} všech instalovaných fotovoltaických panelů v dané FVE.

4.1.2 Instalovaný výkon jednotlivého sektoru FVE – střídače:

Instalovaný výkon jednotlivého sektoru FVE – střídače je dílčí součet výkonů P_{MAX} všech instalovaných fotovoltaických panelů v daném sektoru FVE. Jeden střídač pracuje nad jedním sektorem FVE.

5 KONKRÉTNÍ APLIKACE FVE

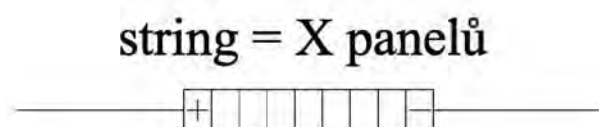
Tato práce řeší konkrétní případ několika FVE v okolí Prahy o instalovaném výkonu 9MWp. Z toho je 6MWp postavených na technologii tenkovrstvé CIGS a 3MWp na polykrystalické. Celý soubor je rozdělen na 165 samostatných bloků, tzv. „Super stringů“. Každý Super string je ukončen svým vlastním střídačem o instalovaném výkonu cca 60kWp.

Z důvodu velkého instalovaného výkonu na Super stringu, velkých vzdáleností mezi fotovoltaickými panely a střídačem (tedy dlouhé vedení) jsou, s ohledem na ekonomiku a bezpečnost provozu, stringy sloučeny do tzv. A stringů, popřípadě Super stringů. Stringování je určeno typem použité fotovoltaické technologie.

5.1 String

Jedná se o do série zapojených X [ks] fotovoltaických panelů. X se volí podle použité technologie.

$$U_{OC\ string} = U_{OC}X[V] \quad (5.1)$$



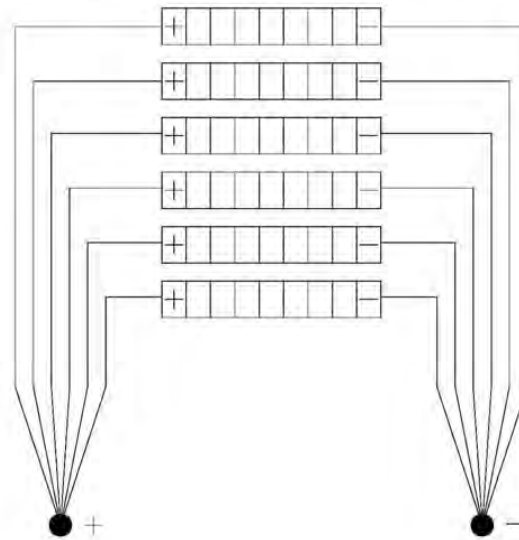
Obrázek 5.1 schéma zapojení stringu

5.2 A string

A String je využit u CIGS technologie. Paralelně spojuje 6 stringů do tzv. A stringu. A string je vstupem do Super stringu. Napětově je A string roven samotnému stringu i Super stringu.

$$I_{SC\ A\ string} = I_{SC}6 [A] \quad (5.2)$$

A string = 6x 9panelů



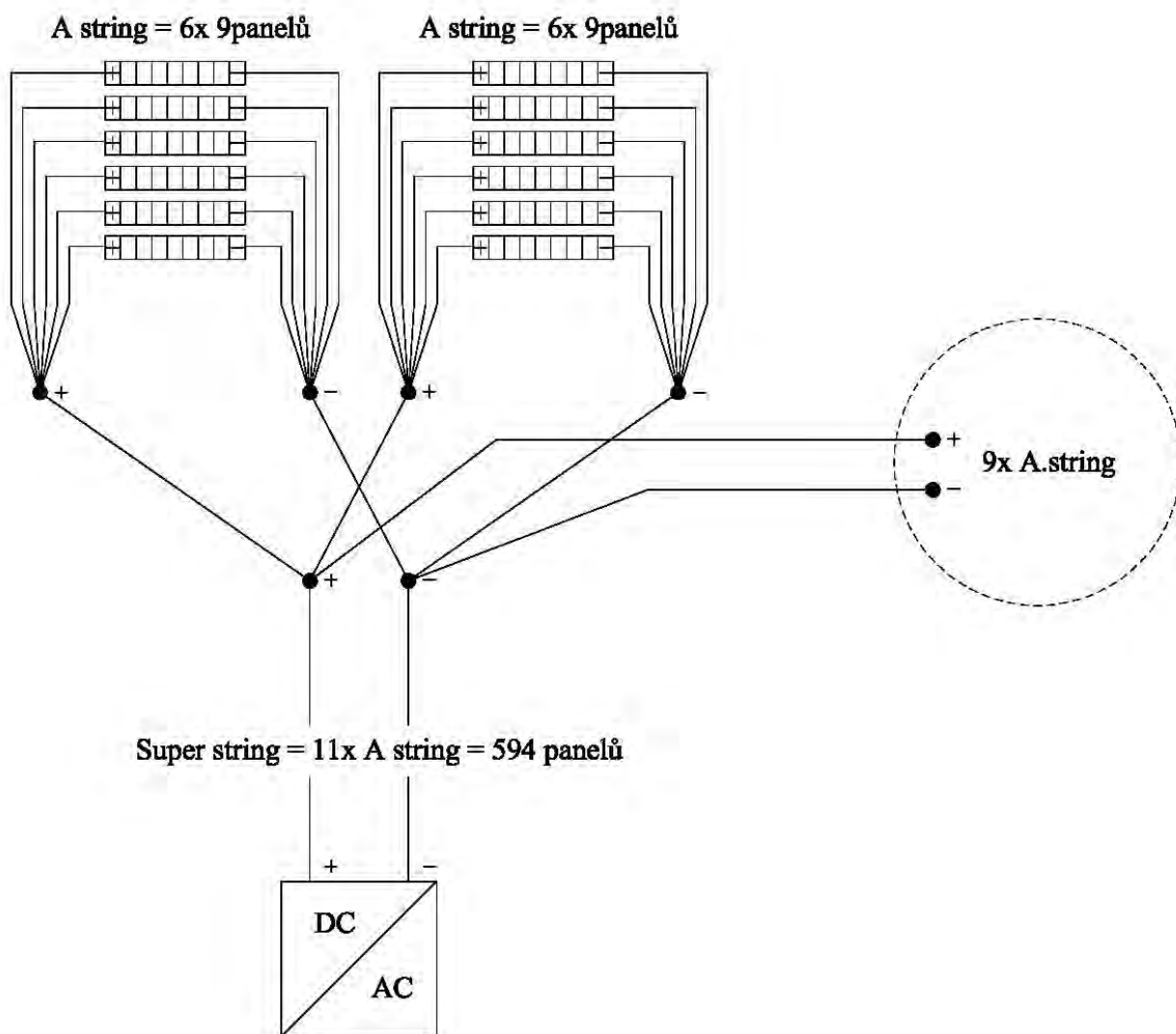
Obrázek 5.2 schéma zapojení A stringu

5.3 Super string

Super string paralelně spojuje:

- a) 12 stringů u technologie Polykrystalické
- b) 11 A stringů u technologie CIGS

Počty panelů ve stringů, počty paralelně spojených stringů a A stringů byly zvoleny s ohledem na proudové možnosti vedení a s ohledem na napěťové a proudové možnosti střídače.



Obrázek 5.3 schéma zapojení Super stringu – technologie CIGS

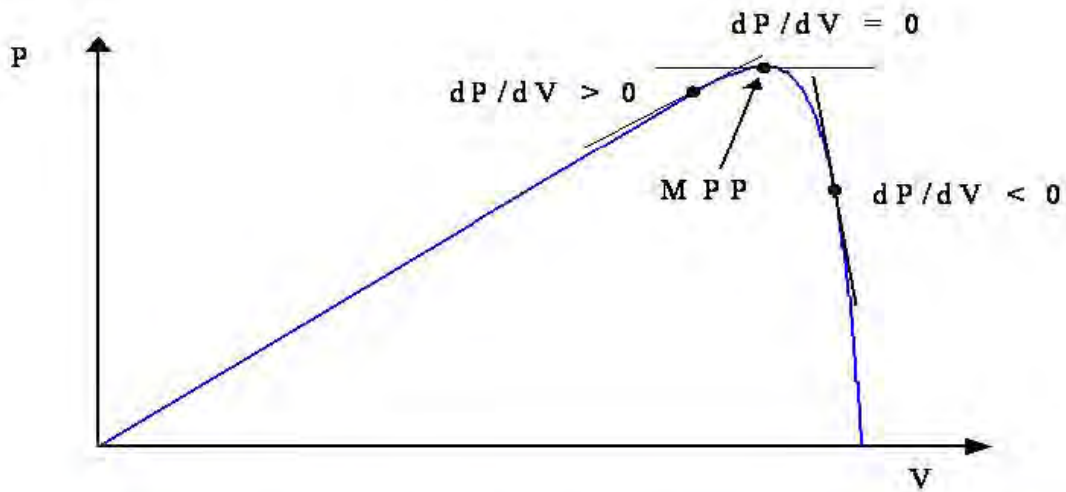
5.4 Střídač

Střídač je základním elektrickým zařízením každého fotovoltaického systému, který využívá střídavou elektrickou energii. Zajišťuje konverzi stejnosměrného proudu přiváděného na vstup na střídavý proud s požadovanými parametry a kvalitou. Tato práce se zabývá FVE postavenou na střídačích VACON řady NX.

5.4.1 Pracovní režim střídače

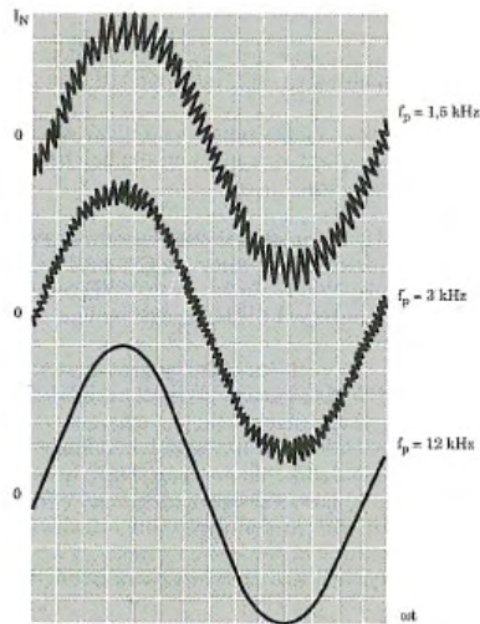
Pracovním režimem se rozumí probíhající přeměna stejnosměrné energie na střídavou. Bod maximálního výkonu je závislý na provozních podmínkách FV panelů (teplotě a intenzitě záření). Většina vyráběných střídačů obsahuje algoritmus sledování bodu

maximálního výkonu pro zajištění maximální výtěžnosti energie.

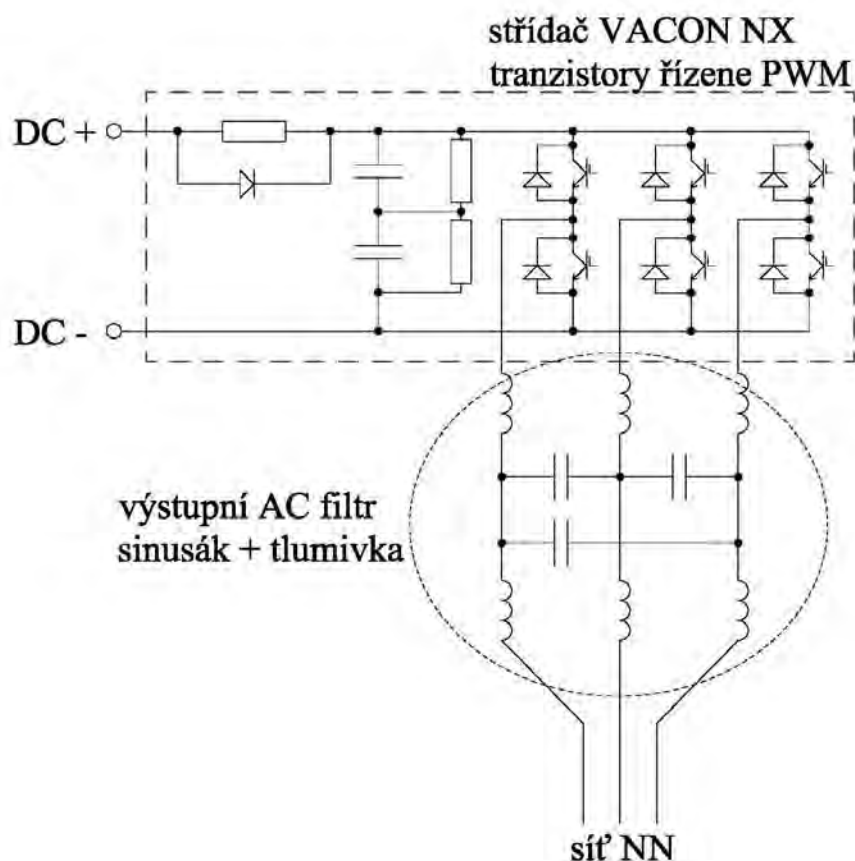


Obrázek 5.4 Určení bodu maximálního výkonu (MPP) pomocí derivace výkonu (převzato z [4])

Silová část střídače (měnič) je zařízení, které přizpůsobuje výstupní napětí požadavkům zátěže. Měnič musí generovat napětí o frekvenci 50Hz. Hlavními složkami jsou řízené polovodiče, spojené ve dvojicích do třech větví. Použité jsou tranzistory IGBT. Vyznačují se velmi rychlým přepínáním mezi vodivým a blokováným stavem. Tranzistory vedou nebo nevedou proud dle signálů, které dostávají od řídicích obvodů. Řízeny jsou pulzně šířkovou modulací PWM [9].



Obrázek 5.5 Vliv spínací frekvence na výstupní proud



Obrázek 5.6 schematické zapojení střídače VACON NX

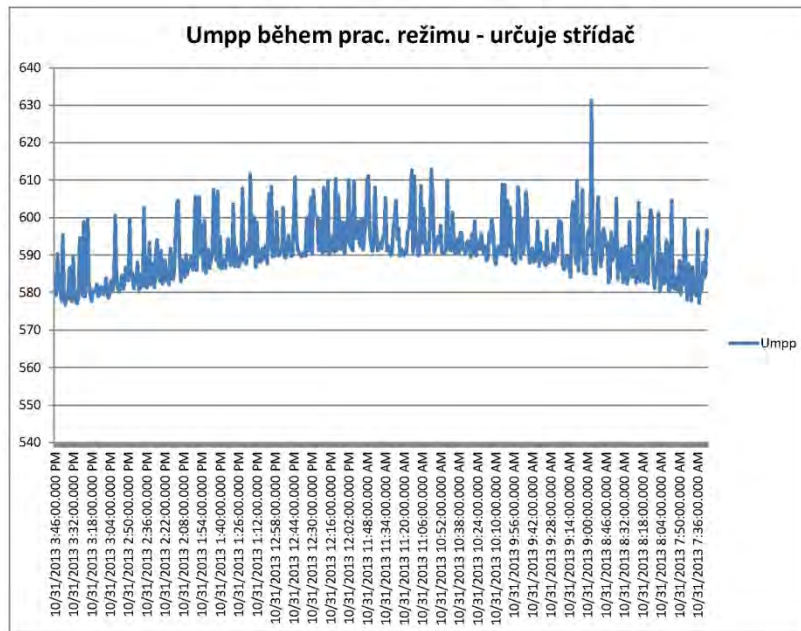
5.4.2 Povolené vstupní hodnoty střídače VACON NX (DC strana)

- **napětí naprázdno U_{OC} :**
 - $U_{OC} < 820V$
 - toto napětí se objevuje v období mimo pracovního režimu střídače
 - napětí stoupá společně s hodnotou ozáření $G [W/m^2]$
 - napětí stoupá společně s klesající teplotou

- **proud nakrátko I_{SC} :**
 - proud nakrátko nikdy nesmí střídačem téct
 - tento proud může systémem téct pouze v Super stringu při nouzového režimu, jako ochrana proti zemnímu zkratu
 - Pokud střídačem zkratový proud teče, znamená to havarijní stav střídače

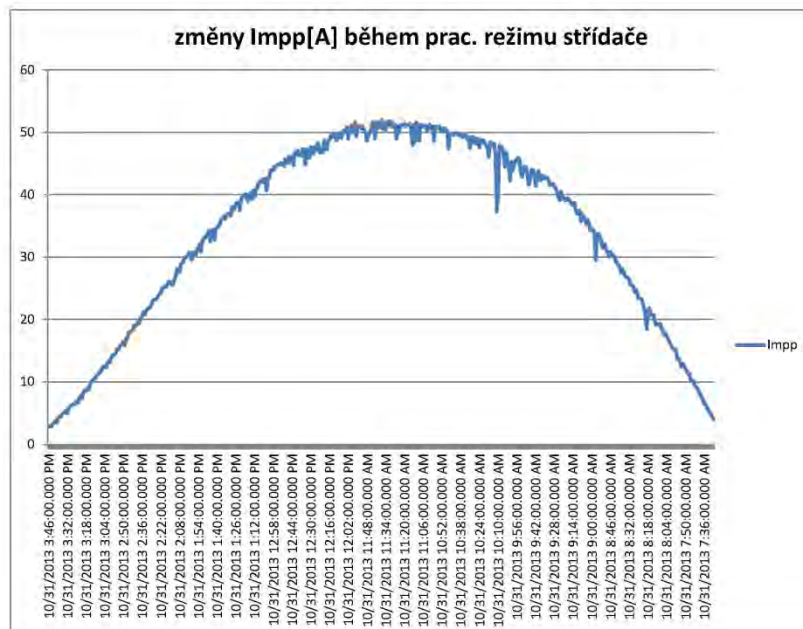
- **napětí pracovní U_{MPP} :**
 - toto napětí se objeví v období pracovního režimu střídače
 - hodnotu si určuje sám střídač na základě svého softwaru

- obvykle se pohybuje v rozmezí 570V – 610V



Obrázek 5.7 hodnoty (výkyvy) U_{MPP} během pracovního režimu střídače VACON

- proud pracovní I_{MPP} :
 - Velikost tekoucího proudu je závislá především na hodnotě aktuálního slunečního osvitu
 - $I_{MPP} < 100A$

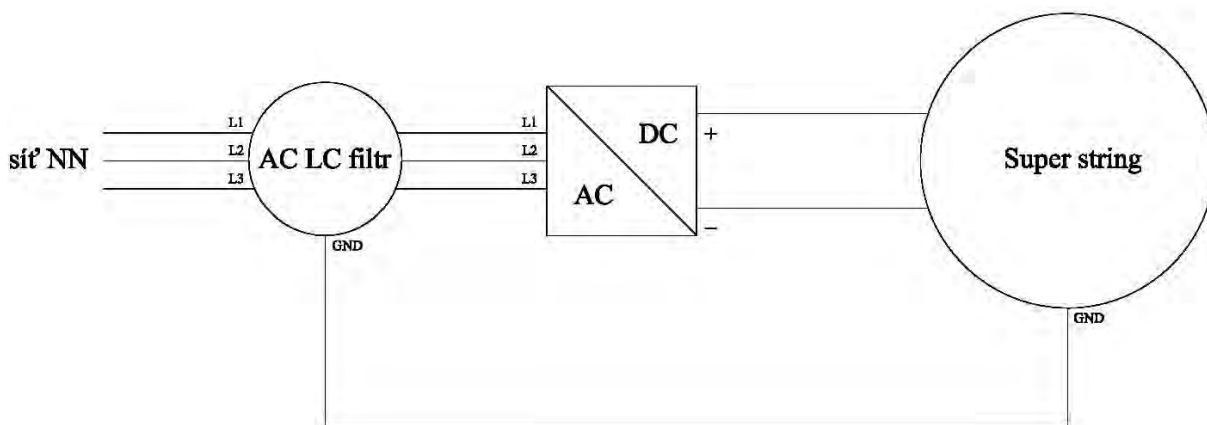


Obrázek 5.8 hodnoty I_{MPP} během pracovního režimu střídače VACON

6 DEFINOVÁNÍ ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Většina komerčně vyráběných střídačů určených pro fotovoltaické elektrárny obsahuje na DC vstupu střídače elektrický filtr typu dolní propust filtrující frekvenční složky vzniklé rychlým spínáním tranzistorů.

V našem případě použitého střídače VACON NX není fotovoltaický systém filtrem chráněn. Z tohoto důvodu frekvenční složky tečou elektrárnou ze střídače do DC vedení, dále se fotovoltaickými články kapacitou modulu vůči zemi přenesou do zemního pospojení systému a smyčka uzavírají přes výstupní AC filtr opět ve střídači.



Obrázek 6.1 Blokové zapojení FVE



Obrázek 6.2 konstrukce FV panelů kapacitní spojení vůči zemi

Konstrukce je nosnou částí FV článků a je země pospojovaná s celým systémem elektrárny.

Vytvořené frekvenční složky způsobují chvění, které je především ve slyšitelné oblasti a projevuje se hvízdáním konstrukce a panelů. Dnes víme, že střídače VACON nebyly do výroby vhodně zvoleny, ale byly jedinou, na trhu časově rychle dostupnou, možnou variantou.

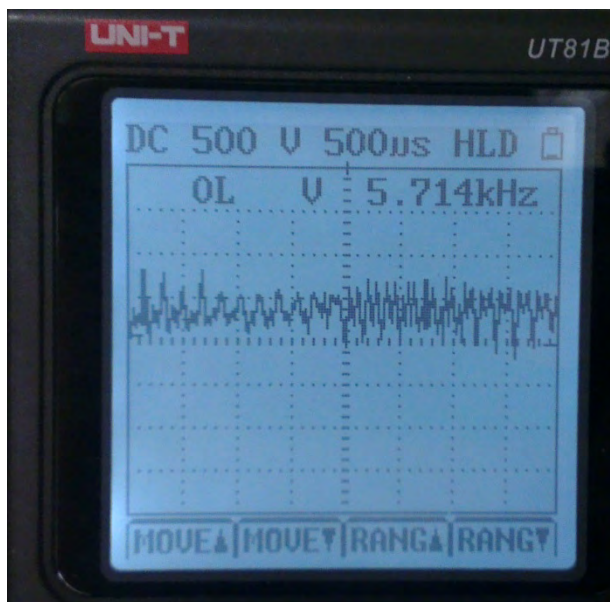
Dá se předpokládat, že chvění urychluje proces degradace (stárnutí) fotovoltaických modulů a má vliv na snížení výtěžnosti elektrárny.

Chvění se projevuje lidskému uchu „pískotem“. Hladina hlasitosti pískotu je závislá na aktuální výrobě (tedy ozáření, teplotě, napětím, proudům) Nižší výroba (malý příkon do střídače) znamená tiché „pištění“. Naopak výroba na hranici možnosti FV systému (velký příkon střídače) je pro lidské ucho nepříjemná.

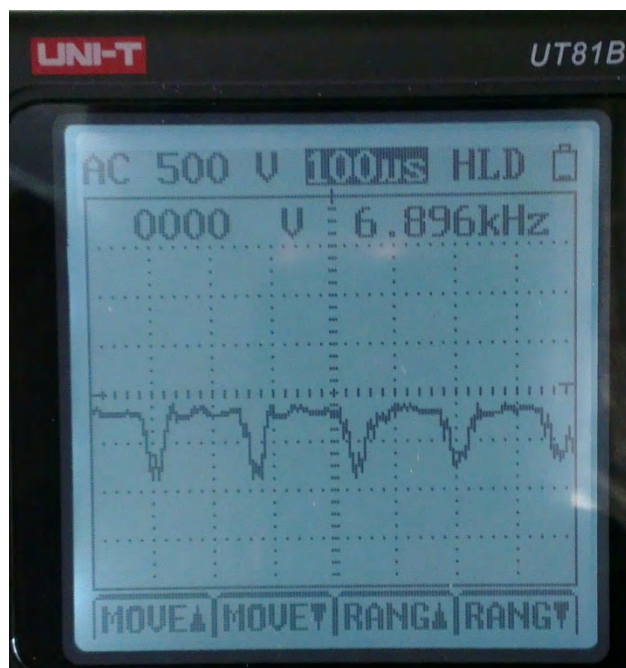
Akustická hladina chvění je velmi výrazná u technologie CIGS, u které již při malých výkonech je velmi dobře slyšitelná. Naopak u technologie Polykrystalické je práh slyšitelnosti posunut od vyšších výkonů FVE.

6.1 Naměřené hodnoty rušení

Napětovým měřením bylo zjištěno rušení mezi pracovním DC vodičem (+/-) a zemním pospojením. Složky jsou o frekvenci 5,714kHz a dalších harmonických. 1. harmonická je spínací frekvence tranzistorů střídače, která je dána programem daného střídače. V naší aplikaci se vyskytují dva programy o $f = 5,714\text{kHz}$ a $f = 6,896\text{kHz}$. V ideálním případě by mělo být naměřeno pouze $1/2 U_{\text{MPP SUPER STRINGU}}$.



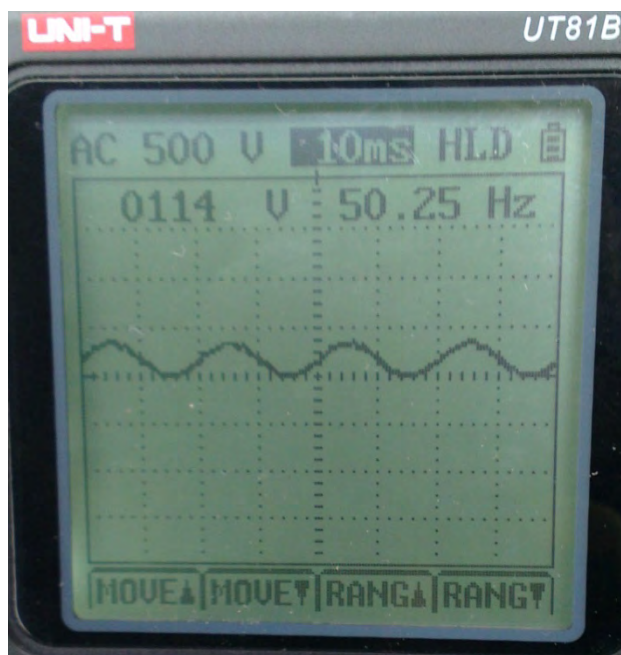
Obrázek 6.3 screen scopemeteru – měřeno na technologii CIGS, program 5,7kHz



Obrázek 6.4 screen scopemeteru – měřeno na technologii Polykrystalické, program 6,9kHz

6.2 Komerční střídače vybavené filtrem

Napětové měření mezi pracovními DC vodiči (+/-) a zemním pospojením, prováděné na konkurenčním střídači SMA připojeného do AC jednofázové sítě 50Hz vykazuje výrazně lepší hodnoty. Kmitočet mezní i potlačení bude nad hodnotou 50Hz.

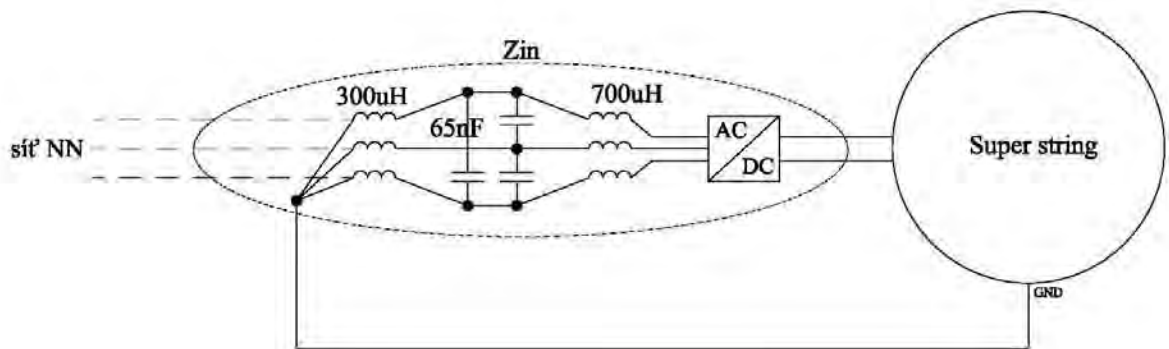


Obrázek 6.5 screen scopemeteru – střídač SMA

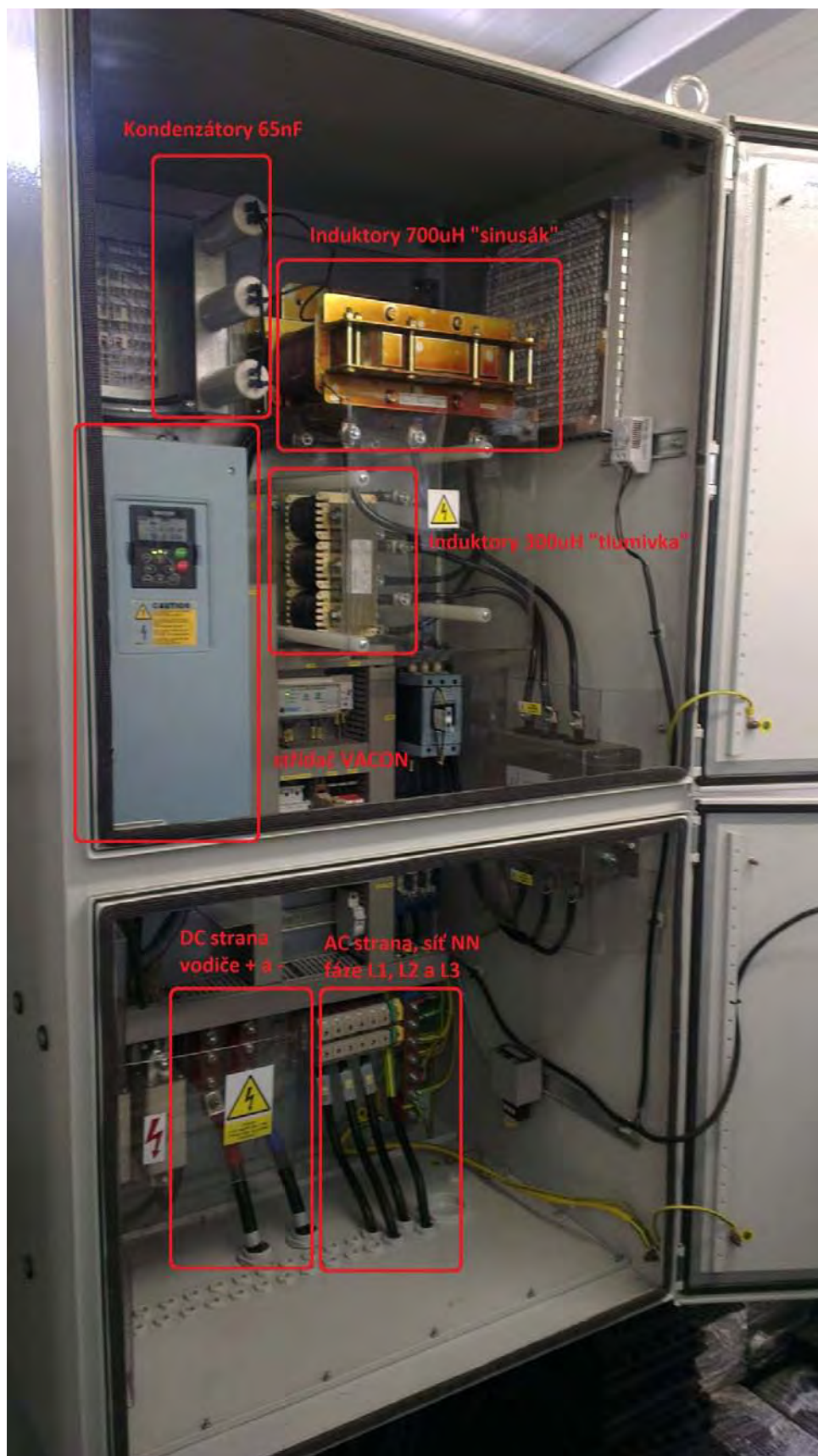
Dá se očekávat, že pokud bude mít náš filtr kmitočet mezní i potlačení nad hodnotou 150Hz, potom bude výsledný časový průběh napětí sinusově-schodovitého tvaru o frekvenci 150Hz.

7 URČENÍ IMPEDANCE ZÁTĚŽE Z_{IN}

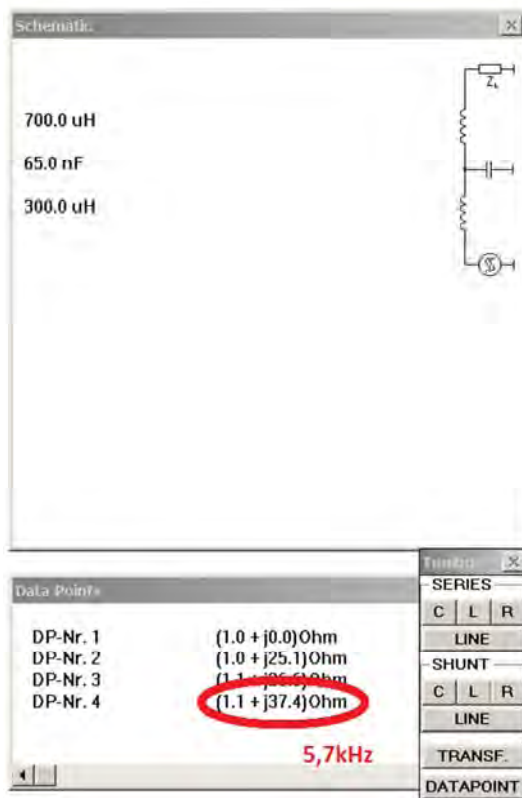
Impedance vstupu elektrického filtru byla určena za pomoci Smithova diagramu – vynesení hodnot induktorů („sinusák“ a „tlumivka“) a kondenzátoru. První induktor (bráno od střídače), tzv. „sinusák“, o indukčnosti 700uH společně s paralelně zapojenou kapacitou 65nF přeměňuje vstupní obdélníkový signál na sinusový průběh 50Hz. Druhý induktor, tzv. tlumivka, o indukčnosti 300uH ochraňuje systém před zkratovými proudy.



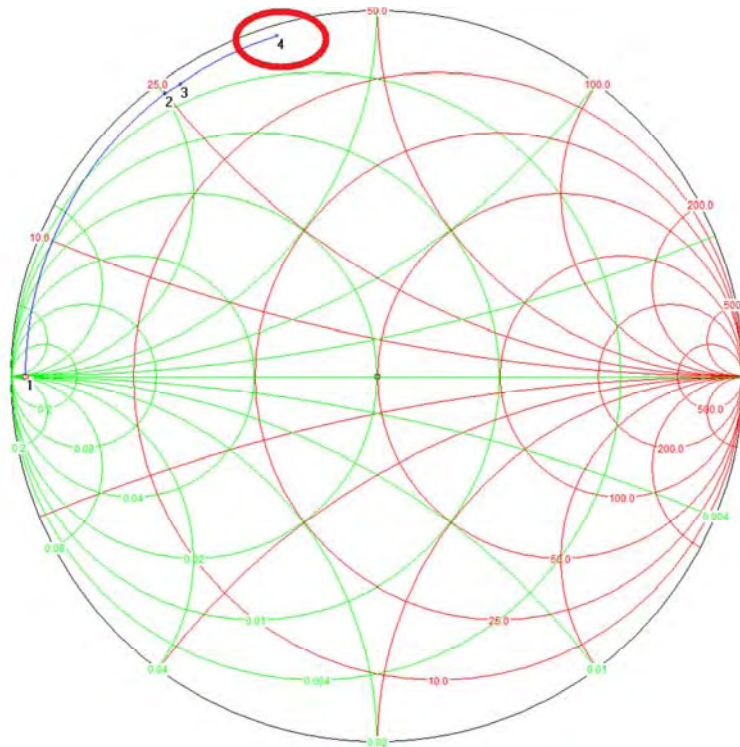
Obrázek 7.1 Schéma zapojení výstupního AC LC filtru



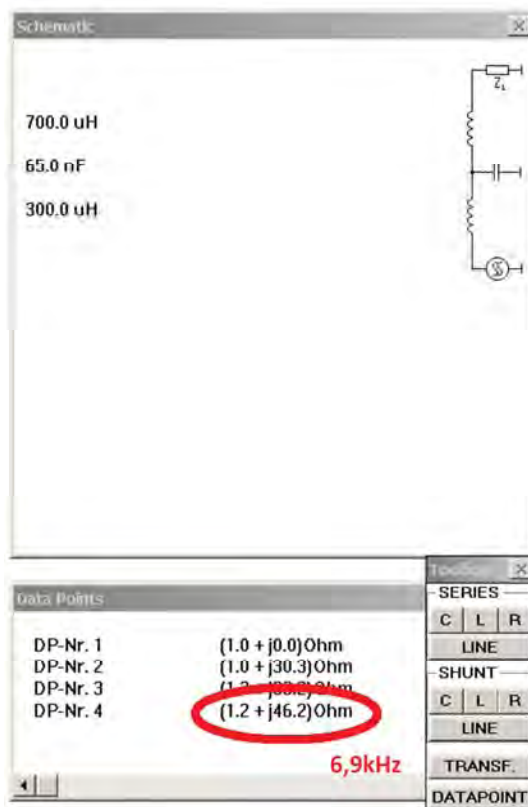
Obrázek 7.2 Skutečné osazení jednotlivých součástí



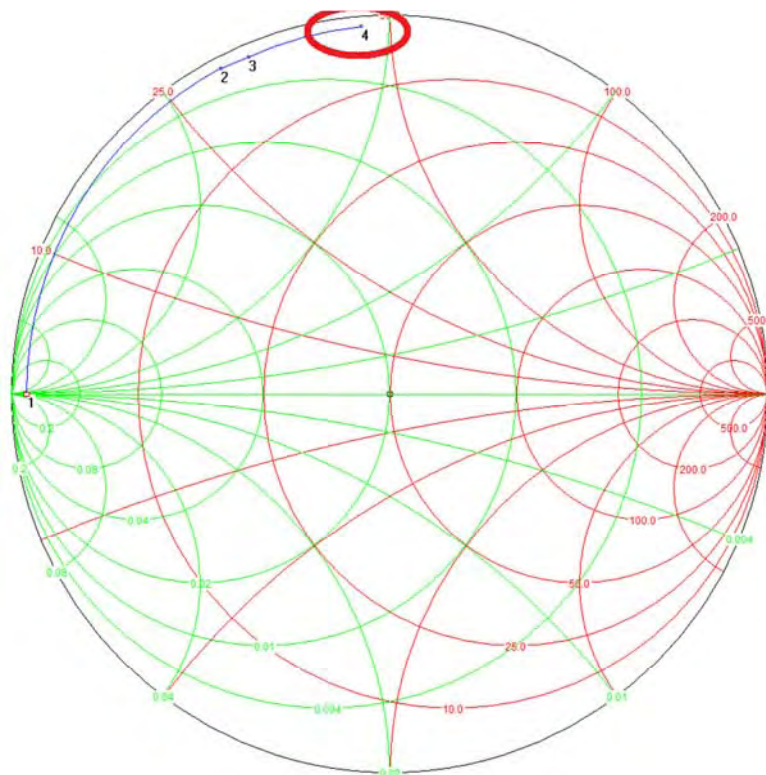
Obrázek 7.3 Výsledná Z vstupní při frekvenci 5,7kHz



Obrázek 7.4 Zobrazení Z vstupní při frekvenci 5,7kHz ve Smithově diagramu



Obrázek 7.5 Výsledná Z vstupní při frekvenci 6,9kHz

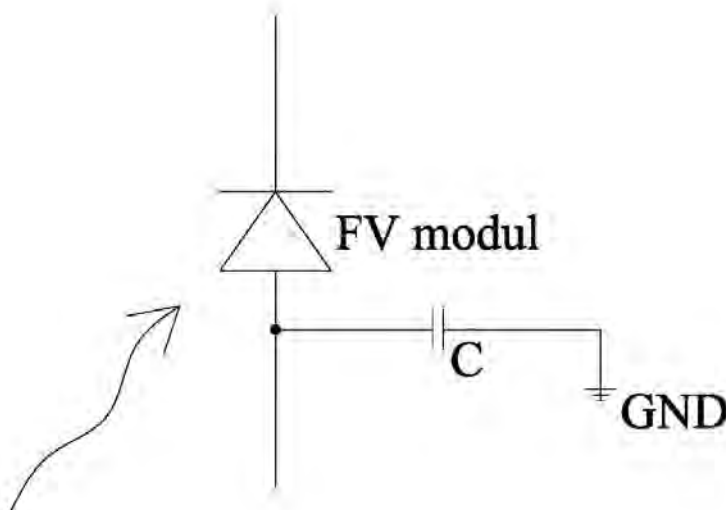


Obrázek 7.6 Zobrazení Z vstupní při frekvenci 6,9 kHz ve Smithově diagramu

Uvažovaná vstupní impedance elektrického filtru pro frekvenci 5,7kHz je 37Ω , pro 6,9kHz je 46Ω .

8 URČENÍ IMPEDANCE ZÁTĚŽE Z_{OUT}

Impedance zátěže elektrického filtru byla určena dle kapacitních vlastností FV modulů vůči zemi. Jsou uvažovány varianty za suchých a mokrých klimatických podmínek. Kapacita modulu vůči uzemněné podpůrné konstrukci byla určována dvěma způsoby.



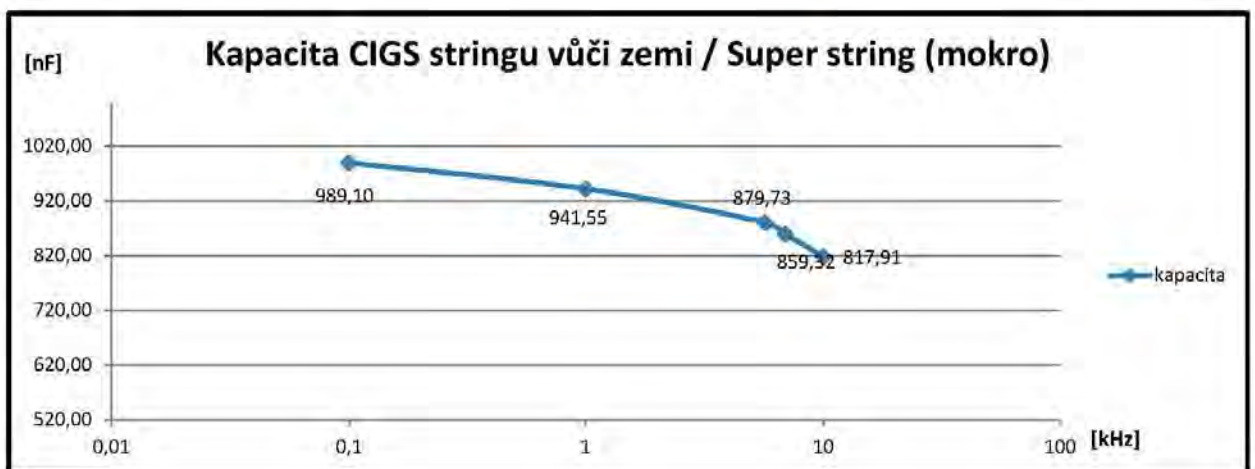
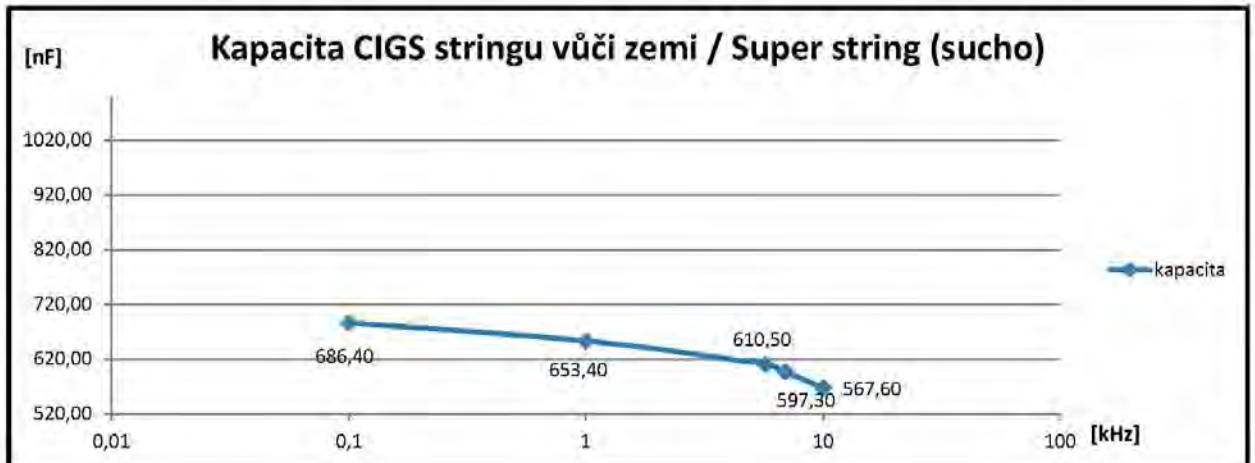
Obrázek 8.1 Kapacita modulu vůči uzemněné podpůrné konstrukci

8.1 Metoda 1 – měření stringu

Měřený string obsahuje 9 modulů Qcell 95 W. Pomocí měřiče kapacity byly mezi vývodem FV panelů zapojených do řetězce a zemí (podpěrnou konstrukcí) naměřeny hodnoty.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty kapacity CIGS stringu

CIGS string (9x95W)	sucho	sucho	sucho	mokro	mokro	mokro
f [kHz]	C [nF]	C [nF] / 1kWp	C [nF] / Super string	C [nF]	C [nF] / 1kWp	C [nF] / Super string
0,1	10,40	12,16	686,40	14,99	17,53	989,10
1	9,90	11,58	653,40	14,27	16,69	941,55
5,7	9,25	10,82	610,50	13,33	15,59	879,73
6,9	9,05	10,58	597,30	13,02	15,23	859,32
10	8,60	10,06	567,60	12,39	14,49	817,91



Obrázek 8.2 Vynesené hodnoty kapacity CIGS stringu do grafů

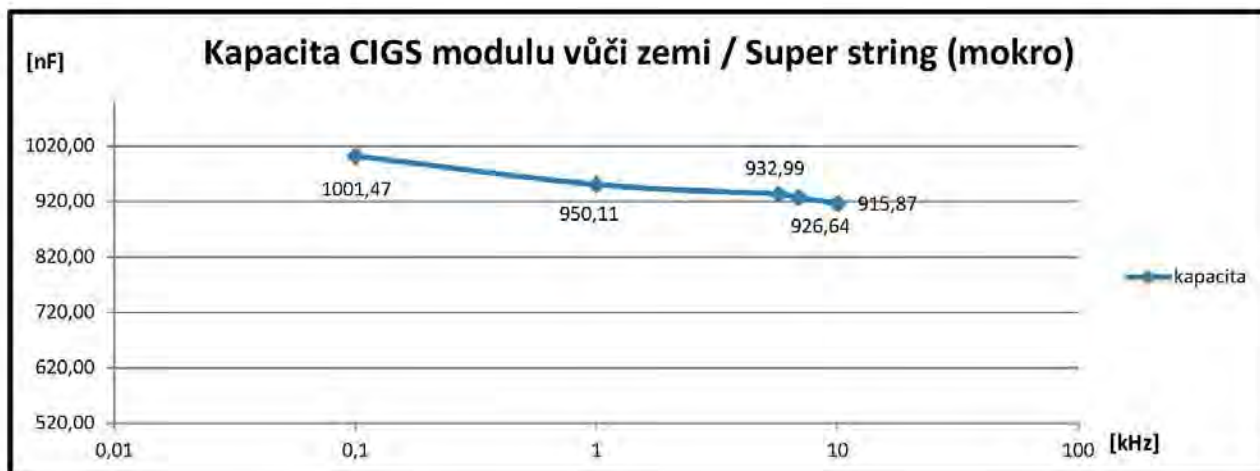
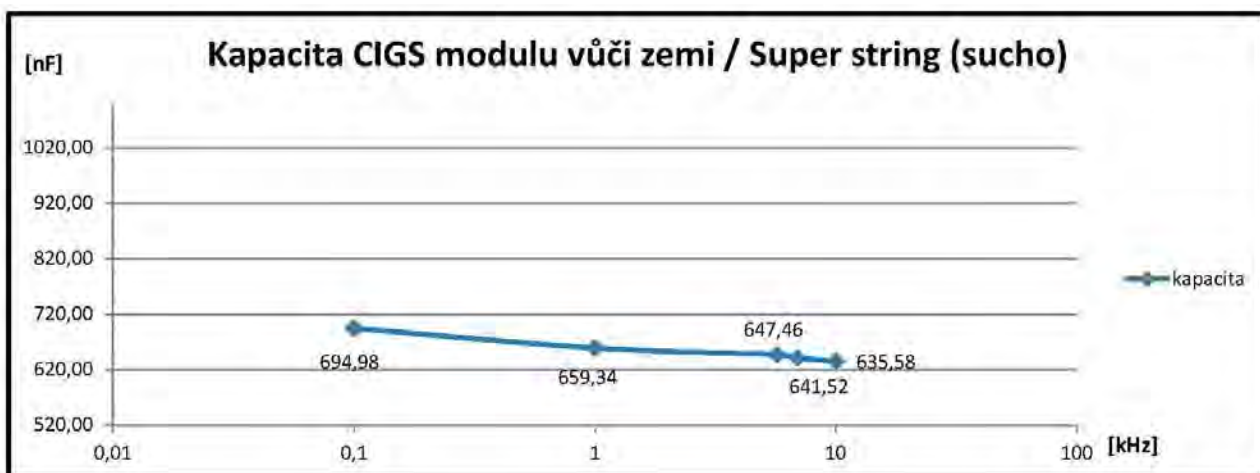
Pro porovnání bylo provedeno měření stringu Polykrystalických panelů. Byla naměřena kapacita 12nF (při 1kHz) na stringu 21 panelů. V přepočtu kapacity na Super string je počítáno s panely 245Wp. Super string je složen z 11 stringů o 21 panelech = 56,595kWp. Výsledná kapacita (při 1 kHz) je tedy 132nF. Měření bylo provedeno za sucha.

8.2 Metoda 2 – měření modulu

Měření byl jeden fotovoltaický modul. Opět byla měřena kapacita mezi vývody modulu a podpěrnou konstrukcí.

Tabulka 2 Naměřené hodnoty kapacity CIGS modulu

CIGS modul (1x95W)	sucho	sucho	sucho	mokro	mokro	mokro
f [kHz]	C [nF]	C [nF] / 1kWp	C [nF] / Super string	C [nF]	C [nF] / 1kWp	C [nF] / Super string
0,1	1,17	12,32	694,98	1,69	17,75	1001,47
1	1,11	11,68	659,34	1,60	16,84	950,11
5,7	1,09	11,47	647,46	1,57	16,53	932,99
6,9	1,08	11,37	641,52	1,56	16,42	926,64
10	1,07	11,26	635,58	1,54	16,23	915,87



Obrázek 8.3 Vynesené hodnoty kapacity CIGS modulu do grafů

8.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot jsou patrné malé rozdíly kapacity v jednotlivých metodách měření. Elektrický filtr bude pracovat nad Super stringem, kterému je parametrově blíže string než samostatný fotovoltaický modul. Pro výpočet zatěžovací impedance filtru je uvažována hodnota 610,5nF za sucho a 879,73nF za mokra u CIGS technologie

a 132nF za sucha a 190,21nF za mokra u technologie Polykrystalické.

$$Z_{OUT} = \frac{1}{j\omega C} \quad (8.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (8.2)$$

Tabulka 3 Výpočet zatěžovací impedance

	f [Hz]	ω [rad/s]	C [nF] sucho	C [nF] mokro	Zout [Ω] sucho	Zout [Ω] mokro
CIGS	5714	35902,12	610,5	879,73	46	32
CIGS	6896	43328,85	597,3	859,32	39	27
Polykrystal	1000	6283,185	132	190,21	1206	837

Uvažovaná zatěžovací impedance elektrického filtru technologie CIGS pro frekvenci 5,7kHz je 46 Ω za sucha a 32 Ω za mokra. Pro frekvenci 6,9kHz je 39 Ω za sucha a 27 Ω za mokra. U Polykrystalické technologie je impedance mnohonásobně vyšší. Tato skutečnost odpovídá realitě – tedy chvění se projevuje výrazně méně (slyšitelnost minimální).

Pro návrh filtru je uvažováno s konstantní impedancí zátěže 46 Ω pro frekvenci 5,7kHz a 39 Ω pro frekvenci 6,9kHz. Z bezpečnostních a ekonomických důvodů by bylo nesprávné tvořit filtr, který se bude přizpůsobovat klimatickým (sucho / mokro) podmínkám. Argumentem proti, s ohledem na bezpečnost, jsou proudy přibližující se hodnotě 100A DC. Při rozepínání, popřípadě připínání součástky při tekoucím stejnosměrném proudu by muselo být vyřešeno efektu elektrického oblouku. Vyřešení bezpečnostního rizika by ovšem výrazně zvýšilo ekonomickou náročnost, která by byla finančně nenávratná. Dalším argumentem proti je skutečnost, že „mokrý“ klimatické podmínky (mlhy, déšť) nesou zataženou oblohu, kdy se hodnota ozářenosti blíží k nule. Elektrárna tím pádem pracuje na minimální výkon. Následné zvýšení osvitů a výkonu elektrárny sebou přináší neprodlené vysoušení panelů a konstrukcí a velmi rychle se systém dostává k hodnotám impedance za „sucha“.

9 SHRNU TÍ – VSTUPNÍ HODNOTY IMPEDANCE PRO VÝPOČET FILTRU

Pro výpočet filtrů typu dolní propust budou použity následující parametry v tabulce.

Tabulka 4 Vstupní hodnoty pro výpočet filtru – impedance

f [Hz]	Z _{in} [Ω]	Z _{out} [Ω]
5714	37	46
6896	46	39

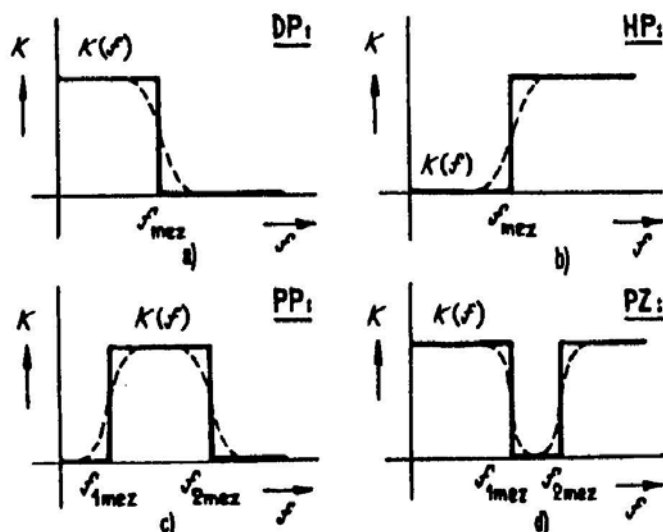
Mezní frekvence bude zvolena s ohledem na materiálovou náročnost (objem, chlazení) filtru na hodnotu 200Mhz. Frekvence potlačení bude na hodnotě 5kHz.

10 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH FILTRŮ

Kmitočtové filtry jsou dvojbrany (převážně lineární), které propustí (bez anebo jen s malým útlumem) harmonické složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány - tzv. nepropustné pásmo.

Rozdělení filtrů lze provést z různých hledisek, nejdůležitější dělení je však dle přenášeného kmitočtového spektra [10]:

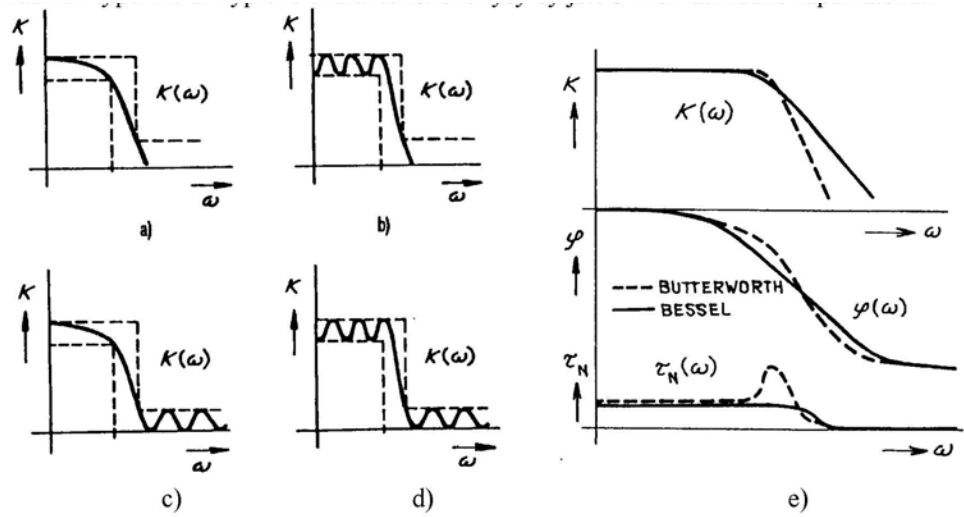
- Dolní propust DP
- Horní propust HP
- Pásmová propust PP
- Pásmová zadrž PZ
- Nepropustný (fázovací) dvojbran



Obrázek 10.1 Modulové charakteristiky filtrů (převzato z [10])

Dělení filtrů podle použité aproximace:

- Butterworthova
- Čebyševova
- Inverzní Čebyševova
- Cauerova
- Besselova



Obrázek 10.2 Kmitočtové charakteristiky základních typů filtrů dle aproximace (převzato z [10])

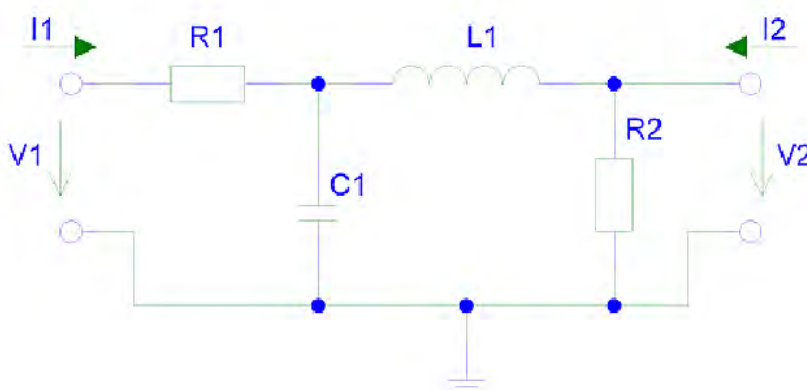
11 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO FILTRU

Vzhledem ke skutečnosti, že filtr není oboustranně zakončen stejnými zátěžemi, nelze ho navrhovat podle tabulek. Tato práce se věnuje návrhu filtru 1. řádu, který by měl dostatečně potlačit nežádoucí složky.

Přenosová funkce obecného bikvadu DP

$$K(s) = K0 \frac{\omega^2}{s^2 + \frac{\omega}{Q}s + \omega^2} \quad (11.1)$$

11.1 Π článek

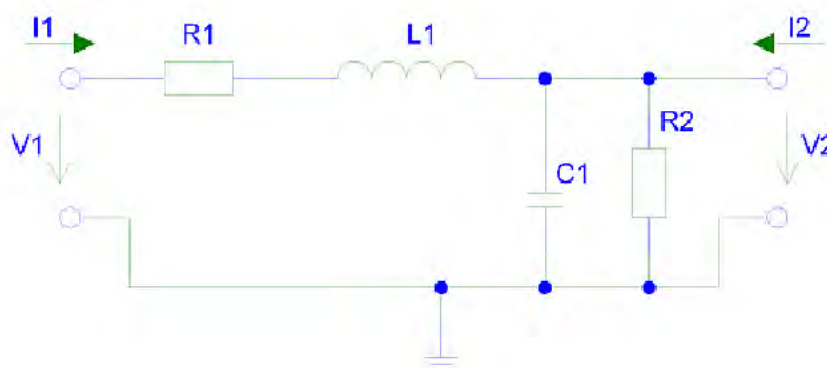


Obrázek 11.1 Π článek

Přenosová funkce Π článku

$$K(s) = \frac{R2}{LCR1s^2 + s(R1R2C + L) + R1 + R2} \quad (11.2)$$

11.2 T článek



Obrázek 11.2 T článek

Přenosová funkce Π článku:

$$K(s) = \frac{R2}{LCR2s^2 + s(R1R2C + L) + R1 + R2} \quad (11.3)$$

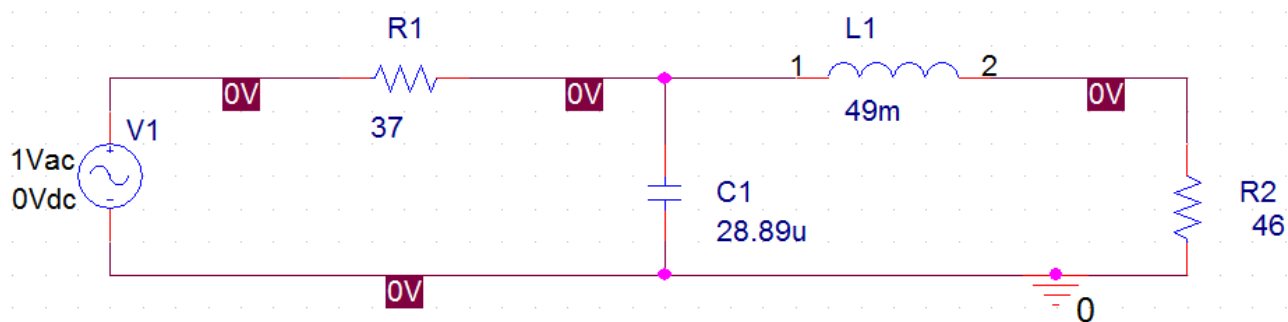
11.3 Výsledné vypočtené hodnoty

Tabulka 5 Výsledných vypočtených hodnot součástek LC

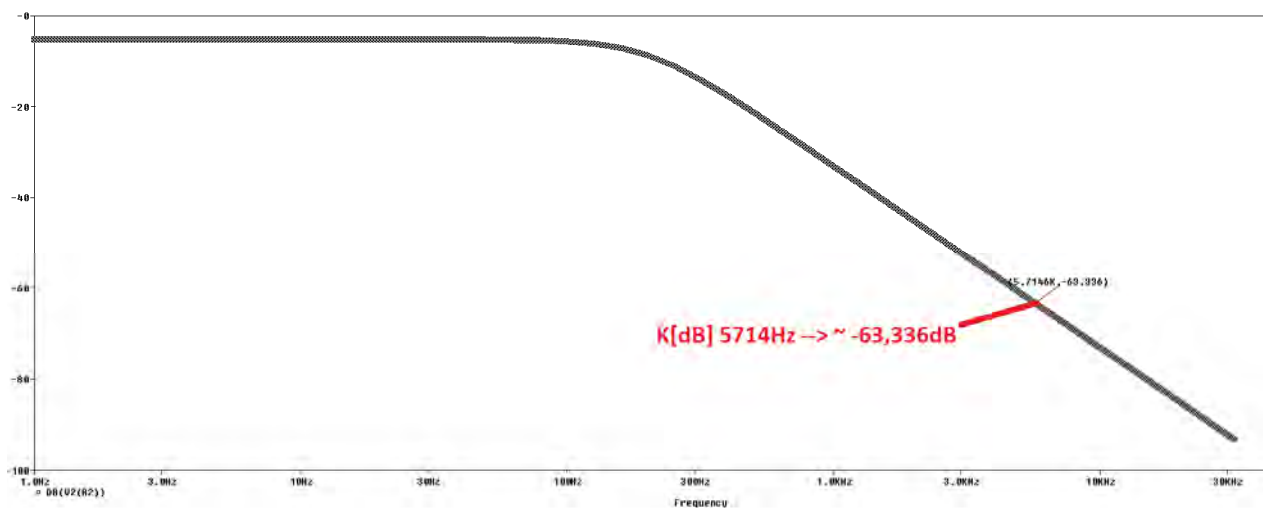
	fmezní [Hz]	Q [-]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	L [mH]	C [uF]	K [dB] @ 200Hz	K [dB] @ 2500Hz	K [dB] @ 5000Hz	K [dB] @ 5714Hz	K [dB] @ 6896Hz
Π článek	200	0,7071	37	46	49	28,89	-8,6	-49,0	-61,0	-63,4	
Π článek	200	0,7071	46	39	34	34,31	-9,8	-50,6	-62,7		-68,3
T článek	200	0,7071	37	46	31	36,48	-8,2	-47,1	-59,2	-61,5	
T článek	200	0,7071	46	39	50	27,74	-10,2	-52,0	-64,1		-69,7

12 VÝSLEDNÉ FILTRY PRO REALIZACI

12.1 Π ČLÁNEK $Z_{IN} = 37\Omega$ a $Z_{OUT} = 46\Omega$, pro spínací frekvenci 5714Hz

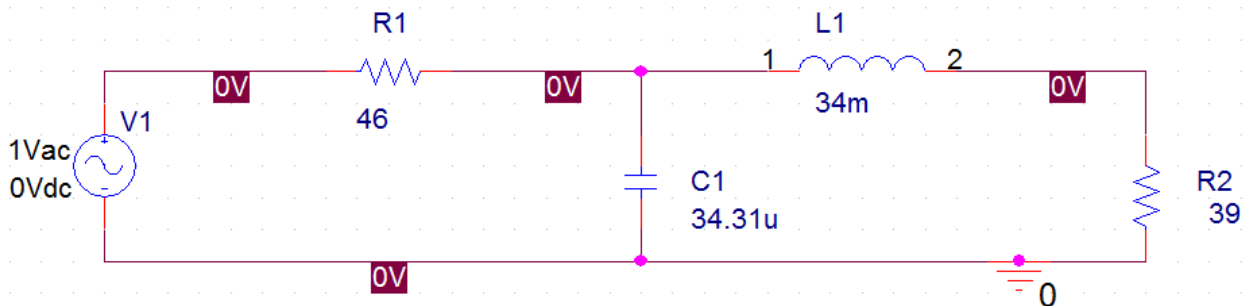


Obrázek 12.1 Schéma zapojení Π článku v programu PSPICE

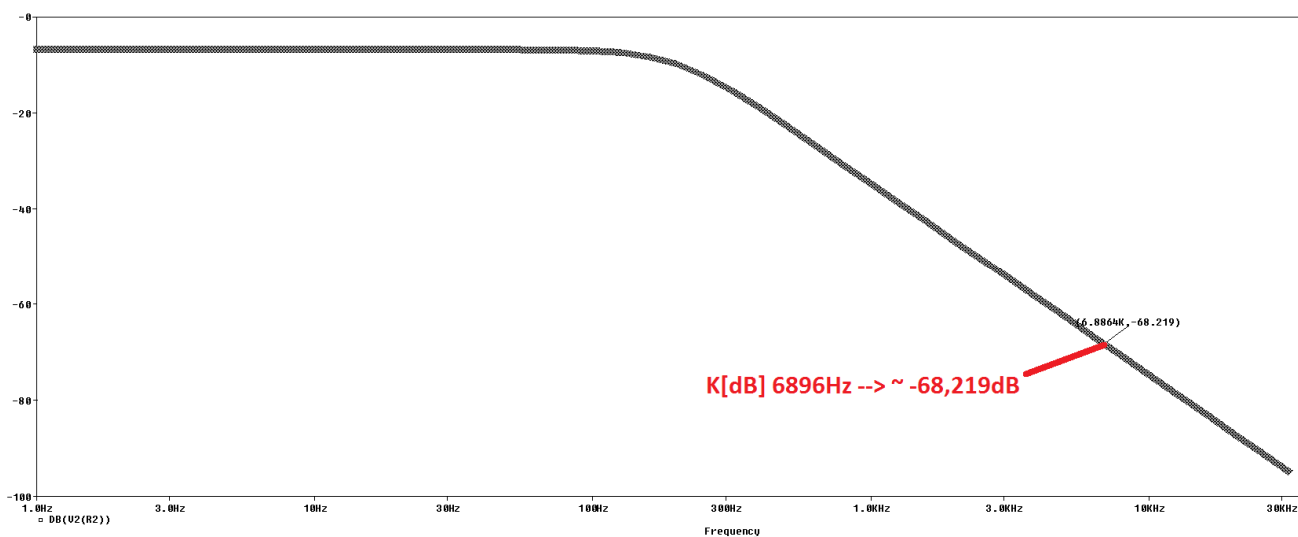


Obrázek 12.2 Modulová charakteristika Π článku v programu PSPICE

12.2 Π ČLÁNEK $Z_{IN} = 46\Omega$ a $Z_{OUT} = 39\Omega$, pro spínací frekvenci 6896Hz

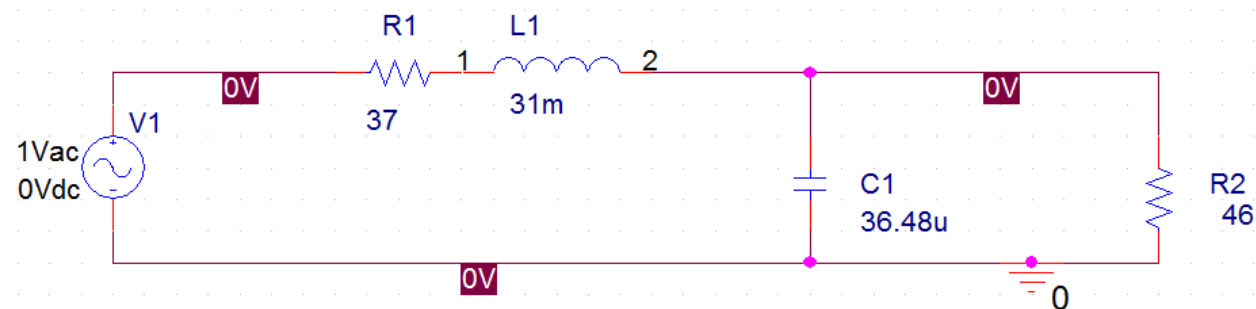


Obrázek 12.3 Schéma zapojení Π článku v programu PSPICE

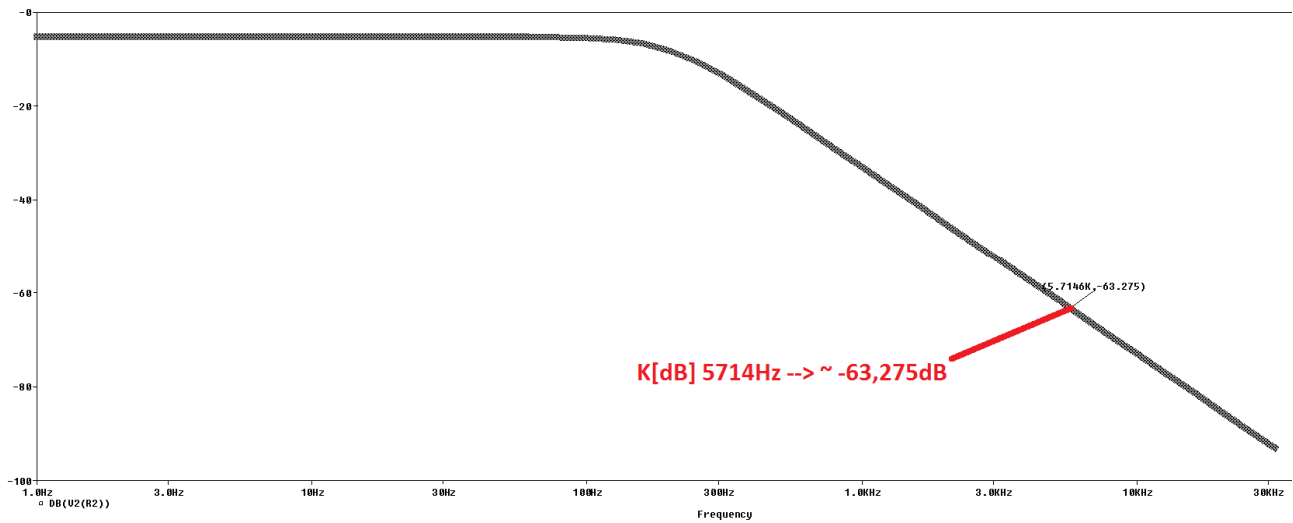


Obrázek 12.4 Modulová charakteristika Π článku v programu PSPICE

12.3 T ČLÁNEK $Z_{IN} = 37\Omega$ a $Z_{OUT} = 46\Omega$, pro spínací frekvenci 5714Hz

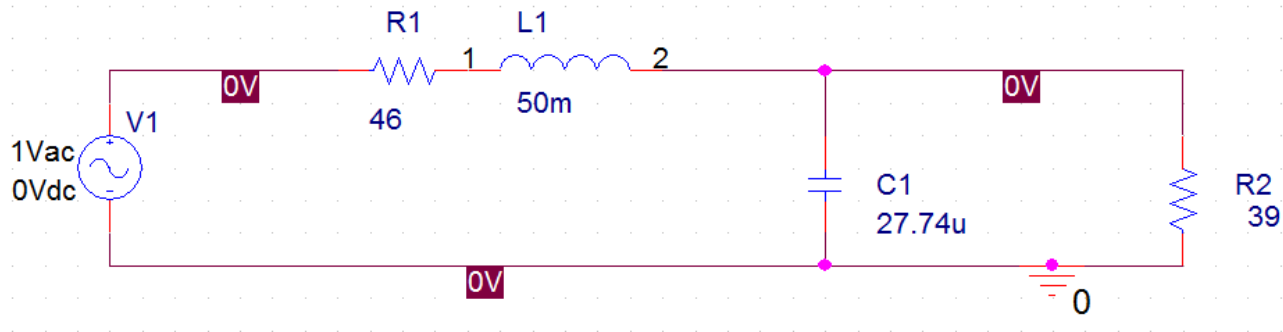


Obrázek 12.5 Schéma zapojení T článku v programu PSPICE

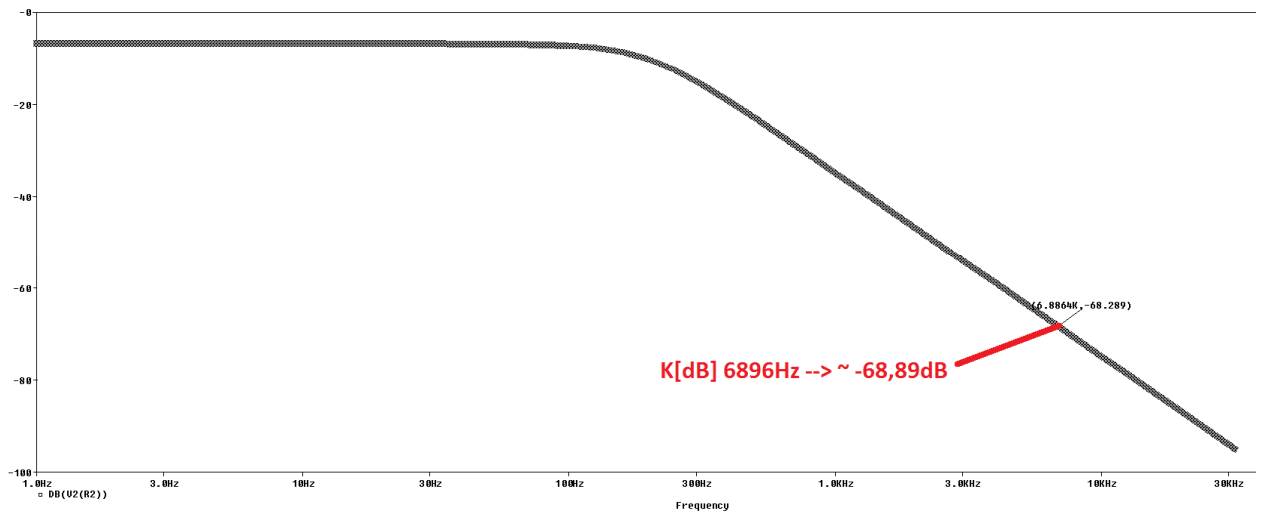


Obrázek 12.6 Modulová charakteristika T článku v programu PSPICE

12.4 T ČLÁNEK $Z_{IN} = 46\Omega$ a $Z_{OUT} = 39\Omega$, pro spínací frekvenci 6896Hz



Obrázek 12.7 Schéma zapojení T článku v programu PSPICE



Obrázek 12.8 Modulová charakteristika T článku v programu PSPICE

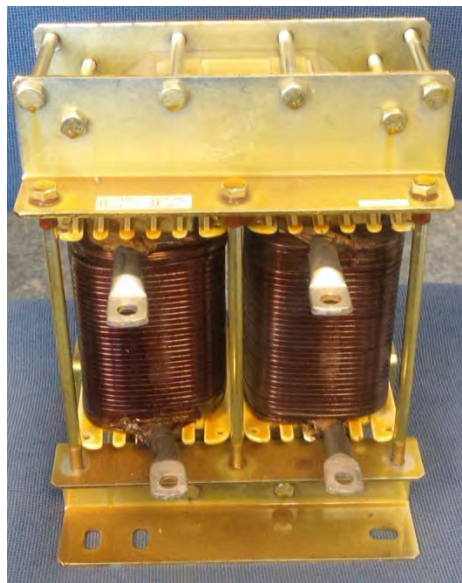
13 SESTROJENÍ FILTRU

Výběr kondenzátorů byl díky levné pořizovací ceně a běžnosti součástek jednoduchý. Použity byly dva duhy. První SRpassives CBB60 30 μ F a druhý MIFLEX MKSP 35 μ F.



Obrázek 13.1 Použité kondenzátory

Výběr indukčnosti byl výrazně složitější především pro vysokou pořizovací cenu a absenci skladových zásob. Pro testovací výrobek byla zvolena tlumivka SKYBERGTECH o $U_n=1200V$, $I_n=100A$ a $L=27mH$. Směr protékajících proudů je v každé indukčnosti opačný, tedy výsledné elektromagnetické pole nulové.



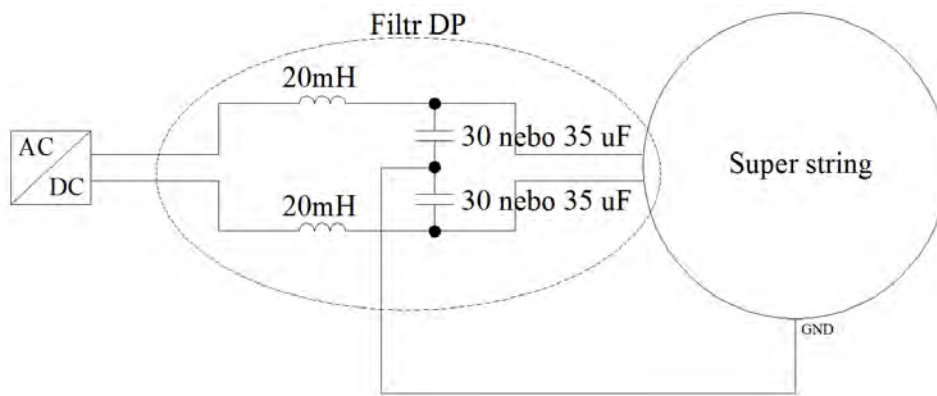
Obrázek 13.2 Použitá indukčnost

13.1 Nevhodný M-článek

M-článek není možné použít. Při použití M-článu je první v cestě hradící kapacita u které se uplatní její reaktance a ta představuje pro vstupní obvody měniče střídavý zkrat. Lze využít pouze minimální kapacity - jednotky nF.

13.2 Schéma zapojení filtru a montáž filtru

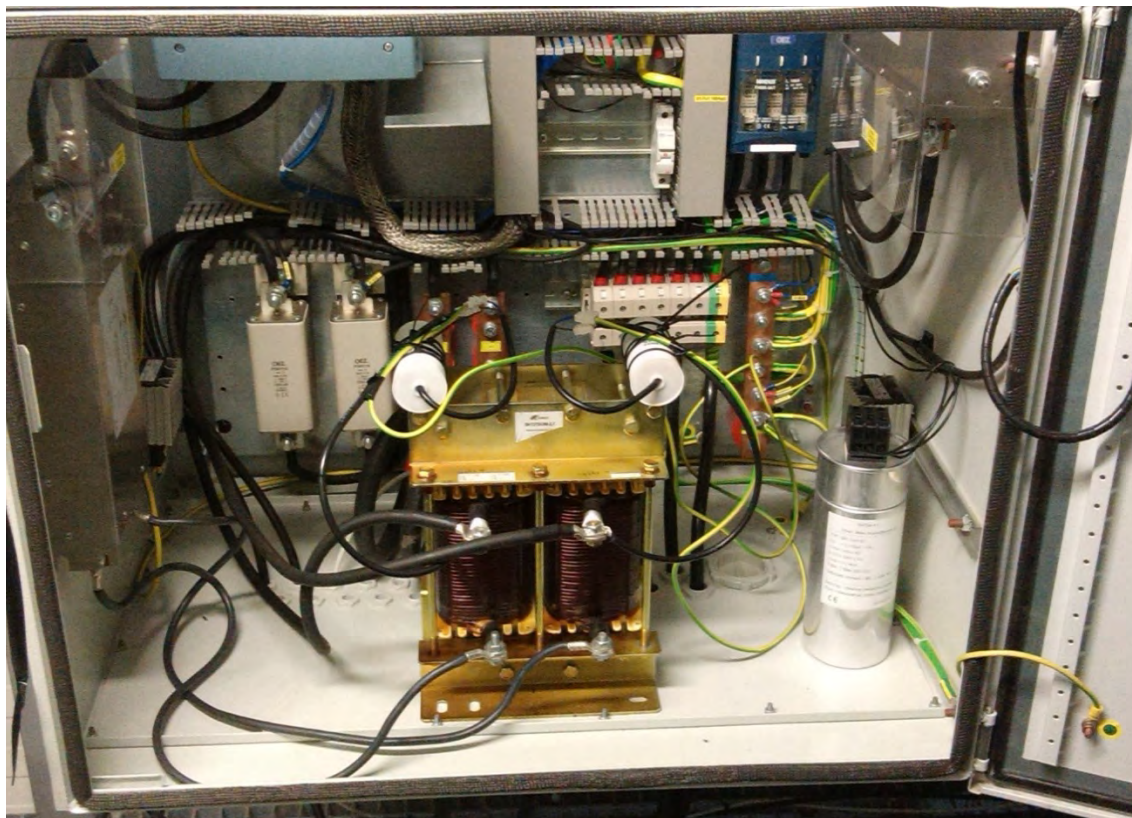
Veškeré spoje na vodičích filtru jsou provedeny ve šroubovém spojení.



Obrázek 13.3 Schéma zapojení filtru

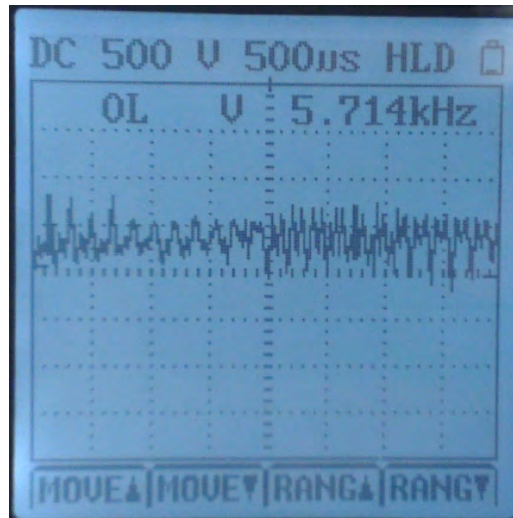
14 HOTOVÝ VÝROBEK

Sestrojený filtr vyniká svojí vysokou hmotností způsobenou majoritně indukčností. Výsledná hmotnost 1ks filtru je 30kg.

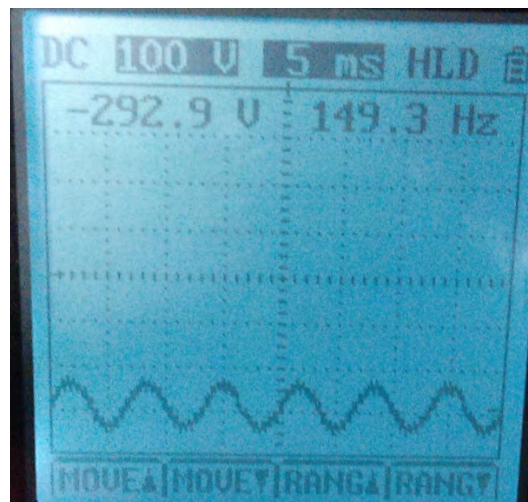


Obrázek 14.1 Osazený filtr mezi střídač a Super string

14.1 Porovnání naměřených rušivých hodnot bez a s filtrem



Obrázek 14.2 Rušivá složka mezi DC vodiči a zemním spojením bez použití filtru



Obrázek 14.3 Odfiltrovaná ušivá složka mezi DC vodiči a zemním spojením při použití filtru

Při použití filtru je rušivá vysokofrekvenční složka, která je škodlivá FV panelům, potlačena. Zbýlých 150Hz je vytvořeno při spínání v 6 pulzním můstku (viz. Kapitola 5.4). Dochází ke stavu, kdy jsou na ráz sepnuty 2 nebo 3 tranzistory tento kmitočet je roven polovině superpozice síťového kmitočtu 300Hz.

14.2 Vyhodnocení vlivu filtru DP na teplotu

14.2.1 Zahřívání filtru

Při pracovním režimu střídače dosahuje filtr, zahříváný tekoucími DC proudy až 100A,

max. teploty 88°C. Jedná se o energii, která je ztracena a nedokážeme ji přeměnit na AC výstup. Bylo zkontrolováno, že vlivem protápění energie ve filtru nedochází k zásadním ztrátám na výrobě střídače. Kontrola byla provedena vyhodnocením vyrobené energie za celý den střídače a porovnáno se sousedním střídačem, na kterém panují stejné elektrické (instalovaný výkon,...) i podnební (zajištění stejného osvitu) podmínky. Pro ukázkou je uvedena tabulka 6 vybraných dní.



Obrázek 14.4 Měření teploty filtru

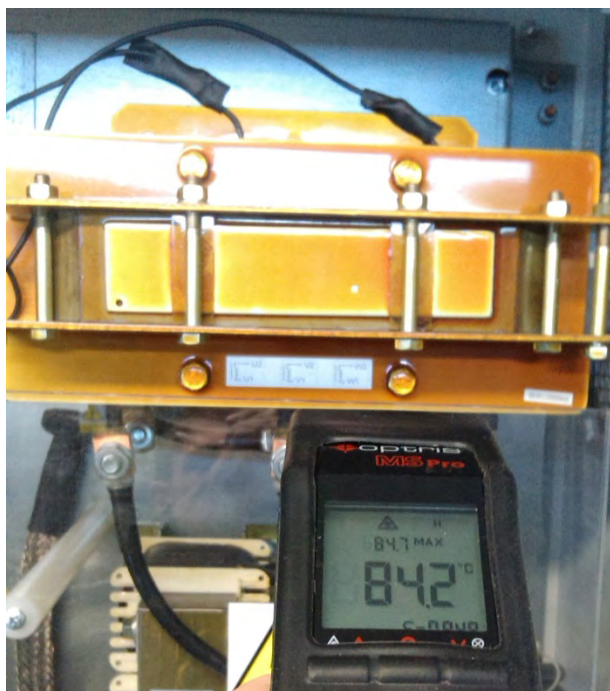
Tabulka 6 Výroba za celý den

	střídač bez filtru	střídač s filtrem od 10.5.2014
7.4.2014 [kWh]	210,46	209,54
30.4.2014 [kWh]	319,50	317,61
10.5.2014 [kWh]	306,59	306,31
11.5.2014 [kWh]	235,55	234,03

14.2.2 Změna teploty na AC sinusovém filtru

Negativní vliv ohřívání vyrobeného filtru je kompenzován mírným snížením teploty na AC sinusovém filtru, který je při použití navrhnutého filtru DP o 8°C nižší.

Porovnání teplot bylo provedeno na sousedních střídačích, na kterých panují stejné elektrické (instalovaný výkon,...) i podnební (zajištění stejného osvitu) podmínky.



Obrázek 14.5 Měření teploty AC sinusového filtru při použití navrhnutého filtru DP

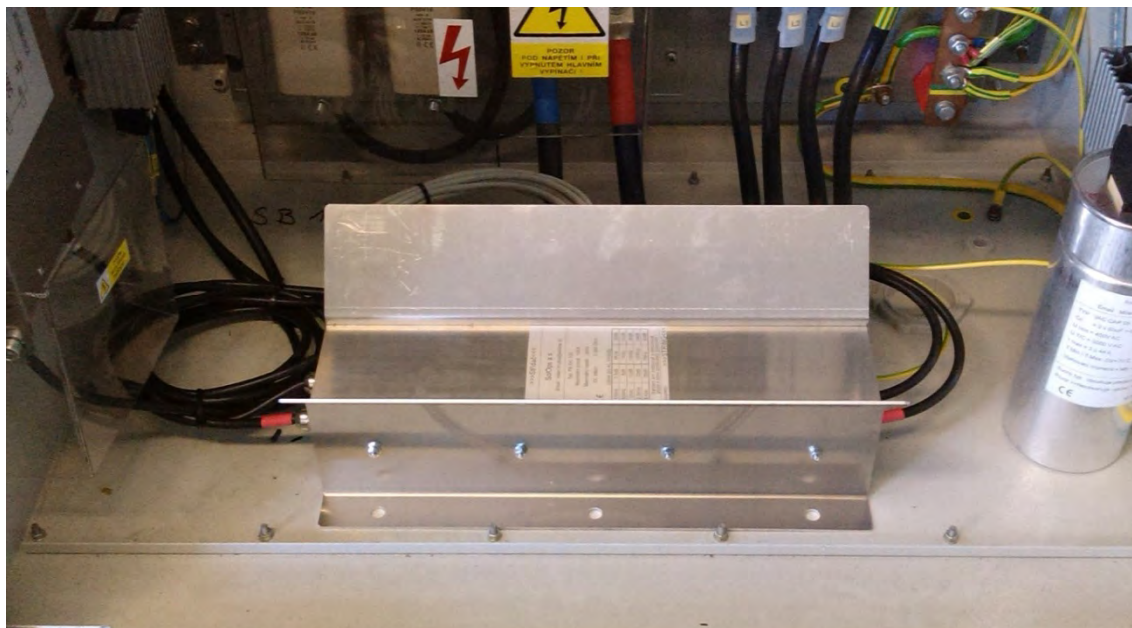


Obrázek 14.6 Měření teploty AC sinusového filtru bez použití navrhnutého filtru DP

15 PROFESIONÁLNÍ VERZE VÝROBKU

Hotový výrobek ze článku 14 byl pouze demoverzí, která sloužila k ověření vlastností filtru. Tedy odfiltrování rušivých složek a s tím spojeného chvění konstrukcí a panelů FVE.

Na základě těchto poznatků byl společností DUKOM s.r.o. vyvinut profesionální filtr, který měl za cíl navíc snížit zahřívání, zmenšit velikost a váhu filtru.



Obrázek 15.1 Profesionální verze výrobku

16 ZÁVĚR

Úkolem této práce, zabývající se rušením (chvěním) fotovoltaických panelů, bylo vytvoření teoretického návrhu sestavení elektrického filtru dolní propust, který zamezí přenášení chvění do fotovoltaických panelů a následně do konstrukce země pospojené s celým systémem elektrárny.

Teoretický úvod práce se zaměřuje na základní popis fotoelektrického jevu a jeho rozdělení. Dále postupuje od elementárních principů fotovoltaických článků, jejich rozdělení, definováním základních parametrů článků, fotovoltaických modulů až k popisu skutečných elektráren a jejich dílčích částí.

Základem teoretického výpočtu filtru bylo definování jeho vstupní a výstupní zátěže. Hodnota vstupní impedance je závislá na použitém softwaru střídače a jeho spínací frekvenci. Naopak výstupní impedance byla vyhodnocena na základě kapacitních vlastností fotovoltaického modulu vůči zemi (tedy nosné konstrukce panelu) a přepočítána dle spínací frekvence střídače.

Samotný výpočet již dodržuje pravidla pro přenos obecného bikvadu typu dolní propust, které byly zkontrolovány simulací v programu PSPICE.

Cílem navazující bakalářské práce bylo sestavení navržených filtrů, jejich nasazení do reálného provozu a relativně krátkodobé vyhodnocení jejich funkce. Konečným výsledkem je funkční filtr typu T-článek

Vyhotovený výrobek splnil všechna očekávání. Odfiltroval nežádoucí rušivé složky. Díky tomu již nedochází ke chvění konstrukcí a panelů FVE. Navíc nedochází k jiskření mezi nešroubovými spoji konstrukcí panelů (např. v místech, kde se kabelové žlaby dotýkají konstrukcí apod.).

Z dlouhodobého hlediska by měl filtr především prodloužit životnost FV panelů. To však pravděpodobně nebude možné potvrdit nebo vyvrátit, protože by nebylo ekonomické vystavit jeden střídač a jeho panely takovému riziku.

LITERATURA

- [1] FINSTERLE, T. *Změny parametrů tenkovrstvých fotovoltaických modulů*. Diplomová práce. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2013.
- [2] KARAMANOLIS, S. *Sluneční energie, Východisko z ekologicko-energetické krize*. MAC v Praze, 1996.
- [3] Teorie fotovoltaiky [online]. [cit. 28. dubna 2013]. Dostupné na [www: http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx](http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx)
- [4] BENDA, V., STANĚK, K., WOLF, P. *Fotovoltaické systémy*. Učební texty k semináři. Praha: ČVUT v Praze, 2011.
- [5] PV education [online]. [cit. 16. prosince 2013]. Dostupné na [www: http://pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra](http://pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra)
- [6] Inteligentní budovy [online]. [cit. 16. prosince 2013]. Dostupné na [www: http://www.ib.cvut.cz/node/445](http://www.ib.cvut.cz/node/445)
- [7] Q.CELLS. *Datasheet k panelům CIGS UFL 95W - 115W*. Q.CELLS v Německu, 2011.
- [8] ET SOLAR. *Datasheet k panelům Polykrystal 255W – 285W*. ET SOLAR.
- [9] Pohonná technika [online]. [cit. 17. prosince 2013]. Dostupné na [www: http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/princip-frekvencniho-menice/princip-pwm-menice](http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/princip-frekvencniho-menice/princip-pwm-menice)
- [10] DOSTAL, T., AXMAN, V. *Elektrické filtry*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.