

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta



**Vývoj a testování wattrouteru
s výkonem do 5 kW**

Katedra fyziky

Disertační práce

Školitel: prof. Ing. Vladislav Poulek, CSc.

Doktorand: Ing. Matouš Havrlík

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto disertační práci „Vývoj a testování wattrouteru s výkonem do 5 kW“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci této práce.

V Praze dne 1.4.2024

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Martinu Librovi, CSc., prof. Ing. Vladislavu Poulkovi, CSc. a panu Ing. Pavlovi Kouřimovi za cenné rady a připomínky, které mi pomohly dokončit disertační práci.

Abstrakt:

Wattrouter (PV Power Diverter) je elektronické zařízení umožňující domácnosti (maloodběrateli) využívat veškerou nadvýrobu z vlastní fotovoltaické elektrárny v případě, že není žádoucí přetok elektrické energie do distribuční sítě. Wattrouter sleduje spotřebu energie domácnosti a jakmile zaznamená nadvýrobu energie do sítě, začne vhodně spínat vyhrazený spotřebič či spotřebiče (postupně podle priority) a tak udržuje energetickou bilanci domácnosti na nule. V reálném provozu bylo zjištěno a prakticky ověřeno, že standardní wattroutery spínají vyhrazené spotřebiče po periodách (jedna či více period zapnuto, jedna či více period vypnuto) a zajišťují tak, aby spotřebič odebíral právě energii odpovídající aktuální nadvýrobě. Vyhrazenými spotřebiči mohou být jen ty, které takovouto regulaci příkonu umožňují, typicky ohmické tepelné zdroje (ohřívač a zásobník teplé vody). Maximální příkon vyhrazeného spotřebiče/spotřebičů (daný ohmickým odporem) musí být stejný nebo vyšší než nejvyšší předpokládaná nadvýroba. Během period sepnutí čerpá spotřebič energii z nadvýroby a potřebný zbytek energie doplňuje odběrem ze sítě. Během period, kdy je spotřebič vypnutý, naopak nadvýroba do sítě přetéká a vrací tak zpět energii ze sítě odebranou v periodách sepnutí. Stávající wattroutery takto využívají dlouhého integračního okna elektronických fakturačních elektroměrů (přibližně 1 s). V rámci této integrační doby wattrouter zajišťuje nulovou energetickou bilanci odběrů a přetoků. Elektroměr proto není schopen fyzické přetoky do sítě registrovat. Zamezení přetoků energie z domácnosti do sítě je tak pouze virtuální. Z výše popsaného vyplývá, že v průběhu proudu při činnosti wattrouteru dochází na rozhraní sítě a domácnosti ke střídání odběrových a přetokových period v různém poměru v závislosti na aktuální výši nadvýroby a příkonu spínaného spotřebiče. Objevuje se tak velké množství frekvenčních složek proudového signálu na širokém intervalu. Fyzické přetoky energie jako nedílná součást principu činnosti a potenciálně problematické zanášení širokého frekvenčního proudového spektra do sítě jsou zásadními nedostatky současných wattrouterů. Proto byl navržen a realizován wattrouter s odlišným způsobem řízení. K regulaci spotřeby je použit napěťový AC/AC měnič s proměnným výstupním napětím o síťové frekvenci. V případě nadvýroby udržuje wattrouter změnou výstupního napětí přetok do distribuční sítě na nule. AC/AC měnič je realizován jako AC chopper s PWM modulací síťového napětí o frekvenci 62,5 kHz se vstupním a výstupním filtrem.

Klíčová slova: fotovoltaika, wattrouter, regulační prvek

Development and testing of wattrouter with power up to 5 kW.

Summary:

A wattrouter is an electronic device that allows a household (small consumer) to use all the excess generation from its own photovoltaic power plant when an overflow of electricity to the grid is not desired. The wattrouter monitors the household's energy consumption and if it detects an overflow of energy to the grid, it starts switching the dedicated appliance(s) appropriately (in order of priority), thus keeping the household's energy balance at zero. It has been observed and practically verified in real operation that existing wattrouters switch the dedicated appliance in periods (one or more periods on, one or more periods off) and ensure that the appliance draws just the energy corresponding to the current overproduction. Dedicated appliances can only be those that allow such power control, typically ohmic heat sources (hot water heater and hot water tank). The maximum input power of the dedicated appliance(s) (given by the ohmic resistance) has to be equal to or higher than the highest expected overproduction. During the switch-on period, the appliance draws part of its energy from the overproduction but supplements the rest of the energy by drawing from the grid. During periods when the appliance is switched off, on the other hand, the overproduction flows to the grid, so returning the energy taken from the grid during the switch-on periods. Existing watt meters thus take advantage of the long integration window of electronic billing meters (approximately 1s). Within this integration period, the wattmeter ensures a zero-energy balance of draws and overflows and the meter is therefore unable to register physical overflows to the grid. The prevention of energy overflows from the household to the grid is thus only virtual. It follows from the above that during the operation of the wattmeter, the periods of drawdown and overflow alternate in different proportions depending on the current level of overproduction and the input power of the switching appliance. Thus, many frequency components of the current signal appear over a wide interval. Physical power overflows as an integral part of the operating principle and the potentially problematic fouling of a wide frequency current spectrum into the network are major shortcomings of current watt-transmitters. Therefore, a wattrouter with a different control method was designed and implemented. An AC/AC voltage converter with a variable output voltage at mains frequency is used to control the power consumption. In case of overproduction, the wattrouter keeps the overflow to the distribution network at zero by varying the output voltage. The AC/AC converter is implemented as an AC chopper with PWM modulation of the mains voltage at 62,5 kHz with input and output filters.

Key words: photovoltaics, wattrouter, regulatory element

Obsah

1	Úvod	1
2	Přehled o současném stavu poznání	2
2.1	Potenciál využití fotovoltaických systémů	2
2.2	Rozvoj fotovoltaických systému v ČR	3
2.3	Způsoby implementace fotovoltaických systému.....	4
2.3.1	Dělení dle způsobu připojení fotovoltaických systémů k rozvodné síti	5
2.3.2	Dělení fotovoltaických systémů dle velikosti a umístění	5
2.3.3	Mikrozdroj elektrické energie	6
2.4	Současný stav zkoumané problematiky.....	7
2.4.1	Analýza komerčních wattrouterů	7
2.4.2	Wattrouter GBO-Aku	8
2.4.3	Wattrouter ECO a Wattrouter MX	8
2.4.4	A-Zrouter SMART	10
2.5	Způsoby spínání spotřebičů	11
2.5.1	Spínání zátěže pomocí relé bez plynulé regulace příkonu	11
2.5.2	Spínání zátěže po periodách či půlperiodách	11
2.5.3	Řízení zátěže PWM signálem	12
2.5.4	Fázová regulace příkonu spotřebiče	12
2.6	Vhodné typy spotřebičů pro připojení k wattrouteru.....	12
2.7	Nevhodné typy spotřebičů pro připojení k wattrouteru.....	13
2.8	Měření spotřeby elektrické energie	13
2.8.1	Vývoj měření spotřeby elektrické energie.....	13
2.8.2	Statické elektroměry elektronické	15
2.8.3	Smart metry	16

2.8.4	Čtyřkvadrantní elektroměry.....	16
2.9	Způsoby měření elektrických veličin	17
2.9.1	Měření proudu v domovním rozvodu.....	18
2.9.2	Proudový transformátor.....	18
2.9.3	Rogowského cívka.....	19
2.9.4	Hallova sonda	20
2.10	Měření napětí v domovním rozvodu	21
2.10.1	Měření napětí pomocí jednofázového transformátoru.....	22
2.10.2	Měření napětí pomocí opticko-elektrické metody	22
2.10.3	Měření napětí pomocí izolovaného zesilovače s kapacitní vazbou.....	23
2.11	Vyšší harmonické	24
2.12	Účinky lineární zátěže na distribuční síť	25
2.13	Účinky nelineární zátěže na distribuční síť	25
2.14	Následky vyšších harmonických v distribuční síti	26
2.14.1	Rušení působící na elektrické ochranné prvky	26
2.14.2	Skinefekt.....	26
2.14.3	Přehřívání transformátorů.....	27
2.14.4	Ovlivnění funkčnosti kompenzačních kondenzátorů	27
2.14.5	Zkreslení harmonického průběhu napětí distribuční sítě.....	27
2.15	Meziharmonické kmitočty.....	27
3	Vědecké hypotézy a cíle práce	28
4	Materiály a metody	29
4.1	Popis funkce typického komerčního wattrouteru	29
4.2	Meziharmonické kmitočty generované wattrouterem	34
4.2.1	Matematická analýza frekvenčního spektra	34

4.2.2	Rychlá Fourierova transformace pomocí osciloskopu	38
4.3	Princip funkce inovativního wattrouteru	41
4.4	Metoda měření činného výkonu	44
4.5	Možnosti bezpečného měření napětí a proudu	46
4.5.1	Výběr metody a prvku pro načítání napětí	46
4.5.2	Přesnost jednotlivých metod měření síťového napětí.....	55
4.5.3	Návrh obvodu pro měření síťového napětí	57
4.5.4	Přípravky pro měření proudu.....	59
4.5.5	Návrh obvodu pro měření proudu	60
4.6	Realizace měřicího modulu wattrouteru.....	61
4.7	Realizace řídicí jednotky wattrouteru.....	63
4.7.1	Software řídicí jednotky	67
4.8	Realizace spínání zátěže	69
4.8.1	Software spínací jednotky	69
4.8.2	AC chopper – PWM modulátor průběhu síťového napětí.....	71
4.8.3	Vstupní a výstupní filtr	74
5	Výsledky a diskuse	76
6	Závěry a doporučení pro využití poznatků v praxi nebo pro další rozvoj oboru.....	80
7	Seznam vědeckých publikací	81
7.1	Vědecké publikace v recenzovaných impaktovaných časopisech:.....	81
7.2	Konference.....	81
7.3	Zahraněční stáž a spolupráce s komerční sférou:.....	81
8	Bibliografie.....	82

Seznam zkratek

A/D převodník	analogově/digitální převodník
DIN	Deutsche Industrie Norm
DPS	deska plošných spojů
EMI	Electromagnetic Interference
ERÚ	Energetický regulační úřad
FFT	Fast Fourier transform
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
IoT	Internet of Things
JTAG	Joint Test Action Group
LAN	Local Area Network
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NN	nízké napětí 230 V
NTP	Network Time Protocol
OBIS	jednoznačné označení registrů v paměti elektroměru
PMW	Pulse-width modulation
SMD	Surface Mount Device
SSR	Solid State Relay
THD	Total Harmonic Distortion
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
USB	Universal Serial Bus
VA-charakteristika	Voltampérová charakteristika
Wi-Fi	Wireless Fidelity
Wp	Watt-peak

Seznam obrázků

Obrázek 1: Celkový roční úhrn slunečního záření v ČR [1].....	2
Obrázek 2: Rozvoj FVE v ČR [5]	4
Obrázek 3: Blokové schéma zapojení FVE s wattrouterem (Měřicí modul + Regulátor) [9],[upraveno autorem]	7
Obrázek 4: Blokové schéma statického elektroměru [22].....	16
Obrázek 5: Toky energií ve čtyřkvadrantním elektroměru [23]	17
Obrázek 6: Princip proudového transformátoru [24].....	19
Obrázek 7: Princip Rogowského cívky [29]	20
Obrázek 8: Princip Hallova senzoru [32]	21
Obrázek 9: Princip transformátoru [34]	22
Obrázek 10: Princip opticko-elektrické metody [zdroj: autor]	23
Obrázek 11: Princip izolačního zesilovače [40]	24
Obrázek 12: Vyšší harmonické v distribuční síti [41]	25
Obrázek 13: Lineární zátěž (VA-charakteristika) [43].....	25
Obrázek 14: Nelineární zátěž (VA-charakteristika) [43].....	26
Obrázek 15: Blokové schéma wattrouteru [zdroj: autor].....	29
Obrázek 16: GreenBono AKU [zdroj: autor]	30
Obrázek 17: Implementace wattrouteru GreenBono AKU do silového rozvaděče [zdroj: autor]	30
Obrázek 18: Reálná funkce wattrouteru – proud na rozhraní distribuční sítě a domovního rozvodu [zdroj: autor]	31
Obrázek 19: Toky energií v domovní elektroinstalaci [zdroj: autor].....	32
Obrázek 20: Odběr proudu dodatečným spotřebičem o příkonu 2000 W při nadvýrobě FVE 500 W [zdroj: autor]	33
Obrázek 21: Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace (modelová a reálná situace) [zdroj: autor]	34
Obrázek 22: Grafy průběhů proudů a jejich frekvenční spektrum [zdroj: autor].....	37
Obrázek 23: Grafy průběhů proudů a jejich frekvenční spektrum [zdroj: autor].....	38
Obrázek 24: Reálné frekvenční spektrum proudu při spínání po periodách komerčním wattrouterem [zdroj: autor]	39
Obrázek 25: Průběh signálu pro poměr odběrových a přetokových period 1:1 a jeho frekvenční spektrum [zdroj: autor].....	39
Obrázek 26: Výstupní proud z měniče SMA SB 1100LV a jeho frekvenční spektrum [zdroj: autor].....	40
Obrázek 27: Blokové schéma inovativního wattrouteru [zdroj: autor].....	41
Obrázek 28: Princip spínání zátěže u inovativního wattrouteru [zdroj: autor]	42
Obrázek 29: Průběh napětí a proudu vyhrazeným spotřebičem [zdroj: autor]	43
Obrázek 30: Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace [zdroj: autor].....	43
Obrázek 31: Průběh napětí, proudu a okamžitého výkonu při spotřebě. [zdroj: autor]	45
Obrázek 32: Průběh napětí, proudu a okamžitého výkonu při dodávce [zdroj: autor]	45
Obrázek 33: Měřicí soustava pro porovnání jednotlivých přípravků [zdroj: autor]	47
Obrázek 34: Vstupní a výstupní signál transformátoru K-2803GCE-1F [zdroj: autor].....	48
Obrázek 35: Normalizovaný a fázově korigovaný signál transformátoru K-2803GCE-1F [zdroj: autor].....	48
Obrázek 36: Vstupní a výstupní signál transformátoru BV EI 305 2055 HAHN [zdroj: autor].....	49
Obrázek 37: Normalizovaný a fázově korigovaný signál transformátoru BV EI 305 2055 HAHN [zdroj: autor].....	50
Obrázek 38: Vstupní a výstupní signál snímače ZMPT101B [zdroj: autor].....	51
Obrázek 39: Normalizovaný a fázově korigovaný signál snímače ZMPT101B [zdroj: autor].....	51
Obrázek 40: Vstupní a výstupní signál proudového transformátoru ZMPT101B [zdroj: autor]	52
Obrázek 41: Normalizovaný a fázově korigovaný signál proudového transformátoru ZMPT101B [zdroj: autor]	52
Obrázek 42: Vstupní a výstupní signál přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 [zdroj: autor].....	53
Obrázek 43: Normalizovaný a fázově korigovaný signál přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 [zdroj: autor].....	54
Obrázek 44: Vstupní a výstupní signál přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 [zdroj: autor]	55

Obrázek 45: Normalizovaný a fázově korigovaný signál přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 [zdroj: autor]	55
Obrázek 46: Přípravky pro načítání síťového napětí [zdroj: autor]:	56
Obrázek 47: Schéma zapojení měření síťového napětí [zdroj: autor]	58
Obrázek 48: Porovnání vstupního a výstupního napěťového signálu na měřicím přípravku [zdroj: autor]	58
Obrázek 49: Ověření přesnosti proudového senzoru ZHT103X [zdroj: autor]	60
Obrázek 50: Schéma zapojení proudového senzoru ZHT103X [zdroj: autor]	61
Obrázek 51: Návrh DPS měřicího modulu [zdroj: autor]	62
Obrázek 52: Měřicí modul wattrouteru ve 3D [zdroj: autor]	63
Obrázek 53: Měřicí modul vyvíjeného wattrouteru [zdroj: autor]	63
Obrázek 54: Návrh DPS řídicí jednotky [zdroj: autor]	65
Obrázek 55: Řídicí jednotka wattrouteru ve 3D [zdroj: autor]	65
Obrázek 56: Řídicí jednotka inovativního wattrouteru [zdroj: autor]	66
Obrázek 57: LCD řídicí jednotky wattrouteru [zdroj: autor]	66
Obrázek 58: DPS pro generování PWM signálu s frekvencí 62,5 kHz [zdroj: autor]	69
Obrázek 59: Úroveň výstupního signálu při určitém činiteli plnění (20, 50 a 90 %) [zdroj: autor]	71
Obrázek 60: Základní schéma AC chopperu [50]	71
Obrázek 61: Konstruktivní řešení spínacího prvku S1 s jedním nebo dvěma tranzistory pro střídavé průběhy napětí [51]	72
Obrázek 62: Obvod pro PWM modulaci průběhu síťového napětí [zdroj: autor]	72
Obrázek 63: Jednoduché schéma s freewheeling diodou v obvodu se spínacím prvkem a indukčností [54]	73
Obrázek 64: Schéma výsledného AC chopperu [zdroj: autor]	73
Obrázek 65: Měření výstupního a vstupního napěťového průběhu při určitém činiteli plnění (20, 50 a 80 %) [zdroj: autor]	75
Obrázek 66: Prototyp inovativního wattrouteru [zdroj: autor]	79

Seznam tabulek

Tabulka 1: Fotovoltaické systémy z pohledu připojení k veřejné distribuční síti	5
Tabulka 2: Fotovoltaické systémy z pohledu velikosti a umístění	6
Tabulka 3: Registry, čtyřkvadrantního elektroměru.....	17
Tabulka 4: Chyba výpočtu činného výkonu u jednotlivých přípravků	56

1 Úvod

Mezi významné obnovitelné zdroje patří fotovoltaické systémy, které jsou v dnešní době čím dál populárnější. Jedná se o poměrně šetrný obnovitelný zdroj elektrické energie vůči životnímu prostředí, protože provoz těchto systémů neprodukuje hluk ani žádné škodlivé látky, které by se uvolňovali do okolního prostředí.

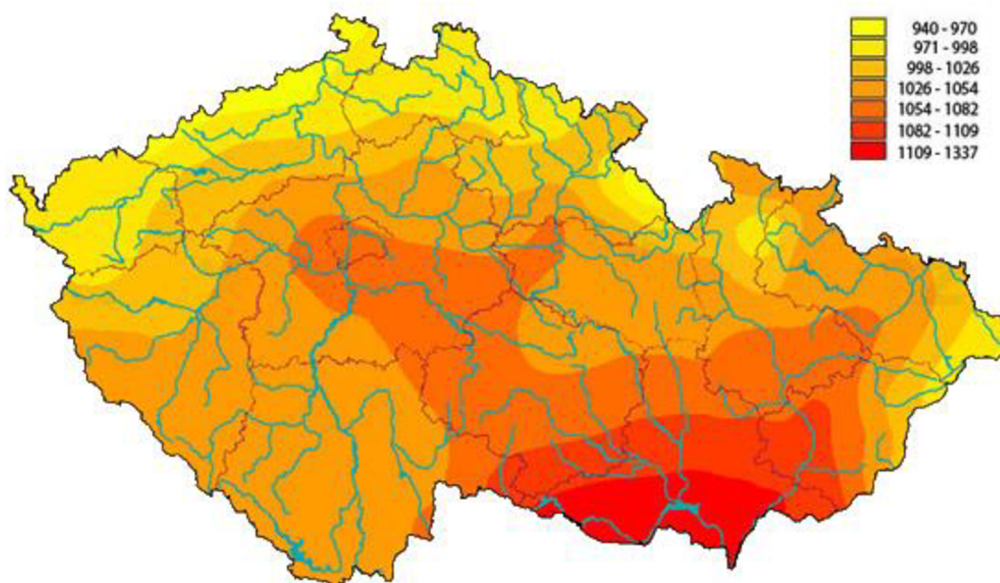
U malých fotovoltaických systémů např. na střechách rodinných domů je možný vzhledem k distribuční síti dvojitý typ provozu. První typ provozu umožňuje, aby energie vyrobená pomocí FVE (fotovoltaická elektrárna) mohla přetékat do distribuční sítě, druhý způsob provozu přetoky do distribuční sítě nepovoluje. U instalací fotovoltaických elektráren s přetokem do sítě je nutné svolení distributora. V případě možných větších přetoků ideálně s takovou smlouvou, kdy Vám distributor za daný přetok zaplatí. V roce 2021 byla částka za výkup elektrické energie přibližně 50 haléřů za kWh. Pro vlastníky malých fotovoltaických elektráren může být v dnešní době jednodušší provozovat fotovoltaický systém bez přetoku elektrické energie do distribuční sítě. V takovém případě je dle legislativy nutné spotřebovat veškerou elektrickou energii vyrobenou z fotovoltaické elektrárny v místě výroby a zamezit, tak přetokům do distribuční sítě.

Zamezit přetokům je možné například řízením (omezováním) výkonu produkovaného FVE. Tato metoda je nevýhodná zejména kvůli prodloužení návratnosti investice do fotovoltaického systému. Vhodnější je využívat všechnu energii, kterou může v daný okamžik FVE vyrábět. Pokud momentálně domácnost nemá dostatek zapnutých spotřebičů, které by veškerou vyráběnou energii spotřebovali, je možné aktuální nadvýrobu „nasměrovat“ do jednoho nebo více vhodně dimenzovaných spotřebičů, které tuto nadvýrobu smysluplně využijí (typicky např. bojler). Zařízení, které umožňuje zamezit přetok elektrické energie vyrobené z fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě s využitím takovýchto spotřebičů se nazývá „wattrouter“. Wattrouter je regulační prvek, který na základě sledování napětí a proudu v místě připojení domácnosti k elektrické síti dokáže určit aktuální velikost a směr toku elektrické energie. V případě detekce nadvýroby dokáže regulovat spotřebu tak, aby nedošlo k nežádoucímu přetoku elektrické energie vyrobené pomocí FVE do distribuční sítě.

2 Přehled o současném stavu poznání

2.1 Potenciál využití fotovoltaických systémů

Intenzita záření na povrchu Slunce je přibližně $70\,000\text{ kW/m}^2$. Na planetu Zemi dopadá pouze malá část tohoto záření, přesto však za rok v nejslunnějších místech Země dosahuje sluneční záření hodnot okolo 2200 kW/m^2 . Potenciál využití fotovoltaických systému v České republice je poměrně vysoký. V některých zeměpisných oblastech České republiky je roční úhrn slunečního záření až 1337 kW/m^2 . Průměrná doba celkového slunečního svitu na území České republiky bez oblačnosti je 1400–1700 hodin ročně. Na základě dlouhodobého meteorologického měření byla pro území České republiky sestavena mapa ročního úhrnu globálního slunečního záření, která je vidět na obrázku č. 1. Hodnoty na obrázku jsou uváděny v kW/m^2 . [1]



Obrázek 1: Celkový roční úhrn slunečního záření v ČR [1]

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje využití solární energie tedy fotovoltaických systémů je intenzita slunečního záření a počet hodin dopadajícího slunečního svitu právě na povrch fotovoltaických panelů v jednotlivých ročních obdobích. Celkové množství slunečního záření dopadajícího na fotovoltaické systémy je výrazně ovlivněno zeměpisnou polohou, sklonem, konstrukcí a orientací FVE ke slunci. [2]

2.2 Rozvoj fotovoltaických systému v ČR

Největší nárůst počtu fotovoltaických elektráren byl zaznamenán mezi roky 2008 a 2011, kdy se FVE montovaly i na místa, která disponovala poměrně nízkou intenzitou dopadajícího slunečního záření. Rozvoji FVE pomohla i nepřiměřeně vysoko nastavená výkupní cena elektřiny vyrobené pomocí fotovoltaických systémů a její fixace na následující roky. Nastavení vyšší výkupní ceny bylo z odůvodněno dosažením cílů vůči Evropské unii, které si stanovila Česká republika v roce 2002. [3]

V tomto roce se vytyčil cíl, že do roku 2020 se bude v České republice vyrábět 13 % elektrické energie právě pomocí FVE. V roce 2002 byla cena ERÚ (Energetický regulační úřad) stanovena na 6 Kč/kWh při investičních nákladech pohybujících se okolo 200 Kč/Wp. Investice do vybudování FVE za takových to podmínek byla příliš vysoká a její návratnost byla nerentabilní. [3]

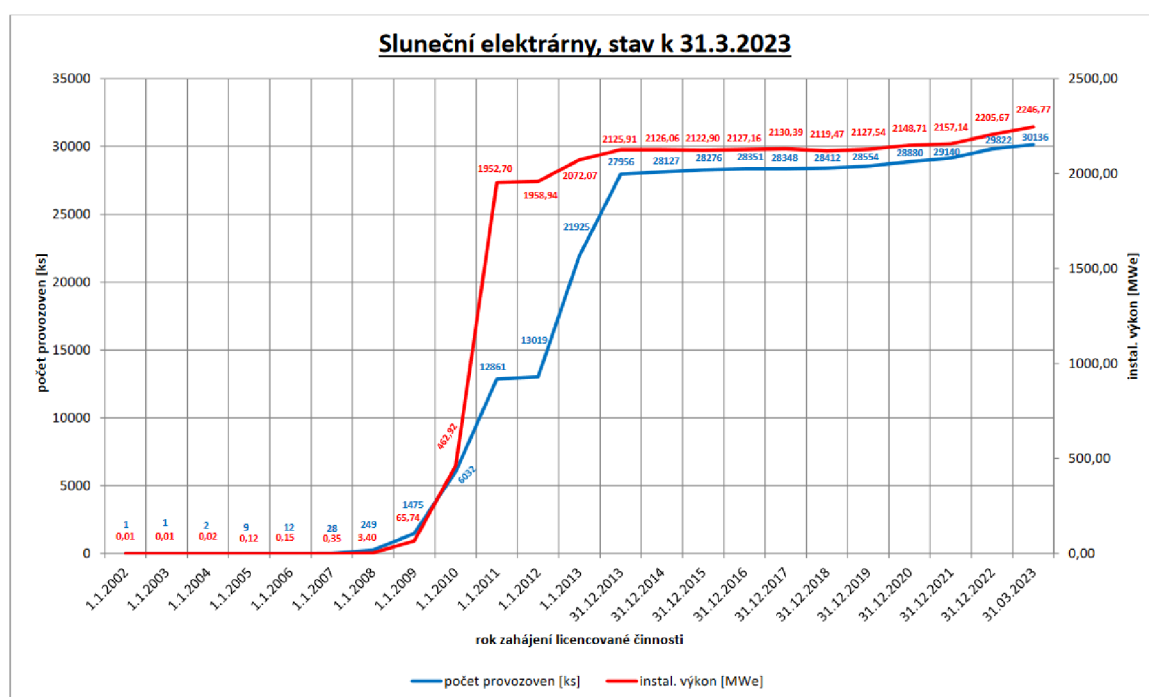
Česká republika byla nucena provést změnu, tak aby v roce 2020 bylo dosaženo požadovaného cíle. Žádaná změna přišla se zavedením zákona (č. 180/2005 Sb. podpora využívání obnovitelných zdrojů) v roce 2006, kdy ERÚ stanovil výkupní cenu na 15 Kč/kWh a tuto cenu zafixoval na 20 let od výstavby elektrárny. Odůvodnění uvedeného zákona byla garance návratnosti investice do 15 let od spuštění provozu FVE. Dále byl zákon upraven pozměňovacím návrhem, který upravoval pokles výkupní ceny z předchozího roku maximálně o 5 %. Tento návrh zamezil reagovat na klesající pořizovací náklady nutné pro zprovoznění fotovoltaických elektráren, které klesaly na základě silně se rozvíjící produkce fotovoltaických panelů v Čínské lidové republice. [3]

Instalovaný výkon z FVE byl v roce 2008 necelých 40 MW. O necelé tři roky později tedy v roce 2011 byl již k dispozici výkon přibližně 1960 MW. V tuto dobu měla Česká republika čtvrtý největší dostupný výkon z fotovoltaických elektráren v Evropě a závazek vůči evropské unii byl téměř splněn. [3]

V roce 2011 byla schválena další novela zákona (č. 180/2005 Sb. podpora využívání obnovitelných zdrojů), která upravovala maximální 5% meziroční snížení výkupní ceny. Nakonec v roce 2013 byla další novelou zákona podpora fotovoltaických elektráren spuštěných po 31.12.2013 úplně zastavena. [3]

Jako náhrada zákona č. 180/2005 Sb. vznikl v roce 2014 program s názvem „Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost 2014–2020“, který zastřešovalo MPO (Ministerstvo průmyslu a obchodu). Ve zmíněném programu MPO vyhlásilo několik výzev, které podporovaly rozvoj fotovoltaických elektráren v České republice. Dotační program však již pevně neurčuje výši výkupní ceny ani dobu, po kterou bude elektrickou energií vykupovat, ale jednorázově přispívá na realizaci fotovoltaické elektrárny. [4]

Nárůst počtu provozoven FVE v letech 2002–2023 je graficky znázorněn na obrázku č. 2 modrou křivkou. Červenou křivkou je na totožném obrázku znázorněn vývoj instalovaného výkonu v MW pro stejné časové období. Ke konci roku 2021 byl instalovaný výkon z fotovoltaických elektráren přibližně 2 206 MW, který dodávalo 29 822 provozoven. [5]



Obrázek 2: Rozvoj FVE v ČR [5]

2.3 Způsoby implementace fotovoltaických systému

Trend a popularita fotovoltaických elektráren již není ve výstavbě velkoplošných FVE, jako tomu bylo mezi roky 2008–2011. Dnešním trendem je instalace fotovoltaických elektráren na střechy a fasády rodinných domů, kdy takováto implementace FVE slouží primárně pro snížení nákladů za spotřebovanou energii a dosažení částečné energetické nezávislosti daných objektů.

2.3.1 Dělení dle způsobu připojení fotovoltaických systémů k rozvodné síti

Fotovoltaické elektrárny je možné provozovat různými způsoby. Mezi základní dělení FVE patří způsob připojení k distribuční síti. Dle připojení jsou fotovoltaické systémy děleny na systémy, které jsou napojeny na distribuční síť a jsou označovány jako „ON-GRID“ systémy a na fotovoltaické systémy, které pracují nezávisle na rozvodné síti. Tyto systémy, které nejsou připojeny k distribuční síti nesou označení „OFF-GRID“ popřípadě jsou označovány jako ostrovní (stand-alone) nebo autonomní systémy. [6]

Dále se „ON-GRID“ systémy dělí na fotovoltaické systémy připojené přímo k rozvodné síti a systémy připojené přes domácí síť. Stejným způsobem jsou kategorizovány i „OFF GRID“ systémy. Ostrovní systémy mohou existovat bez zásobníků energie, se zásobníkem energie anebo se jedná o hybridní ostrovní fotovoltaický systém. Pro přehlednost je dělení fotovoltaických systémů z pohledu připojení k distribuční síti zaneseno do následující tabulky. [6] [7]

Tabulka 1: Fotovoltaické systémy z pohledu připojení k veřejné distribuční síti

Fotovoltaické systémy z pohledu připojení k veřejné distribuční síti		
	FV systémy připojené k rozvodné síti "ON-GRID"	FV ostrovní systémy "OFF-GRID"
1	systémy přímo připojené k distribuční síti	systémy se zásobníky energie
2	systémy připojené k veřejné síti přes domácí síť	systémy bez zásobníků energie
3	hybridní systémy	

2.3.2 Dělení fotovoltaických systémů dle velikosti a umístění

V České republice je možné FV systémy vybudovat třemi různými způsoby. Mezi nejmenší FVE se řadí instalace fotovoltaických panelů na střechy a fasády rodinných domů či výrobních hal. Do středně velké kategorie se řadí instalace fotovoltaických systémů, které pro svůj provoz využívají plochu již opuštěných zemědělských či průmyslových areálů. Největšího instalovaného výkonu dosahují fotovoltaické elektrárny instalované na „zelené louce“, tedy na velkorozměrném pozemku pořízeném za účelem výstavby FVE. Dělení fotovoltaických systémů dle velikosti a umístění je přehledně zaneseno do tabulky č. 2. [7]

Tabulka 2: Fotovoltaické systémy z pohledu velikosti a umístění

Fotovoltaické systémy z pohledu velikosti a umístění	
instalace	
malé	fasády, střechy budov
střední	dřívější zemědělské nebo průmyslové areály
velké	velkoplošný pozemek pořízený za účelem výstavby FVE

2.3.3 Mikrozdroj elektrické energie

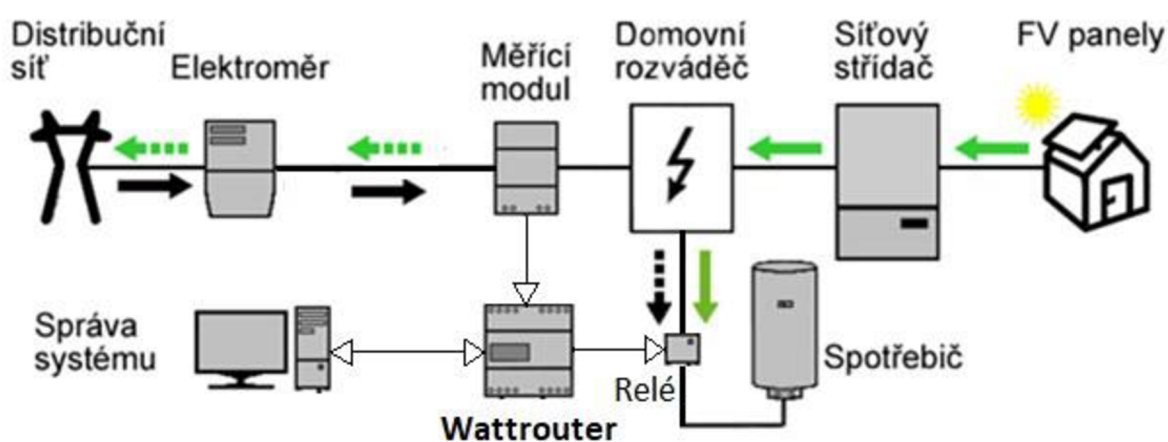
Nejčastěji jsou FVE instalovány v režimu tzv. mikrozdroje. Mikrozdroj elektrické energie je možné do distribuční soustavy připojit ve dvou režimech standardní a zjednodušený. Standardní režim je využíván při záměru dodávat vyrobenou elektrickou energii do distribuční soustavy NN (nízkého napětí). Dále je nutné standardní režim připojení využít v případě, kdy hodnoty naměřené impedance překračují povolené limitní hodnoty. Zjednodušený režim připojení mikrozdroje je určen uživatelům, kteří využijí vyrobenou elektrickou energii výhradně pro svoji spotřebu a technologickým zařízením zajistí zamezení přetoku vyrobené elektrické energie do distribuční soustavy NN. Dále musí splnit mezní hodnoty impedance proudové smyčky v místě připojení. [8]

Zjednodušený proces připojení FVE k distribuční síti je možné učinit bez licence za dodržení následujících podmínek. Výrobna elektrické energie umožňuje paralelní provoz s distribuční sítí NN. Maximální jmenovitý střídavý proud je 16 A na fázi. Důležitou podmínku definující mikrozdroj je, že výkon dané výroby nepřesáhne 10 kW a veškerá elektrická energie je spotřebována v místě její výroby. [8]

Ceny energií v současné době rostou a téma instalace fotovoltaické elektrárny na střechu či fasádu rodinného domu je čím dál více aktuální. Úhrn slunečního záření, jak ukazuje obrázek č. 1, je v České republice na většině míst dostačující a při využití FVE je možné snížit náklady za spotřebu elektrické energie dodanou distributorem. Při správném návrhu a užívání fotovoltaického systému je návratnost investice do FVE v řádu jednotek let. Prodej vyrobené elektriny z obnovitelných zdrojů do distribuční sítě je při dnešních cenách neekonomický. Je tedy vhodné FVE navrhnout tak, aby docházelo k maximálnímu využití vyrobené elektrické energie pro vlastní spotřebu. Maximální využití elektrické energie vyrobené pomocí mikrozdroje pro vlastní spotřebu zaručuje wattrouter, který spínáním jednotlivých spotřebičů zamezuje přetok přebytečné elektrické energie do distribuční soustavy NN.

2.4 Současný stav zkoumané problematiky

Wattrouter je zařízení, které je vhodné implementovat v případě zjednodušeného připojení mikrozdroje do distribuční soustavy. Nutnou součástí wattrouteru je měřicí modul, který v reálném čase monitoruje proud tekoucí mezi domovním rozvaděčem a fakturačním elektroměrem. Samotný regulátor pak vyhodnocuje směr toku proudu v místě měřicího modulu a v případě zjištění přetoku elektrické energie do distribuční soustavy spíná připojené spotřebiče tak, aby využil veškerou přebytečnou elektrickou energii dodávanou z FVE. Blokové schéma zapojení s FVE s wattrouterem je znázorněno na obrázku č. 3.



Obrázek 3: Blokové schéma zapojení FVE s wattrouterem (Měřicí modul + Regulátor) [9],[upraveno autorem]

2.4.1 Analýza komerčních wattrouterů

Wattroutery nabízené na českém trhu používají k zamezení přetoku do distribuční sítě primárně spínání vyhrazeného spotřebiče po periodách. Podle aktuální nadvýroby je tedy spotřebič cyklicky spínán a odspínán na celé periody tak, aby se energie odebraná spotřebičem v rámci integračního intervalu elektroměru rovnala energii z nadvýroby fotovoltaické elektrárny. Podle situace se tak střídají určité počty sepnutí spotřebiče (spotřebič díky svému neměnnému příkonu spotřebovává energii z FVE a zbytek potřebné energie doplňuje ze sítě) a určité počty period, kdy je spotřebič odepnut a během kterých dochází k přetoku nadvýroby do sítě. Jelikož v rámci integrační doby elektroměru je bilance odebrané energie ze sítě a přetoky energie vrácené do sítě nulová, elektroměr tyto přetoky nezaznamená. [10]

Na našem trhu existují tři čeští výrobci, kteří nabízejí wattroutery umožňující řízení přetoků z FVE do distribuční sítě. Společnost YORIX s.r.o. na český trh dodává zařízení s názvem

GBO-Aku. Druhou společností, která na český trh dodává wattroutery je SOLAR controls s.r.o. a její nejaktuálnější produkty nesou název WATTROUTER ECO a WATTROUTER MX. Poslední společností na českém trhu je společnost AZ TRADERS s.r.o., která na trh dodává regulátor s názvem A-Zrouter SMART.

Wattroutery jsou navrženy pro využití s jednoduchými střídači, které nedisponují žádnými speciálními funkcemi a žádným způsobem neřídí toky elektrické energie vyrobené z FVE v místě její instalace. Síťové regulátory umí pracovat i s hybridními střídači, které umožňují přebytečnou energii z FVE ukládat do baterií. V tomto případě regulují energii, která je vyrobená z FVE a je nadbytečná i pro nabíjení baterie, protože je dosažen maximální nabíjecí výkon a tím vzniká prostor pro spínání dalších spotřebičů. [10]

2.4.2 Wattrouter GBO-Aku

Wattrouter GBO-Aku od společnosti YORIX s.r.o. je regulátor, který umožňuje plynule regulovat výkon pro optimální využití elektrické energie z jakékoliv fotovoltaické elektrárny. Tento regulátor může pracovat ve dvou režimech. První režim, který se nazývá „wattrouter“, zamezuje přetokům nadbytečné elektrické energie do sítě. Druhý režim s názvem „vytěžovač“ je vhodný pro ostrovní fotovoltaické systémy. Síťový regulátor GBO-Aku disponuje šesti digitálními výstupy umožňující plynulé řízení výkonu pomocí SSR (Solid State Relay). Skokové řízení je zajištěno pomocí pěti relé, které jsou integrovány přímo do regulátoru. Výstupní a ovládací svorky výše zmíněných výstupů jsou vyvedeny na svorkovnici. Značnou nevýhodou je, že wattrouter GBO-Aku je možné konfigurovat pouze pomocí rozhraní RS-485, které využívá protokol MODBUS. Pro konfiguraci regulátoru z osobního počítače je zapotřebí využít převodník z USB (Universal Serial Bus) na RS-485, který není součástí dodávky wattrouter GBO-Aku. Dále je nutné do osobního počítače nainstalovat software, který umožňuje konfiguraci tohoto regulátoru. Výhodou je integrace proudového transformátoru pro jednofázové měření. [11]

2.4.3 Wattrouter ECO a Wattrouter MX

Společnost SOLAR controls s.r.o. nabízí wattroutery aktuálně ve dvou variantách. Jednotlivé varianty se liší jak cenově, tak dostupnou funkcionalitou. Veškeré dostupné varianty těchto síťových regulátorů jsou vhodné pro použití s FVE o velikosti 2–5 kWp u jednofázové soustavy nebo 5-12 kWp u třífázové soustavy. Veškeré dostupné verze wattrouterů od firmy SOLAR controls s.r.o. umožňují měřit proud na jednotlivých fázích do 20 A. Spínání spotřebičů je

zajištěno pomocí klasických relé nebo pomocí SSR. Tato varianta spínání pak nevyžaduje aktivní chlazení výkonových prvků a tím je docílen bezhlučný provoz těchto wattrouterů. Současně jsou dostupné varianty vybaveny modulem reálného času, který je nutnou součástí pro nastavení časových programů. Samotný obvod reálného času pak disponuje vlastní baterií pro udržení nastaveného data a času i při výpadku elektrické energie. [12]

Základní variantou je Wattrouter ECO. Tato základní varianta pomocí mikrokontroleru sleduje výrobu z FVE a spotřebu elektrické energie v domácnosti. Na základě provedeného měření spíná spotřebiče připojené k tomuto zařízení. Nastavení základního modulu je možné provádět z PC pomocí USB. Wattrouter ECO disponuje šesti výstupy, dva výstupy jsou ovládány pomocí standardního relé a čtyři výstupy jsou řízeny pomocí SSR. Zakoupením softwarového rozšíření je možné k této variantě přidat sledování statistik spotřeby, přetoků a dalších parametrů, které jsou odesílány z řídicí jednotky Wattrouteru ECO. [12]

Dražší variantou je Wattrouter Mx. Tato verze wattrouteru od společnosti SOLAR controls s.r.o. disponuje 8 výstupy, které umožňují ovládat jednotlivé spotřebiče. Výstupy ovládají dvě standardní relé a zbylých šest výstupů je řízeno pomocí SSR. Princip funkce spínání spotřebičů je stejný jako u levnější varianty. Výhodou je, že zařízení je možné konfigurovat jak pomocí USB, tak vzdáleně pomocí rozhraní Ethernet. Komunikaci do sítě LAN (Local Area Network) zaručuje ethernetový port RJ-45, který je součástí Wattrouter Mx. Pomocí komunikačního rozhraní Ethernet je možné do konfigurace Wattrouter Mx přistupovat přes webové rozhraní a není tak nutné do osobního počítače instalovat další podpůrný software. Pokud je Wattrouter Mx připojen do počítačové sítě, je možné nastavovat modul reálného času pomocí NTP (Network Time Protocol) a není potřeba čas a datum do řídicí jednotky wattrouteru zadávat ručně. Nevýhodou této komunikace je, že je nutné mít k dispozici ethernetový port v elektrickém rozvaděči nebo v místě instalace wattrouteru. Další nevýhoda spočívá v bezpečnostních rizicích, které vznikají při prolomení lokální počítačové sítě. Dále je Wattrouter Mx vybaven čtečkou MicroSD karet. Po vložení MicroSD karty do čtečky je k dispozici možnost ukládání podrobných statistik právě na tuto paměťovou kartu. Wattrouter je vybaven komunikačním rozhraním RS-485. Pro přesnější výpočet výkonu je Wattrouter Mx vybaven měřením napětí na fázi L1. Dále je možné na vstup tohoto síťového regulátoru připojit teplotní čidlo a nastavit podmínky na základě teploty v teplotních plánech. [12]

2.4.4 A-Zrouter SMART

Stejně jako předchozí regulátory umožňuje A-Zrouter SMART efektivně využít přebytečnou elektrickou energii vyrobenou z fotovoltaické elektrárny, tak že zabraňuje toku elektrické energie z objektu do rozvodné sítě. A-Zrouter SMART se skládá ze dvou částí. Měřicí jednotka DRP-3SM je umístěna v rozvaděči na DIN (Deutsche Industrie Norm) lištu a pomocí radiové frekvence 433 MHz komunikuje s regulační jednotkou DRP-3SL, která je sériově zapojena do obvodu s akumulacím tepelným spotřebičem a je koncipována pro umístění na zeď. Zvýšení spolehlivosti bezdrátové komunikace mezi regulační a měřicí jednotkou zajišťuje duplexní spojení. A-Zrouter SMART disponuje Wi-Fi (wireless fidelity), pomocí které je možné provádět veškerou konfiguraci tohoto regulátoru. Jedna měřicí jednotka umožňuje odesílat svá data až třem regulačním jednotkám, které pracují v kaskádním režimu. Konfigurační prostředí je dostupné přes webový prohlížeč, kde je možné získat informace o fungování celého systému. A-Zrouter SMART reguluje přetoky elektrické energie pomocí pulsní regulace se spínáním v nule. Veškeré výkonové prvky jsou integrovány přímo do regulátoru. Pokud je A-Zrouter SMART připojen k internetu, dojde k nastavení data a času pomocí NTP. V případě, že není internet dostupný je možné tyto údaje zadat ručně v konfiguračním menu regulátoru. Nevýhodou tohoto regulátoru je, že je možné zařízení konfigurovat pouze pomocí webového rozhraní. Mezi další nevýhody se řadí bezdrátová komunikace na frekvenci 433 MHz mezi měřicí jednotkou a regulátorem. Tato radiová frekvence je snadno zarušitelná a může, tak dojít k sabotáži funkce zařízení. Společnost AZ TRADERS s.r.o. dočasně nabízí zdarma službu s názvem AZcloud, která umožňuje správu regulačního systému z celého světa. Z bezpečnostních důvodů jsou však některé funkce (např.: nastavení výkonu topné spirály) dostupné pouze z lokální sítě. [13]

2.5 Způsoby spínání spotřebičů

Pokud wattrouter vyhodnotí přetok elektrické energie vyrobené z FVE do distribuční soustavy, musí být schopen řídit spotřebu vyhrazených spotřebičů (vhodným spínáním), aby byla přebytečná elektrická energie spotřebována v místě výroby. Wattrouter může spínat zátěž několika způsoby. Jednotlivé způsoby regulace spínání jsou popsány v následujících odstavcích.

2.5.1 Spínání zátěže pomocí relé bez plynulé regulace příkonu

Spínání spotřebičů pomocí relé umožňuje základním způsobem regulovat spotřebu elektrické energie vyrobenou z FVE. Jedná se o dvoustavovou regulaci. Při vypnutém stavu spotřebič neodebírá žádnou energii a při sepnutém stavu je odebírán maximální výkon spotřebiče. Tento způsob regulace je jediný možný pro spotřebiče, u kterých není možná regulace výkonu. Mezi tyto spotřebiče jsou řazeny motory, čerpadla a další jim podobné. Standardně jsou wattroutery nastaveny tak, aby spínaly tyto spotřebiče v případě, že FVE dodává výkon větší, než je definovaný příkon vyhrazeného spotřebiče. V okamžiku, kdy nadvýroba klesne pod hodnotu příkonu spotřebiče je spotřebič wattrouterem vypnut. Dvoustavová regulace pomocí relé neumožňuje beze zbytku umořovat plynule se měnící přebytky z fotovoltaické elektrárny. Výhodou je, že při dostatečných prodlevách mezi jednotlivými spínanými stavy negeneruje tato regulace negativní vlivy na distribuční síť. [10]

2.5.2 Spínání zátěže po periodách či půlperiodách

Dalším způsobem, jak regulovat přetoky nadbytečné elektrické energie vyrobené z FVE je připojený spotřebič periodicky spínat a vypínat na doby v řádu síťových period. Změnou poměru počtu period sepnutí a odpojení spotřebiče lze dosáhnout dostatečného množství úrovní zdánlivého příkonu spotřebiče. Tento způsob regulace umožňuje rychlou modulaci příkonu spotřebiče podle aktuálního přebytku výkonu FVE. Regulace založená na výše popsaném principu využívá relativně dlouhé integrační doby fakturačního elektroměru. Čtyřkvadrantní elektroměry nejsou schopné na toto rychlé střídání odběrových a přetokových period v rámci integrační doby reagovat a nezaznamenají tedy žádnou dodávku ani spotřebu elektrické energie z distribuční sítě. Regulaci tohoto typu lze použít pouze pro čistě odporové spotřebiče a daný spotřebič musí být spínán pomocí SSR relé umožňujícím spínání v nule. Regulace spínáním spotřebiče po periodách může způsobovat tzv. flickr pozorovatelný ve formě blikání světelných

zdrojů způsobený kolísáním napětí v rozvodu při spínání a rozpínání spotřebiče v řádu jednotek až desítek Hz. Flicker lze omezit zdvojnásobením spínací frekvence spotřebiče tak, že se nespíná periodicky po celých periodách, ale po půlperiodách. [10]

2.5.3 Řízení zátěže PWM signálem

Wattrouter nastavuje střidu pulsně šířkového signálu na digitálním výstupu tak, aby střída odpovídala aktuální velikosti nadvýroby. Spínání pomocí PWM signálu je určeno pouze pro ovládání specifických spotřebičů. PWM signál generovaný z wattrouteru v sobě nese zakódovanou informaci o velikosti dostupného činného výkonu a daný spotřebič jako je např. výkonový měnič nebo nabíječka elektromobilu dokáže na základě přijaté informace z PWM signálu nastavit vlastní výkon. PWM signálem nelze spínat běžné spotřebiče. [10]

2.5.4 Fázová regulace příkonu spotřebiče

Princip fázové regulace příkonu spotřebiče je založen na jeho připojování a odpojování během každé půlperrody síťového napětí v určitém časovém okamžiku (fázi průběhu). Regulační prvek sepne spotřebič během každé půlperrody síťového napětí v takové době, aby průměrný výkon spotřebiče byl shodný s aktuálním přebytkem elektrické energie vyrobené z FVE. Fázovou regulaci příkonu spotřebiče umožňuje SSR relé, které spíná kdykoliv během půlperrody a vypíná v nule. Tento režim regulace také využívá integrační dobu elektroměru. Během integrační doby proudí elektrická energie do distribuční sítě a zpět, tak aby součet energie odebrané z distribuční sítě a energie dodané z FVE do distribuční sítě byl nulový. Faturační elektroměr tyto rychlé změny směru toku energie není schopen správně vyhodnotit, a tak nenačítá spotřebu ani dodávku elektrické energie. Regulace spínání v libovolném okamžiku eliminuje tzv. flicker, ale zásadně ovlivňuje kvalitu distribuční sítě svými zpětnými vlivy, například generováním vyšších harmonických. [10]

2.6 Vhodné typy spotřebičů pro připojení k wattrouteru

K regulačnímu prvku typu wattrouter je vhodné připojovat spotřebiče akumulárního typu nebo ty spotřebiče, které mohou být provozovány jen v době, kdy fotovoltaická elektrárna vyrábí elektrickou energii. Nejčastěji se jedná o spotřebiče zajišťující ohřev užitkové vody. Příkladem těchto spotřebičů jsou bojler a topné spirály v akumulárních nádržích. Dále je možné k wattrouteru připojit infrazářiče, topné obrazy nebo přímotopy, které zajišťují částečné vytápění daného objektu. Dalšími typickými spotřebiči mohou být zařízení obsluhující bazény,

jako jsou bazénové filtrace, přímotopy nebo bazénová tepelná čerpadla. Jedná se o typické letní spotřebiče, které jsou schopny pracovat na energii vyrobenou z FVE. [10]

2.7 Nevhodné typy spotřebičů pro připojení k wattrouteru

Jedná se o spotřebiče, které nelze odpojit od napájení při poklesu výroby elektrické energie z FVE. Mezi takové řadíme spotřebiče běžící v programovém cyklu. Běžící program ve spotřebiči totiž není vhodné na základě poklesu výroby elektrické energie z FVE přerušit. Typickými zástupci těchto spotřebičů jsou pračky, myčky a sušičky. Dalšími nevhodnými spotřebiči jsou mrazáky a lednice. Tyto spotřebiče není možné odpojit od elektrické energie z důvodu udržení stálé vnitřní teploty. Nevhodnými spotřebiči jsou také elektrické sporáky, varné konvice a pečící trouby z důvodu jejich použití nezávisle na přebytku elektrické energie. Počítače a jiná elektrická zařízení reprezentují spotřebiče s trvalým požadavkem připojení k síťovému napětí. Mezi nevhodné spotřebiče jsou zařazeny zdroje světla, které jsou primárně využívány v době kdy FVE nevyrábí elektrickou energii. [10]

2.8 Měření spotřeby elektrické energie

Pro pochopení současné funkce wattrouteru je potřeba porozumět jakým způsobem je v dnešní době měřena spotřeba elektrické energie v daném objektu. Wattrouter totiž pro svojí funkci vhodně využívá principu měření moderních elektroměrů, kdy využívá jejich relativně dlouhou integrační dobu (cca 50 period síťového napětí). Následující odstavce popisují principy jednotlivých typů elektroměrů, které využívají distributoři elektrické energie pro odečet spotřeby.

2.8.1 Vývoj měření spotřeby elektrické energie

Elektrická energie je do domácností zaváděna již od první poloviny 20. století. Ke kompletnímu pokrytí elektrickou energií došlo v České republice teprve až v roce 1955. Od této doby spotřeba elektrické energie výrazně roste. Veškeré objekty a domácnosti mají možnost připojení k distribuční síti a pomocí vnitřních rozvodů je možné elektrickou energii využívat bez většího omezení. Výroba a distribuce elektrické energie není zadarmo, a tak je potřeba každému spotřebiteli stanovit výši platby za spotřebovanou elektřinu. Pro stanovení ceny za spotřebovanou energii potřebujeme znát přesně spotřebované množství. Spotřebu objektu načítá fakturační elektroměr, který tvoří článek mezi vnitřním rozvodem a distribuční sítí. [14]

Po dlouhou dobu spotřebu elektrické energie načítaly elektromechanické elektroměry. Mezi nejznámější elektromechanické měřiče spotřeby energie patří elektroměry od firmy Křížík. Tyto elektroměry obsahují mechanické pohyblivé části jako jsou čítače, hřídelky a kotouče. Vývoj se nezastavil ani v odvětví měřicí technologie spotřeby elektrické energie a jelikož byly mechanické částice častou příčinou poruch, byl původní elektromechanický elektroměr nahrazen elektronickým (digitálním) elektroměrem. Výhoda tohoto elektroměru nespočívá pouze v odstranění mechanických částí, ale také dochází k výraznému snížení vlastní spotřeby. Nevýhodou obou výše zmíněných elektroměrů je nutnost manuálního odečtu množství spotřebované elektrické energie. [15]

Pro možnost dálkových odečtů a snížení chyby lidského faktoru při odečtech spotřeby objektů, byl vyvinut inteligentní elektroměr. Tento druh elektroměru primárně zahrnuje bezdrátové komunikační rozhraní, které umožňuje komunikaci jednotlivých elektroměrů s centrálním odběrným místem. Komunikace primárně slouží k dálkovému odečtu a sběru dat, ale je také možné pomocí tohoto komunikačního kanálu například odpojit spotřebitele od distribuční sítě v případě nezaplacených poplatků za dodávku elektrické energie nebo při opravách rozvodné distribuční sítě. Inteligentní měřiče spotřeby elektrické energie umožňují například zobrazení více sledovaných veličin a spotřebitel tak má možnost sledovat aktuální průběh spotřeby na sledovaném objektu. Na základě získaných dat je možné pro přehlednost generovat různé grafy a statistiky. [16]

S inteligentními elektroměry přišel i nový technický termín „Smart Metering“, který obecně označuje měření spotřeby jednotlivých energií pomocí inteligentního měřicího přístroje „Smart Metru“. Tyto přístroje jsou známé právě pro měření spotřeby elektrické energie, ale v dnešní době se nasazují i pro měření ostatních médií jako je spotřeba vody, tepla nebo plynu. [17]

V říjnu roku 2021 došlo v České republice ke schválení novely zákona č. 406/2000 Sb., která mluví o hospodaření s energiemi. V platnost tato novela vzešla 1. ledna 2022 a do roku 2027 by všechny namontovaná měřidla spotřeby elektrické energie měla umožňovat dálkový odečet. S výměnou stávajícího elektroměru v ČR se budou potýkat všichni spotřebitelé, kteří mají spotřebu nad 6 MWh ročně. Do této skupiny patří firmy a domácnosti s vyšší spotřebou. Vyšší spotřebu vykazují především domácnosti využívající elektrickou energii pro vytápění nebo pro ohřev vody. Dále se změna elektroměru dotkne domácností, které mají namontovanou

fotovoltaickou elektrárnu nebo pokud vlastní elektromobil. Výměna standardního elektroměru pro spotřebitele bude zdarma. [18]

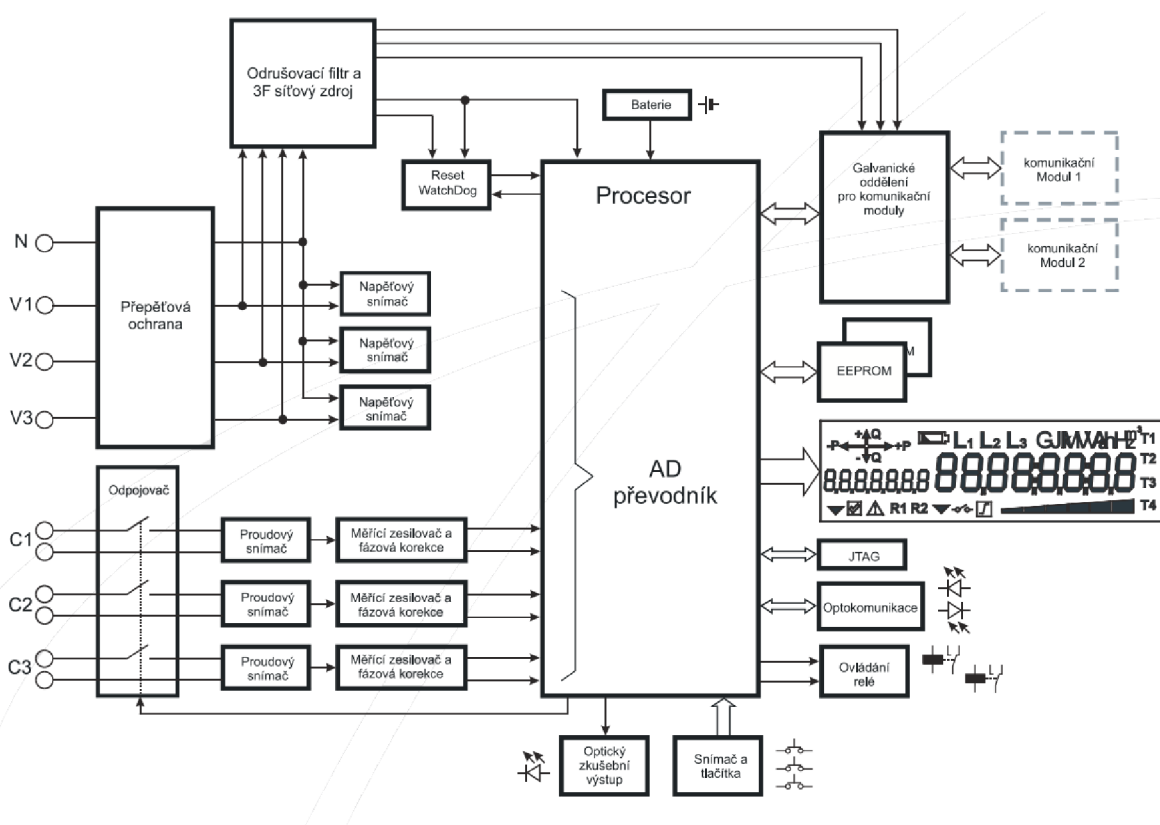
2.8.2 Statické elektroměry elektronické

Rozvoj elektroniky umožnil vývoj nového způsobu měření spotřeby elektrické energie. Nově dostupné elektronické součástky umožnily výměnu indukčních elektroměrů za elektroměry statické. Tyto elektroměry nedisponují žádnou pohyblivou mechanickou součástí a jejich životnost je mnohonásobně vyšší.

Principem měření statických elektroměrů je vzorkování vstupních signálů. Pro měření spotřeby elektrické energie je potřeba vzorkovat vstupní signál napětí a proudu. Snímání proudu řeší precizní proudové transformátory odolné vůči stejnosměrné složce. Elektrické napětí v síti je snímáno pomocí přesných odporových děličů. Výstupní signály z těchto senzorů jsou přes doladující a ochranné obvody směřovány na A/D převodník, kde dochází k jejich vzorkování. Čím větší je frekvence vzorkování vstupních signálů, tím přesnější je měření spotřeby elektrické energie. Při vzorkování signálu dochází k okamžitému zpracování jednotlivých hodnot a výsledkem těchto matematických operací jsou impulzy ve frekvenci odpovídající procházejícímu výkonu. Impulzní charakteristika je definována jako množství impulzů na 1 kWh, která tvoří konstantu elektroměru. Konstanta statického elektroměru je určena výrobcem a pohybuje se v rozmezí 250–40 000 impulzů. Na základě generovaných impulzů dochází k načítání spotřeby elektrické energie, která se zobrazuje na LCD (Liquid-crystal display), který je pomocí datové sběrnice připojen přímo k mikrokontroleru. LCD umožňuje zobrazit, zda elektroměr aktuálně pracuje v nízkém nebo vysokém tarifu. Jednotlivé vygenerované impulzy jsou pro možnost kontroly a kalibrace zobrazovány blikáním pomocí kalibrační LED. Naměřená data o spotřebě elektrické energie jsou ukládána do paměti EEPROM, která si zapsaná data pamatuje i po odpojení napájení. Statické elektroměry disponují impulzním výstupem, který umožňuje k elektroměru připojit vlastní zařízení pro čtení spotřeby elektrické energie a naměřená data odesílat například do lokální počítačové sítě, kde je následně možné data ze statického elektroměru zobrazovat například v PC pomocí webového prohlížeče. Ochrana vnitřních komponent je realizována pomocí přepětíové ochrany. Programování elektroměru a dohled nad běžícím firmwarem je umožněn pomocí konektoru s označením JTAG (Joint Test Action Group). Pomocí tohoto konektoru lze také provést kalibraci měřicího přístroje. Výše uvedený text odpovídá obrázku č. 4, kde je znázorněno blokové schéma statického třífázového elektroměru. [19]

2.8.3 Smart metry

Blízkou budoucností v měření spotřeby elektrické energie jsou Smart Metry. Jedná se v podstatě o statický elektroměr, který disponuje komunikačními moduly umožňující přenášet naměřená data k distributorovi. Dalším typickým znakem Smart Metru je, že distributor má možnost na dálku odpojit výstup elektroměru pomocí odpojovače a zamezit tak spotřebovávání další elektrické energie. Komunikační moduly a odpojovač jsou také zobrazeny na obrázku č. 4. Požadavkem chytrého měření je, aby jednotlivé Smart Metry tvořili pomocí IoT (Internet of Things) síť, umožňující obousměrnou komunikaci s distributorem, který na základě získaných dat bude schopen lépe regulovat výrobu a distribuci elektrické energie. [20] [21]

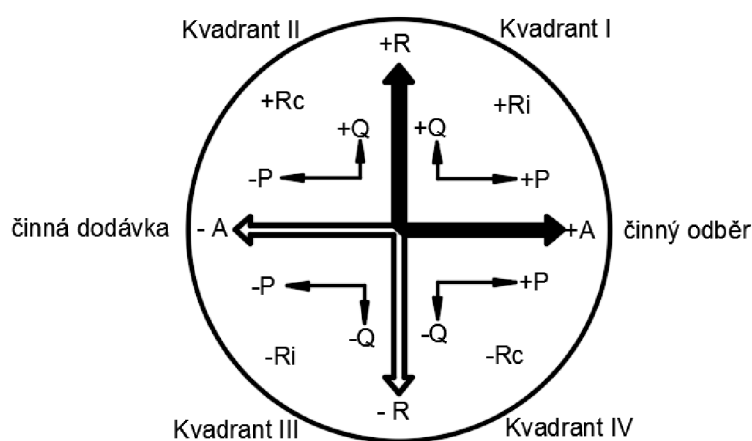


Obrázek 4: Blokové schéma statického elektroměru [22]

2.8.4 Čtyřkvadrantní elektroměry

V případě, že je v místě spotřeby instalována fotovoltaická elektrárna typu „ON-GRID“ umožňující přetoky do distribuční sítě, je zapotřebí změřit množství elektřiny, které FVE do distribuční sítě dodala. Standardní statický elektroměr by přetok zaznamenal jako spotřebu, která by byla načítována koncovému spotřebiteli. Pro měření přetoků se používají

čtyřkvadrantní elektroměry, které jsou schopné rozeznat směr toku proudu na jehož základě zaznamenávají množství spotřeby nebo dodávky elektrické energie. Tyto elektroměry disponují registry energie a výkonu, do kterých si ukládají potřebné hodnoty pro výpočet všech potřebných veličin. Jednotlivým hodnotám v registru je přiřazen OBIS kód (jednoznačné označení registrů v paměti elektroměru), který je možné v případě potřeby zpětně editovat. Čtyřkvadrantní elektroměr pro popis měřených veličin potřebuje nejméně 6 registrů pro měření energií a dalších 6 registrů potřebuje pro uložení maximálních výkonů. Jednotlivé elektrické energie, které čtyřkvadrantní elektroměr načítá jsou znázorněny na obrázku č. 5 a jejich význam je pro přehlednost popsán v tabulce č. 3. [21] [23]



Obrázek 5: Toky energií ve čtyřkvadrantním elektroměru [23]

Tabulka 3: Registry, čtyřkvadrantního elektroměru

	symbol	jednotka	název
1	+A	[kW/h]	činná složka elektrické energie odebraná ze sítě
2	-A	[kW/h]	činná složka elektrické energie dodaná do sítě
3	+Ri	[kVAr]	jalová složka elektrické energie indukčního charakteru odebraná ze sítě
4	-Rc	[kVAr]	jalová složka elektrické energie kapacitního charakteru dodaná do sítě
5	-Ri	[kVAr]	jalová složka elektrické energie indukčního charakteru dodaná do sítě
6	+Rc	[kVAr]	jalová složka elektrické energie kapacitního charakteru odebraná ze sítě

2.9 Způsoby měření elektrických veličin

Pro splnění stanovených cílů disertační práce je nutné pochopit způsoby měření a načítání vstupních elektrických veličin. Pro vývoj wattrouteru je potřeba mikropočítačem přesně načítat

nezkreslenou, fázově neposunutou okamžitou hodnotu síťového napětí a proudu na rozhraní domácnosti s dodržением základní bezpečnosti, kterou zajistí galvanické oddělení. Na základě poznatků z následujících kapitol je možné vhodně zvolit metodu měření jednotlivých veličin.

2.9.1 Měření proudu v domovním rozvodu.

Následující podkapitoly popisují způsoby měření proudu použitelné v domovních rozvodech. Podkapitoly měření proudu vysvětlují pouze ty metody měření, které z podstaty věci umožňují galvanické oddělení. Ostatní metody jsou z důvodu bezpečnosti vynechány.

2.9.2 Proudový transformátor

Pro měření střídavého proudu je možné použít proudový transformátor. Proudový transformátor umožňuje měřit proud protékající vodičem, aniž by muselo dojít k přerušení obvodu. Princip uvedeného senzoru je založen na transformaci proudu z primárního do sekundárního vinutí dle vztahu 1.

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_1}{N_2}$$

(1)

Proudový transformátor tvoří toroidní magnetické jádro, skrz které je provlečen vodič, kterým protéká měřený proud. Tento vodič vytváří jeden závit primárního vinutí N_1 . Na jádře proudového transformátoru je navinuto sekundární vinutí o počtu závitů N_2 , do kterého je proudem primárního vinutí I_p indukován proud I_s . Velikost proudu I_s v sekundárním vinutí N_2 je odvozena ze základního vztahu takto:

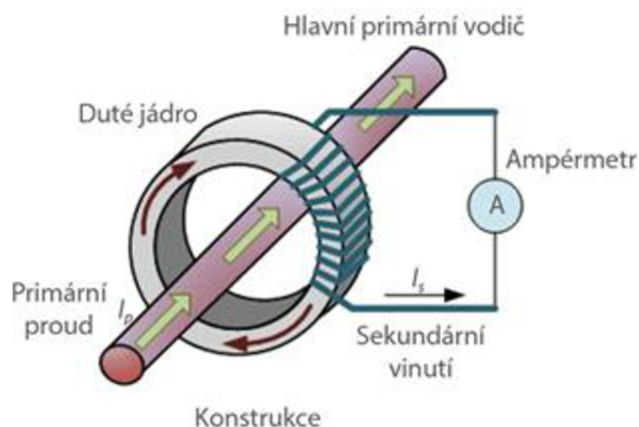
$$I_s = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_p$$

(2)

Zvýšení citlivosti proudového transformátoru je možné vytvořením více závitů primárního vodiče okolo toroidní magnetické cívky. [24]

Do série se sekundárním vinutím se zapojuje přesný měřicí rezistor doporučené hodnoty, na kterém je možné měřit úbytek napětí odpovídající procházejícímu proudu. Tento úbytek napětí je možné pomocí A/D převodníku navzorkovat a získaný signál zpracovat pomocí mikrokontroleru. Jelikož se jedná o bezkontaktní metodu měření zaručující galvanické oddělení

primární a sekundární části je dodržena bezpečnost i ochrana ostatních komponent měřicí aparatury. Výše zmíněný princip proudového transformátoru popisuje obrázek č. 6. [24] [25]



Obrázek 6: Princip proudového transformátoru [24]

2.9.3 Rogowského cívka

Princip Rogowského cívky je podobný principu proudového transformátoru, umožňuje tedy bezkontaktně měřit střídavý proud procházející obvodem. Vodič, kterým protéká měřený proud prochází cívkou, která je toroidně navinuta na vzduchovém jádře. V Rogowského cívce se na základě změny proudu, který protéká měřeným vodičem, indukuje napětí. Indukované napětí je způsobeno střídavým magnetickým polem, které vytváří střídavý proud okolo vodiče, který prochází Rogowského cívkou. Velikost indukovaného napětí v Rogowského cívce je dána vztahem:

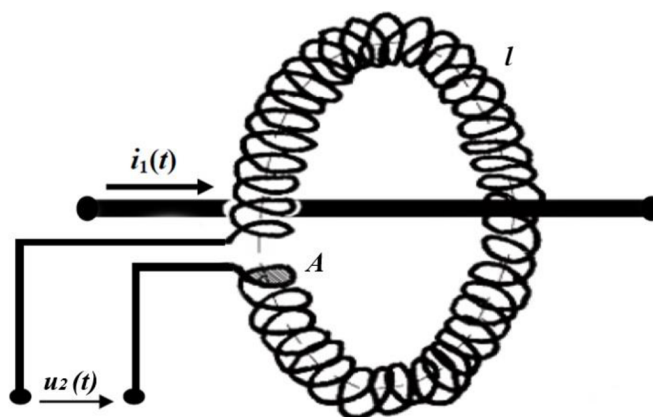
$$u_2(t) = M \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

kde u_2 udává okamžitou hodnotu výstupního napětí, i je okamžitá hodnota primárního proudu, t je čas a M představuje vzájemnou induktivní vazbu mezi vodičem, kterým protéká měřený proud a Rogowského cívkou. Vzájemnou induktivní vazbu M lze vyjádřit vztahem:

$$M = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot A}{l} \quad (4)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, N udává počet závitů Rogowského cívky, A představuje průřez cívky a l je délka střední siločáry na poloměru cívky. [26] [27] [28]

Rogowského cívka umožňuje měřit proudy v rozsahu od jednotek až po stovky ampér. Chybějící magnetické jádro umožňuje sensor střídavého proudu vyrobit malý, lehký a v jednom místě rozpojitelný. Výhodou tohoto senzoru je, že nemůže dojít k přesycení jádra. Konstrukce senzoru je vhodná pro použití v přenosných měřicích přístrojích. Uvedený princip Rogowského cívky je zobrazen na obrázku č. 7. [26] [27] [28]



Obrázek 7: Princip Rogowského cívky [29]

Rogowského cívka jako sensor střídavého proudu disponuje vysokou linearitou. Chyby do měření významně vnáší teplota, kterou je nutno korigovat. Korekce chyb měření vzniklé na základě změny teploty senzoru je možné korigovat tak, že je kontinuálně měřena teplota a následně dochází ke korekci naměřených hodnot na základě teplotní závislosti. Dále je přesnost Rogowského cívky závislá na okolním magnetickém poli a celkové délce vodiče. Tyto chyby je možné kompenzovat vhodným umístěním, popřípadě vhodnou konstrukcí senzoru. [26] [27]

2.9.4 Hallova sonda

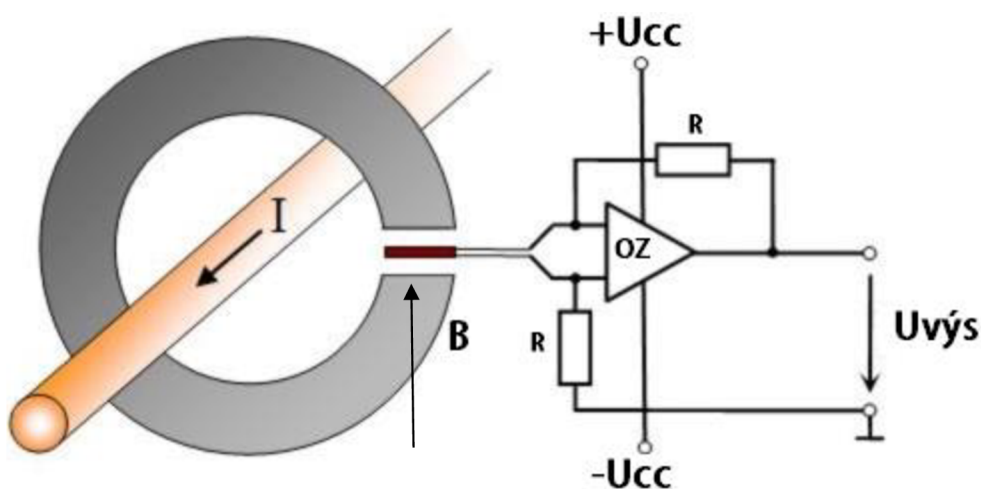
Střídavý proud na rozhraní distribuční sítě a domovního rozvodu je možné měřit i pomocí Hallovy sondy. Princip Hallovy sondy je založen na Hallově jevu. Sensor je tvořen úzkou polovodičovou destičkou nejčastěji z polykrystalického křemíku. Pokud je Hallův sensor vložen do magnetického pole, dochází k zakřivení dráhy náboje, a tedy přeskupování náboje k jedné straně senzoru. Tím vzniká Hallovo napětí, které je přímo úměrné velikosti protékajícího proudu.

Zakřivení dráhy nábojů je způsobeno Lorenzovou silou, která je definována vztahem:

$$F_{LOR} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

kde Q definuje velikost náboje, v je rychlost náboje a B udává velikost magnetické indukce.

Základní princip senzoru je schematicky znázorněn na obrázku č. 9. Senzor proudu založený na principu Hallova jevu reaguje na magnetické pole indukované proudem ve vodiči. Magnetický tok Hallovou sondou způsobuje Hallovo napětí na jejím výstupu, které je přímo úměrné měřenému proudu protékající vodičem. [30] [31]



Obrázek 8: Princip Hallova senzoru [32]

2.10 Měření napětí v domovním rozvodu

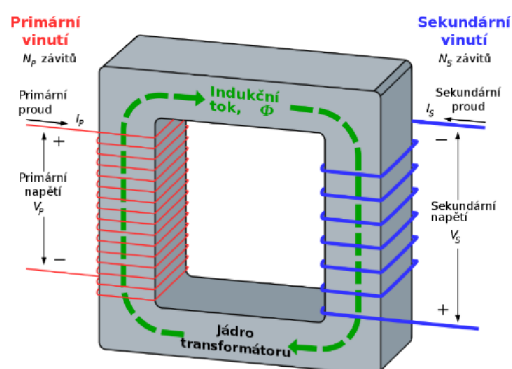
Měření napětí v domovním rozvodu je možné realizovat několika způsoby. Zásadní podmínkou je bezpečnost, kterou zaručí galvanické oddělení od sítě. Měření napětí bude provádět mikrokontroler pomocí A/D převodníku. Tímto je celá problematika měření síťového napětí v domovním rozvodu redukována na výběr vhodného způsobu galvanického oddělení nízkonapěťové části od malého napětí a návrhu vhodného odporového děliče, který upraví výstupní signál tak, aby mohl být načten pomocí A/D převodníku integrovaného v mikrokontroleru. Problematikou měření síťového napětí s galvanickým oddělením pomocí mikrokontroleru se zabývá další část této práce.

2.10.1 Měření napětí pomocí jednofázového transformátoru

Jednou z možností, jak měřit střídavé napětí pomocí mikrokontroleru je použít napěťový transformátor. Pomocí elektro-magnetické indukce se jádrem transformátoru přenáší energie z primárního do sekundárního vinutí, kde se indukuje střídavé napětí. Hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru je odvozena ze vztahu:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (6)$$

kde U_1 je napětí na primárním vinutí, U_2 je napětí na sekundárním vinutí a konstanta k je dána poměrem počtu závitů sekundárního N_2 a primárního N_1 vinutí transformátoru. I_1 označuje proud primárním vinutím a I_2 proud sekundárním vinutím. Z principu funkce transformátoru je výstupní signál galvanicky oddělen od nízkonapěťové části. Transformátor zároveň poskytuje na výstupu nižší napětí, jehož rozsah dokáže zpracovat A/D převodník mikrokontroleru přímo nebo je možné toto napětí jednoduše dále snížit pomocí odporového děliče. Většina A/D převodníků integrovaných v mikrokontrolerech je schopna měřit jen kladná napětí. Pomocí externího zdroje napětí je nutné posunout výstupní signál transformátoru obsahující kladné a záporné půlvlny plně do kladných hodnot. A to z důvodu, aby A/D převodník mikrokontroleru dokázal načíst hodnoty obou půlvln výstupního signálu. Princip transformátoru je zobrazen na obrázku č. 9. [33]



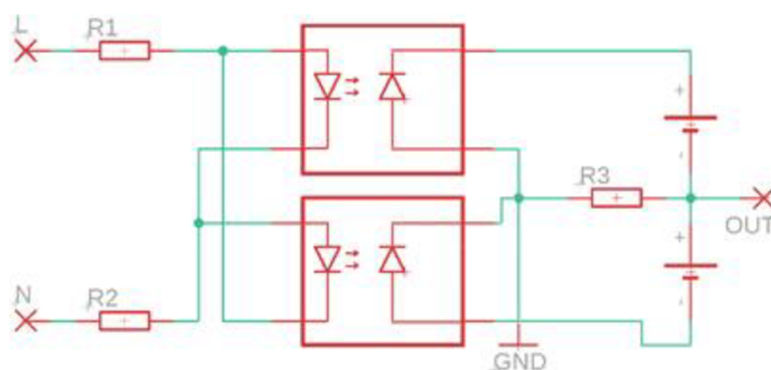
Obrázek 9: Princip transformátoru [34]

2.10.2 Měření napětí pomocí opticko-elektrické metody

Princip této metody je založen na převedení napěťového signálu na světlo pomocí vhodného světelného zdroje. Takto upravený signál je optickou cestou převeden do části s malým

napětím, kde dochází k dopadu světla na odpovídající senzor, který signál převede zpět na elektrický.

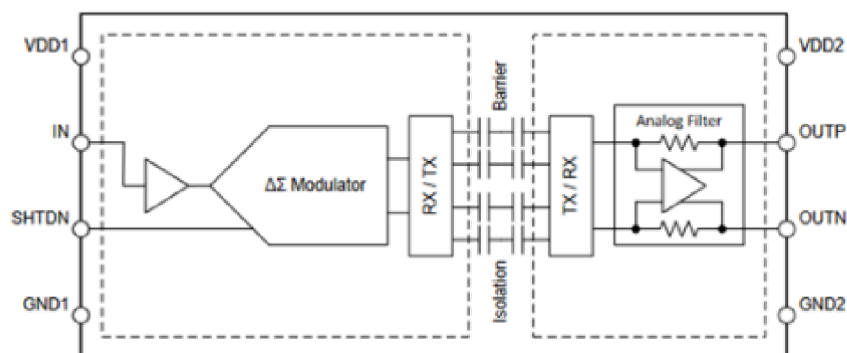
K přenosu analogového signálu je možné použít optočlen s LED a fotodiodou nebo fototranzistorem. Načtení celého průběhu střídavého napětíového signálu zaručují dvě LED zapojené antiparalelně, první LED obslouží kladnou půlvlnu a druhá LED zápornou půlvlnu. Výstupní napětí je následně upraveno tak, aby bylo možné načíst kompletní výstupní signál pomocí mikrokontroleru. Galvanické oddělení je zaručeno právě pomocí přenosu signálu optickou cestou. Princip opticko-elektrické metody je znázorněn na obrázku č. 10. [35] [36]



Obrázek 10: Princip opticko-elektrické metody [zdroj: autor]

2.10.3 Měření napětí pomocí izolovaného zesilovače s kapacitní vazbou

Princip měření síťového napětí pomocí izolačního zesilovače je založen na A/D a D/A převodníku, který je integrován přímo do obvodu izolačního zesilovače. Napětíový analogový signál je pomocí vstupního odporového děliče upraven tak, aby mohl být zpracován integrovaným A/D převodníkem izolačního zesilovače. Pro načtení celého průběhu napětí v síti je potřeba výstupní střídavý signál z odporového děliče posunout do kladných hodnot. Zpracovaný signál je v digitální podobě vyslán přes izolační kapacitní bariéru do části obvodu s malým napětím, kde je signál převeden zpět na analogový pomocí integrovaného D/A převodníku. Kapacitní bariéra izolačního zesilovače zaručuje blokadu stejnosměrného napětí a nízkofrekvenčních signálů. Vyšší frekvence, které kondenzátory v kapacitní izolační bariéře propouštějí zaručují přenos informace z nízkonapětíové do části obvodu s malým napětím. Základní princip izolačního zesilovače je zobrazen na obrázku č. 11. [37] [38] [39]



Obrázek 11: Princip izolačního zesilovače [40]

2.11 Vyšší harmonické

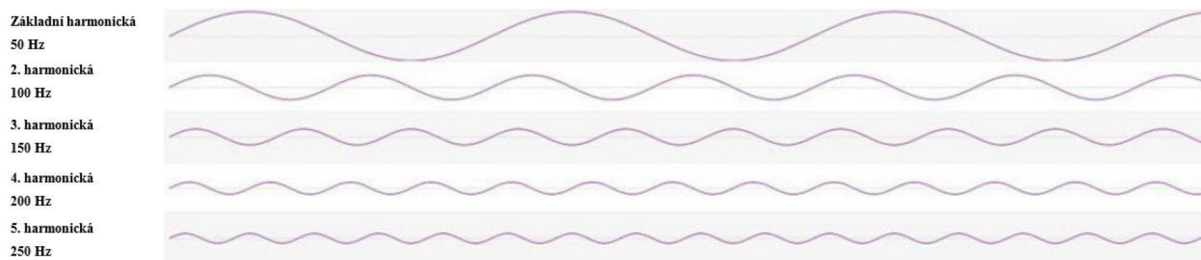
Za základní harmonickou složku síťového napětí je považována harmonická vlna o frekvenci 50 Hz. Další harmonické složky, které jsou tvořeny celočíselnými násobky této základní harmonické se nazývají vyšší harmonické neboli harmonické „n-tého“ řádu. Pro základní frekvenci 50 Hz bude 2. harmonická frekvence 100 Hz, 3. harmonická 150 Hz a tak dále. Vyšší harmonické jsou znázorněny na obrázku č. 12. Každá z těchto složek způsobuje zkreslení původního harmonického průběhu napětí. Velikost zkreslení základního harmonického průběhu napětí vlivem vyšších harmonických složek lze vyjádřit pomocí veličiny THD_u (Total Harmonic Distortion in voltage). [41]

Pro výpočet THD_u je potřeba znát velikost amplitud základních a vyšších harmonických složek analyzovaného signálu. Pro dostatečnou přesnost výsledné hodnoty THD_u pro napěťový signál je nutné použít amplitudy prvních 40 harmonických složek. Matematicky je THD_u v procentech vyjádřeno vztahem: [42]

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U_1} \cdot 100 [\%]$$

(7)

kde U_k představuje k tou harmonickou složku analyzovaného signálu.

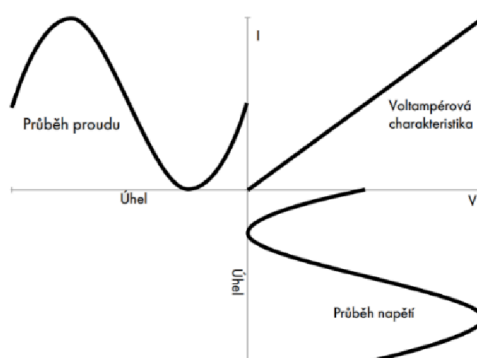


Obrázek 12: Vysší harmonické v distribuční síti [41]

Do distribuční sítě je dodáván téměř dokonalý sinusový průběh napětí. Tvar proudového signálu je určován připojenou zátěží. Zátěž může být lineární a nelineární.

2.12 Účinky lineární zátěže na distribuční síť

Lineární zátěž z distribuční sítě při harmonickém průběhu napětí odebírá proud sinusového tvaru a to tak, že proud odebíraný spotřebičem je v každém okamžiku přímo úměrný použitému napětí. Takovéto spotřebiče negenerují vyšší harmonické proudy do distribuční sítě a nedochází tak ke zkreslení původního sinusového průběhu proudu. Při použití kapacitní nebo indukční zátěže dochází pouze k posuvu fáze mezi napětím a proudem. Fázový posun mezi napětím a proudem ovlivňuje pouze účinník. Tento fakt potvrzuje Fourierova rychlá transformace, která v tomto případě zobrazí pouze základní harmonickou. Lineární zátěž definuje VA-charakteristika zobrazena na obrázku č. 13. Spolu s VA-charakteristikou je na obrázku znázorněn časový průběh proudu a napětí. [41] [43]

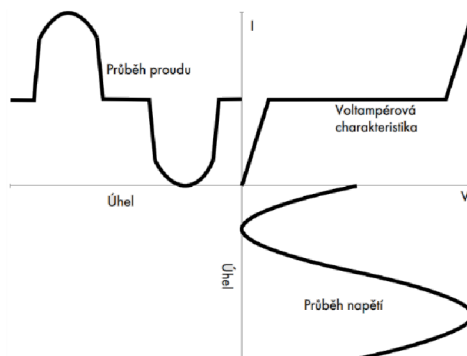


Obrázek 13: Lineární zátěž (VA-charakteristika) [43]

2.13 Účinky nelineární zátěže na distribuční síť

Nelineární zátěž odebírá proud nesinusového tvaru. Typická VA-charakteristika nelineární zátěže se znázorněnými průběhy napětí a proudu je zobrazena na obrázku č. 14. Tuto zátěž tvoří nejčastěji spínané zdroje. Obrázek č. 14 znázorňuje zátěž tvořenou můstkovým usměrňovačem

s vyhlazovacím kondenzátorem, kdy proud prochází pouze v okamžiku, kdy napájecí napětí přesáhne napětí na kondenzátoru. [41] [43]



Obrázek 14: Nelineární zátěž (VA-charakteristika) [43]

2.14 Následky vyšších harmonických v distribuční síti

V dnešní době je běžné v distribuční síti provozovat zařízení s nelineárním odběrem. Následkem provozu těchto zařízení a jejich nelineárním proudovým odběrem se distribuční síť šíří vyšší harmonické. Tím dochází v distribuční síti k několika známým problémům. [43]

2.14.1 Rušení působící na elektrické ochranné prvky

Dle normy ČSN 33 2000-4-41 ED.3 je nařazeno na každý zásuvkový okruh instalovat proudový chránič. Funkce proudového chrániče je hlídat vyrovnanost odtékajícího a přitékajícího proudu v uzavřeném obvodu, není-li tato podmínka dosažena, dochází k rozepnutí proudového chrániče. Vyšší harmonické proudy mohou způsobit nežádoucí výpadek proudového chrániče. Tento výpadek nastává nejčastěji na zásuvkových okruzích, kde jsou provozovány spotřebiče se vstupními kapacitními filtry. Vstupním kapacitním filtrem je docíleno, že daný spotřebič má částečný svod proti zemi. Vyšší harmonické proudy mohou přes tento kapacitní filtr zčásti protéct a způsobit tak rozepnutí proudového chrániče. [43]

2.14.2 Skinefekt

Jedním z dalších problémů je Skin efekt, při kterém dochází k vytlačování střídavého proudu z jádra vodiče na jeho povrch, čím dochází k výraznému snížení využitelného průřezu vodiče. Výraznější projevy Skinefektu nastávají při vyšších frekvencích, tedy i v elektrickém vedení kterým protékají vyšší harmonické proudy. Při navrhování přívodních vodičů ke spotřebiči je třeba zvážit dopady Skinefektu a dané vodiče dostatečně dimenzovat. [41] [43]

2.14.3 Přehřívání transformátorů

Životnost transformátorů je z velké míry ovlivněna jejich provozní teplotou. Do značné míry mají na provozní teplotu transformátoru vliv vířivé proudy, které způsobují část teplotních ztrát. Průchodem vyšších harmonických proudů rostou vířivé proudy v transformátoru, a to s kvadrátem řádu harmonických. Úměrně s velikostí vířivých proudů roste provozní teplota a zkracuje se tak životní cyklus transformátoru. [41] [43]

2.14.4 Ovlivnění funkčnosti kompenzačních kondenzátorů

Důležitými parametry u kompenzačních kondenzátorů, které je nutné sledovat jsou proud, napětí a teplota. Tyto parametry jsou ze svých standardních hodnot vychýleny například výskytem vyšších harmonických. Vyšší harmonické proudy snižují reaktanci kondenzátorů a tím dochází k jejich nadměrnému zatěžování. Na kompenzačním kondenzátoru roste napětí, proud i teplota. V případě špatně zvolené hodnoty kompenzačního kondenzátoru může dojít k jeho trvalému poškození. [43]

2.14.5 Zkreslení harmonického průběhu napětí distribuční sítě

Vyšší harmonické proudy v distribuční soustavě generují úbytky napětí na impedanci sítě, tím dochází ke zkreslení harmonického průběhu napětí. Míra zkreslení signálu síťového napětí se odvíjí od velikosti impedance sítě a výkonu připojených spotřebičů. Výskyt vyšších harmonických napětí v distribuční soustavě může ovlivňovat funkčnost a spolehlivost ostatních spotřebičů. [44]

2.15 Meziharmonické kmitočty

Meziharmonické kmitočty jsou definovány jako neceločíselné násobky základního harmonického kmitočtu. Meziharmonické kmitočty tzv. meziharmonické přispívají ke zkreslení harmonického průběhu napětí a jejich periodičita neodpovídá základní nosné frekvenci 50 Hz. Výskyt meziharmonických v distribuční soustavě je možné zjistit pomocí diskrétní nebo rychlé Fourierovi transformace. Meziharmonické kmitočty jsou nežádoucí složkou v síti a je nutné jejich výskyt minimalizovat. Primárním důvodem k minimalizaci je riziko vzniku flikru a rušení HDO (Hromadné dálkové ovládání). Meziharmonické v distribuční soustavě vznikají jako postranní pásma úměrně se zatížením sítě nebo jsou do sítě generovány spínači, které mají jinou frekvenci spínání, než je frekvence sítě. [45]

3 Vědecké hypotézy a cíle práce

Vědecká hypotéza této disertační práce je stanovena takto:

Nově navržený wattrouter by měl odstranit dva předpokládané zásadní nedostatky stávajících komerčních wattrouterů spínajících vyhrazenou zátěž po periodách: a) cílené využívání přetoků energie do sítě, b) generování nežádoucích frekvenčních složek proudu. Wattroutery jsou typicky nasazovány v případě, že daná spotřebitelská jednotka s vlastní FVE nemá smlouvu o odběru výroby FVE s dodavatelem elektrické energie a jakákoliv forma přetoku, byť elektroměrem nedetekovaná je tudíž nepřípustná. Hypotézou je, že spínání po periodách, kdy se na rozhraní sítě a spotřebitelské jednotky střídají periody odběru a dodávky vede ke generování množství frekvenčních složek proudu, které by v případě většího nasazení standardního typu wattrouteru mohlo vést k zásadnímu zhoršení parametrů sítě.

Cílem této disertační práce je návrh a realizace regulačního prvku (wattrouteru), který bude možné připojit do fotovoltaického systému. Navržený wattrouter bude sloužit jako prvek, který vhodným řízením spotřeby vyhrazeného spotřebiče zamezí přetoku nadbytečné elektrické energie z fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě. Inovace principu wattrouteru je založena na zamezení fyzického přetoku elektrické energie vyrobené z fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě. Dále bude wattrouter pracovat tak, aby byly minimalizovány zpětné vlivy na distribuční síť.

Wattrouter bude potřeba vybavit potřebným softwarem, který bude zajišťovat veškerou funkčnost celého zařízení. Vytvořené zařízení bude postaveno na mikroprocesoru od společnosti Atmel. Konkrétně bude využit 8bitový mikrokontroler ATmega328p, který disponuje 10bitovým A/D (analogově/digitálním) převodníkem. Pomocí A/D převodníku budou načítány vstupní signály napětí a proudu. Mikroprocesor disponuje také výstupními piny, pomocí kterých budou ovládány výkonové prvky spínající vyhrazený spotřebič. Potřebný software bude naprogramován a zkompilován pomocí vývojového nástroje Visual Studio Code.

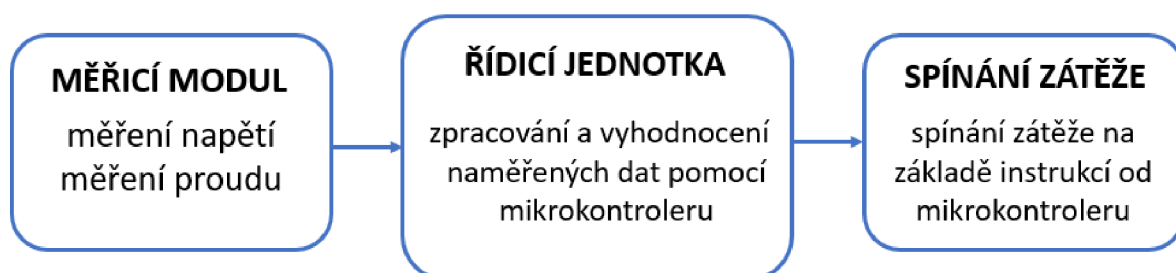
Dílčím cílem této disertační práce je porovnat bezpečné metody načítání vstupních hodnot napětí a proudu a zohlednit jejich přesnost s ohledem na celkovou složitost a funkčnost výsledného zařízení.

4 Materiály a metody

Tato kapitola se věnuje popisu výzkumu doktoranda dosaženého během studia. V rámci kapitoly „Materiály a metody“ je analyzován princip fungování komerčního wattrouteru a jeho vlivy na distribuční síť. Popsány jsou zde také metody načítání síťového napětí a proudu pro zpracování výstupního signálu mikrokontrolerem. Získané hodnoty proudu a napětí slouží jako vstupní parametry pro následující celkové řízení vyvíjeného wattrouteru, které mají vliv na jeho celkovou přesnost. Kapitola dále detailně rozebírá jednotlivé části inovativního wattrouteru i jeho softwarové řešení. Poslední část kapitoly „Materiály a metody“ se věnuje PWM modulaci síťového napětí a filtraci nežádoucích rušivých vlivů, které by ovlivňovaly distribuční síť.

4.1 Popis funkce typického komerčního wattrouteru

Základní části wattrouteru jsou zobrazeny v blokovém schématu na obrázku č. 15.



Obrázek 15: Blokové schéma wattrouteru [zdroj: autor]

Wattrouter sleduje aktuální výkon přenášené energie na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace měřením napětí a proudu. O tuto část se stará měřicí modul. Naměřené hodnoty řídicí jednotka zpracovává a pomocí matematického výpočtu detekuje velikost činného výkonu a směr toku elektrické energie. Výstup z měřicího modulu je připojen k řídicí jednotce pomocí A/D převodníku. V případě, že řídicí jednotka vyhodnotí, že FVE vyrábí více elektrické energie, než je aktuálně v místě instalace FVE spotřebováváno, začne vhodně spínat vyhrazený spotřebič. Spínací prvky zátěže (elektronická nebo mechanická relé) jsou ovládány pomocí výstupních pinů řídicí jednotky. [46]

Funkce řízení spotřeby nadbytečné elektrické energie vyrobené z fotovoltaické elektrárny je ověřena pomocí měření v reálném provozu na wattrouteru GreenBono AKU od společnosti Yorix s.r.o., který je zobrazen na obrázku č. 16.



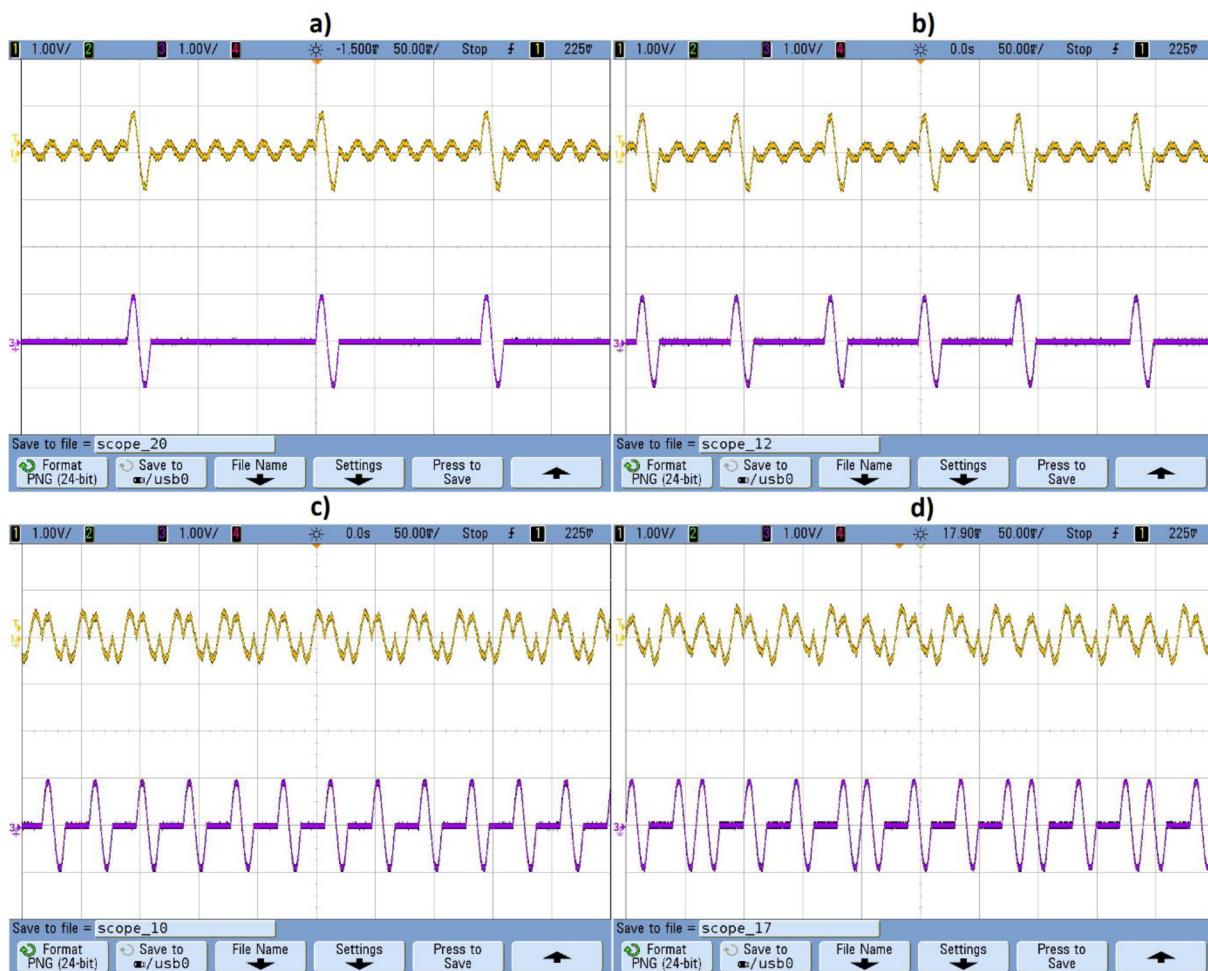
Obrázek 16: GreenBono AKU [zdroj: autor]

Zařízení bylo zapojeno v silovém rozvaděči laboratoře katedry Fyziky. Zdrojem energie byly fotovoltaické panely o špičkovém příkonu 775 Wp umístěné na terase Technické fakulty České zemědělské univerzity s měničem SMA SB 1100LV. Pro simulaci laboratorní zátěže byl využit elektrický přímotop řízený wattrouterem prostřednictvím SSR relé, které zaručuje sepnutí spotřebiče v okamžiku, kdy napětí prochází nulou. Fázový vodič, který slouží pro přivedení proudu a napětí do laboratorní zátěže je provlečen skrze proudový transformátor, který je integrován přímo na DPS wattrouteru GreenBono AKU. Tento fázový vodič je zakončen v elektrické zásuvce KMFS-16A, kterou je možné umístit na DIN lištu. Zásuvka, která slouží pro připojení laboratorní zátěže je jištěna jističem Noark B10. Wattrouter GreenBono AKU komunikuje s PC pomocí sériové komunikace RS485. Komunikační kabel RS485 je vyveden mimo silový rozvaděč tak, aby bylo možné připojit PC bez nutnosti zásahu do elektrického rozvaděče. Obrázek č. 18 zobrazuje reálnou implementaci wattrouteru GreenBono AKU do silového rozvaděče v laboratoři katedry fyziky.



Obrázek 17: Implementace wattrouteru GreenBono AKU do silového rozvaděče [zdroj: autor]

Princip fungování wattrouteru GreenBono AKU je ověřen pomocí osciloskopu a proudové sondy připojené na stejný vodič, který prochází proudovou sondou integrovanou v komerčním wattrouteru a pomocí sondy na vodiči k vyhrazenému spotřebiči. Typické průběhy proudu na přívodu do rozvaděče a do spotřebiče jsou zobrazeny na obrázku č. 18, kde obrázky a) – d) ukazují situace pro různě velký dostupný výkon z FVE.



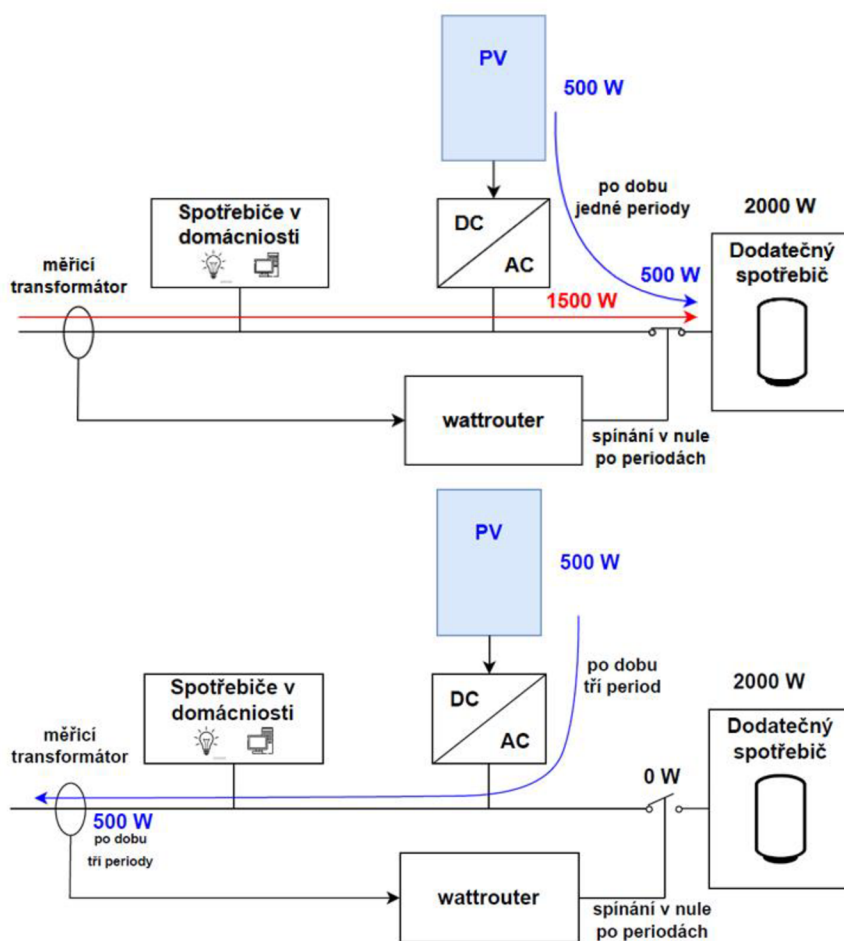
Obrázek 18: Reálná funkce wattrouteru – proud na rozhraní distribuční sítě a domovního rozvodu [zdroj: autor]

Žlutý signál představuje proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace. Fialový signál znázorňuje proud do vyhrazeného spotřebiče. Zvýšené amplitudy proudu na rozhraní sítě a domácnosti v obrázcích 18 a) a 18 b) představují spotřebu elektrické energie do vyhrazeného spotřebiče, zbylé periody přetékají do sítě.

Průběhy proudů pak odhalují princip fungování wattrouteru. Je vidět, že je spotřebič sepnut po dobu jedné či více period, kdy odebírá dostupný výkon z FVE a zbytek potřebného výkonu dodá distribuční síť. Poté je spotřebič vypnut a v následujících periodách je energie odebrána

z distribuční sítě v předchozí periodě vrácena do distribuční sítě pomocí FVE. Takto je wattrouterem a jeho správnou volbou poměru period sepnutí a period přetoků udržována bilance toků energií fakturačním elektroměrem v rámci jeho integrační doby na nule.

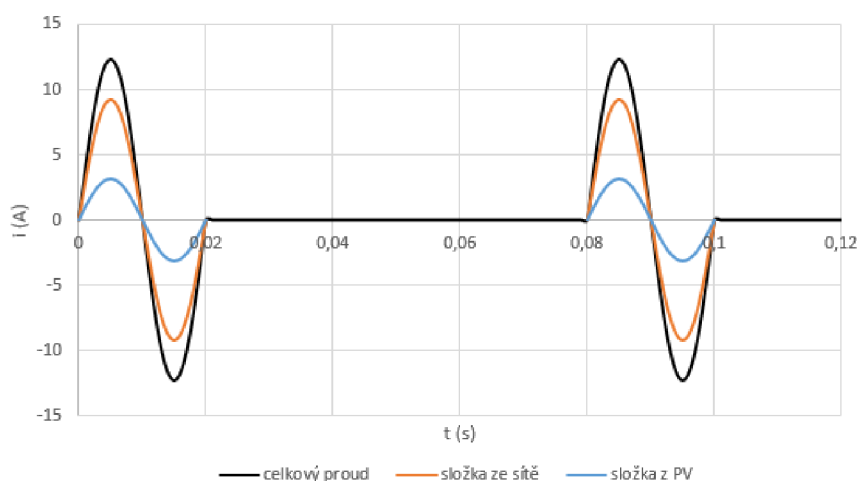
Pro snazší pochopení principu funkce wattrouteru a vysvětlení naměřených grafů na obrázku č. 18 slouží obrázek č. 19 zobrazující toky energií v domovní elektroinstalaci v době, kdy fotovoltaická elektrárna generuje nadvýrobu např. 500 W. Dodatečný spotřebič o příkonu 2000 W při napájení 230 V wattrouter sepne na dobu jedné periody, kdy z fotovoltaické elektrárny čerpá 500 W, zbylých potřebných 1500 W je do dodatečného spotřebiče přivedeno z distribuční sítě. Tento proces je schematicky znázorněn v horní části obrázku č. 19. Proud procházející dodatečným spotřebičem a jeho složky jsou znázorněny na obrázku č. 20. Poté je spotřebič vypnut a po dobu tří period je energie odebrána ze sítě při sepnutí spotřebiče vrácena do sítě zpět. Dochází tedy k přetoku, kdy FVE po dobu tří period dodává do sítě výkon 500 W, jak je zobrazeno na obrázku č. 19 dole. Díky střídání period sepnutí spotřebiče a přetokových period udržuje wattrouter celkovou energetickou bilanci fakturačním elektroměrem na nule.



Obrázek 19: Toky energií v domovní elektroinstalaci [zdroj: autor]

Komerční wattrouter zamezí fakturačnímu elektroměru detekci spotřeby elektrické energie z distribuční sítě, která nastala v době, kdy byl sepnut dodatečný spotřebič tak, že vypne spotřebič po zbytek integrační doby a vrátí odebraný výkon zpět do distribuční sítě pomocí FVE. V tomto případě dochází k přetoku tří period o výkonu 500 W zpět do distribuční sítě. Tento princip funguje vždy tak, aby bilance toků energií fakturačním elektroměrem v rámci jeho integrační doby byla na nule. Proces vracení energie do distribuční sítě je schematicky znázorněn v dolní části obrázku č. 19. Složky proudu, které tečou rozhraním distribuční sítě a domovní elektroinstalace znázorňuje obrázek č. 21.

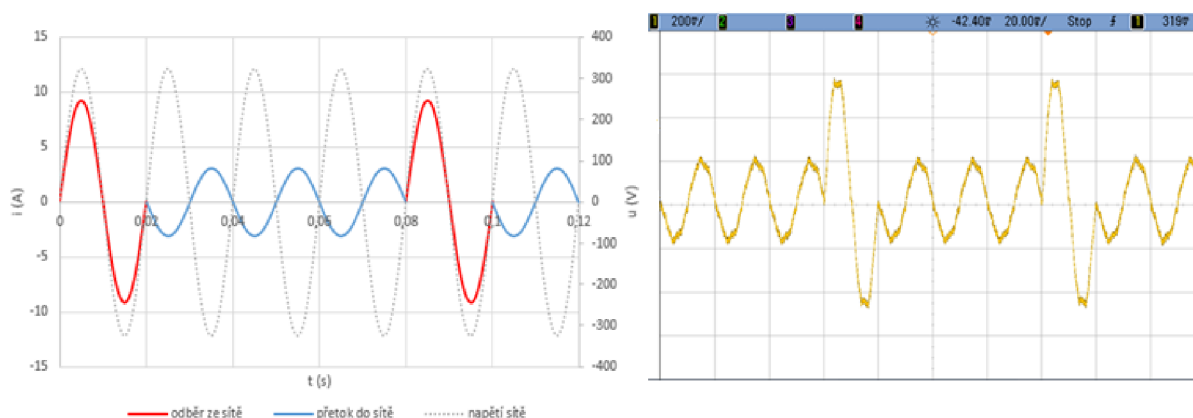
Graf na obrázku č. 20 ilustruje proud tekoucí dodatečným spotřebičem pro uvedený příklad. Dodatečný spotřebič je sepnut po dobu jedné periody. Graf znázorňuje černou křivkou celkový odebraný proud, modře je poté zobrazena část proudu, která je odebrána z FVE a oranžově je vyznačen proud, který spotřebič odebral z distribuční sítě.



Obrázek 20: Odběr proudu dodatečným spotřebičem o příkonu 2000 W při nadvýrobě FVE 500 W [zdroj: autor]

Graf na obrázku č. 21 vlevo ilustruje proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace pro uvedený příklad. Tečkovanou čarou je vyznačeno napětí v síti. Červená část křivky znázorňuje proud odebraný při sepnutí vyhrazeného spotřebiče po dobu jedné periody (proud je ve fázi se síťovým napětím), modrá část křivky pak proud, který je vracen do sítě v době, kdy je dodatečný spotřebič vypnut (proud je v protifázi se síťovým napětím). V tomto případě je z distribuční sítě odebráno 1500 W, následně je dodatečný spotřebič vypnut a energie vyrobená pomocí FVE o výkonu 500 W po dobu 3 period přetéká do distribuční sítě.

Následně se celý proces opakuje za předpokladu, že se nadvýroba z FVE nezměnila. Obrázek č. 21 vpravo představuje výše popsanou situaci v reálném provozu.



Obrázek 21: Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace (modelová a reálná situace) [zdroj: autor]

Jak vyplývá z odstavců uvedených výše, princip je založen na střídání odběrů elektrické energie z distribuční sítě a následnému vracení elektrické energie zpět do sítě pomocí FVE, a to po periodách. Přetoky elektrické energie do sítě jsou tedy nedílnou součástí principu fungování stávajících wattrouterů využívající dlouhé integrační doby elektroměru, která neumožňuje tyto přetoky detekovat. Způsob spínání po periodách vede navíc k zatížení sítě množstvím nežádoucích spektrálních složek proudového průběhu. Tato problematika je popsána v kapitole „4.2 Meziharmonické kmitočty generované wattrouterem“.

4.2 Meziharmonické kmitočty generované wattrouterem

Na základě znalosti principu fungování stávajících wattrouterů byla provedena frekvenční analýza průběhu proudu za účelem zjištění, jakými frekvenčními složkami proudu je ovlivněna distribuční síť při používání tohoto zařízení. Nejprve byla provedena analýza na namodelovaných charakteristických průbězích proudu. Poté bylo provedeno měření v reálném provozu s nasazeným wattrouterem a pomocí osciloskopu a využitím funkce FFT (rychlé Fourierovy transformace) byla provedena analýza reálného průběhu signálu.

4.2.1 Matematická analýza frekvenčního spektra

Pomocí počítačového softwaru Excel byly namodelovány průběhy proudu odpovídající několika vybraným poměrům výkonu energie dodávané do spotřebiče při jeho sepnutí z fotovoltaické elektrárny a energie doplňované ze sítě ($P_{FVE}/P_{sítě}$: 1/49, 2/48, 5/45, 10/40

a 25/25). Namodelované průběhy proudu byly složeny z 500 celých period což odpovídá 10 sekundám. Vzorkovací frekvence u modelovaného průběhu byla zvolena $f_{vz}=10000$ vzorků/sek. Celkový počet bodů modelovaného signálu byl $n=100000$. Pro další výpočet bylo na namodelované průběhy aplikováno Hanningovo okno o délce 10 sekund podle vzorce:

$$D_{Hann}(i) = D(i) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n}\right)\right) \quad (8)$$

Kde $D(i)$ je hodnota i -tého vzorku namodelovaného signálu. $D_{Hann}(i)$ je hodnota i -tého vzorku namodelovaného signálu po aplikaci Hanningova okna.

Pomocí modifikované Fourierovy transformace byla vypočtena frekvenční spektra namodelovaných signálů. Frekvenční složky hledaného spektra byly zjišťovány s krokem 1 Hz na intervalu 0–500 Hz. Pro každou frekvenci f hledaného spektra byly pro všechny body i vypočteny hodnoty referenčních normalizovaných signálů dle vzorců [47]:

$$S(f, i) = \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot i}{f_{vz}}\right) \quad (9)$$

$$C(f, i) = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot i}{f_{vz}}\right) \quad (10)$$

Amplituda složky spektra o frekvenci f byla vypočtena podle vzorce [47]:

$$A(f) = \sqrt{(A_{sin}(f))^2 + (A_{cos}(f))^2} \quad (11)$$

Kde:

$$A_{sin}(f) = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n D_{Hann}(i) \cdot S(f, i)}{n} \quad (12)$$

$$A_{cos}(f) = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n D_{Hann}(i) \cdot C(f, i)}{n} \quad (13)$$

Kde:

$S(f, i)$ je hodnota i -tého vzorku normovaného sinusového signálu o frekvenci f

$C(f, i)$ je hodnota i -tého vzorku normovaného kosinusového signálu o frekvenci f

$A_{sin}(f)$ je amplituda signálu vzniklého vynásobením každého i -tého vzorku analyzovaného signálu s i -tým vzorkem normovaného sinusového signálu o frekvenci f

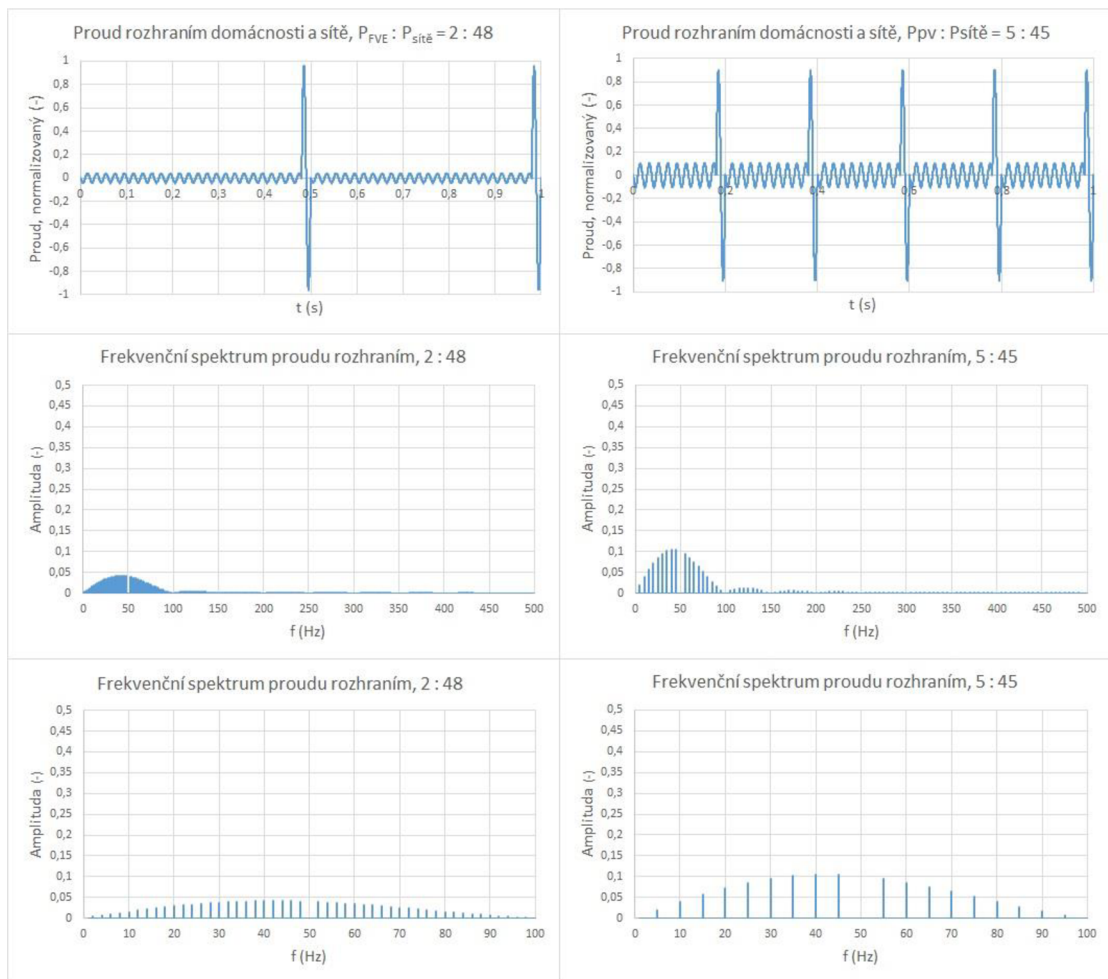
$A_{cos}(f)$ je amplituda signálu vzniklého vynásobením každého příslušného i -tého vzorku analyzovaného signálu s i -tým vzorkem normovaného kosinusového signálu o frekvenci f

$A(f)$ je amplituda frekvenční složky analyzovaného signálu o frekvenci f

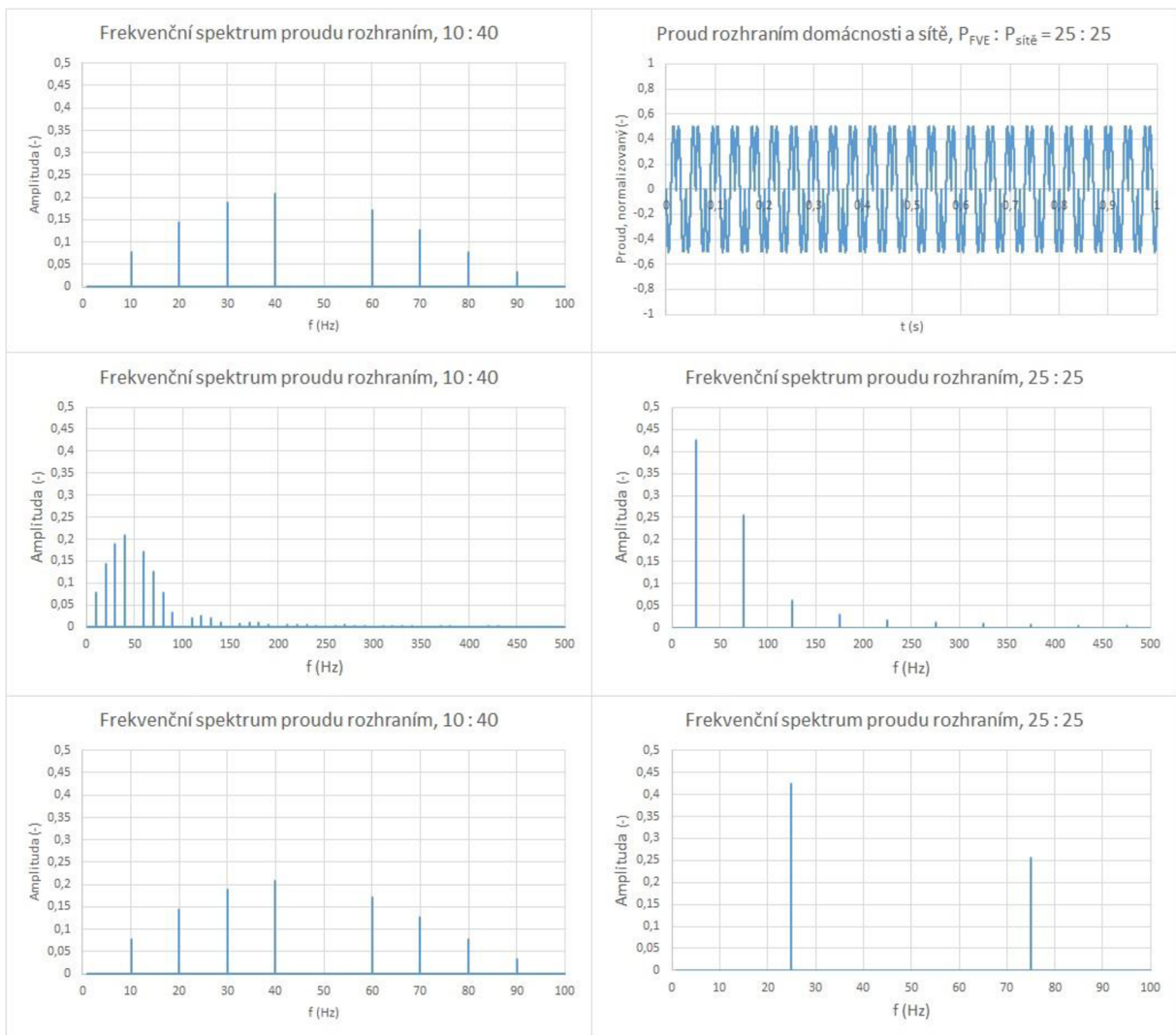
f_{vz} je hodnota vzorkovací frekvence zvolená pro daný model

Pro poměry výkonů z fotovoltaické elektrárny a výkonů ze sítě 48/2, 45/5 a 40/10 odpovídají frekvenční složky a jejich amplitudy signálům s převráceným poměrem výkonů. Fáze jednotlivých spektrálních složek nebyly předmětem analýzy.

Při výkonu FVE odpovídající 2/50 příkonu spotřebiče ($P_{FVE}/P_{sítě} = 2/48$), sepne wattrouter spotřebič na 2 periody v rámci své integrační doby (1 s). Zbývajících 48 period dochází k přetoku. Při výkonu FVE odpovídající 5/50 příkonu spotřebiče ($P_{FVE}/P_{sítě} = 5/45$), sepne wattrouter spotřebič na 5 period v rámci své integrační doby (1 s). Zbývajících 45 period dochází k přetoku elektrické energie do distribuční sítě. Průběh proudu a odpovídající frekvenční spektrum je zobrazeno dále pro poměry $P_{FVE}/P_{sítě}=10/40$ a $P_{FVE}/P_{sítě}=25/25$. Uvedený text se vztahuje k obrázkům č. 22 a č. 23.



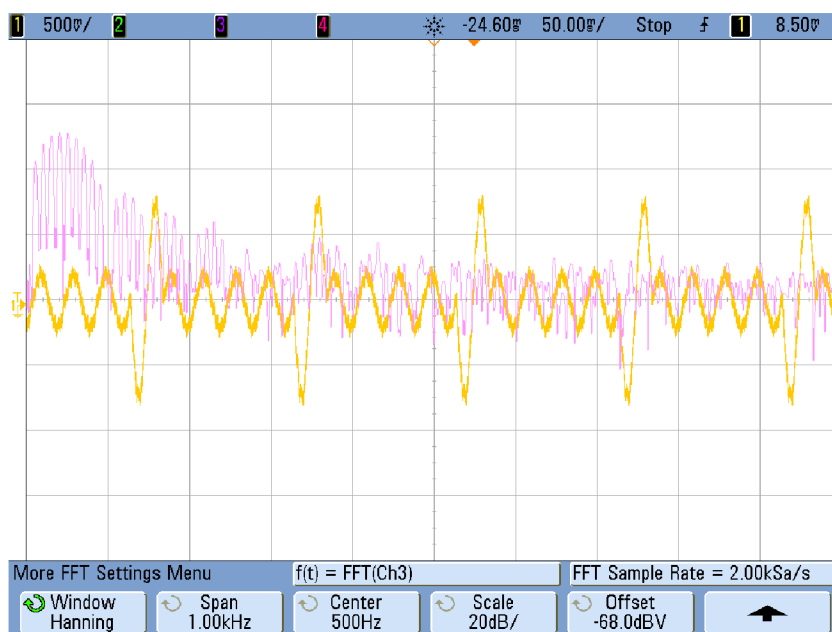
Obrázek 22: Grafy průběhů proudů a jejich frekvenční spektrum [zdroj: autor]



Obrázek 23: Grafy průběhů proudů a jejich frekvenční spektrum [zdroj: autor]

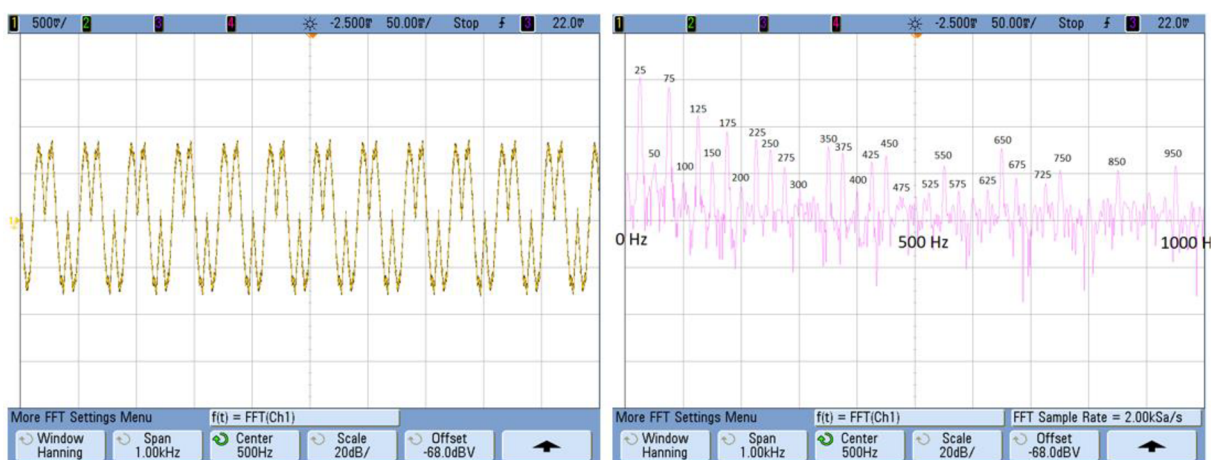
4.2.2 Rychlá Fourierova transformace pomocí osciloskopu

Matematický model uvedený výše je ověřen v praxi pomocí osciloskopu a jeho funkce FFT. Rychlou Fourierovou transformací je počítáno a zobrazováno frekvenční spektrum proudu při spínání po periodách komerčním wattrouterem GreenBono AKU. V reálném provozu je hodnocen signál pro různé poměry nadvýroby energie solárním systémem a příkonu spínaného spotřebiče. Na obrázku č. 24 je zobrazen průběh proudového signálu odpovídající frekvenčnímu spektru na rozsahu 0–1000 Hz pro poměr odběrových a přetokových period 1:4 (tedy pro modelový poměr odběrových a přetokových period 10:40; 10 odběrových a 40 přetokových během každé sekundy viz Obr. č. 23). Charakter změřeného spektra více méně odpovídá predikovanému matematickému modelu.

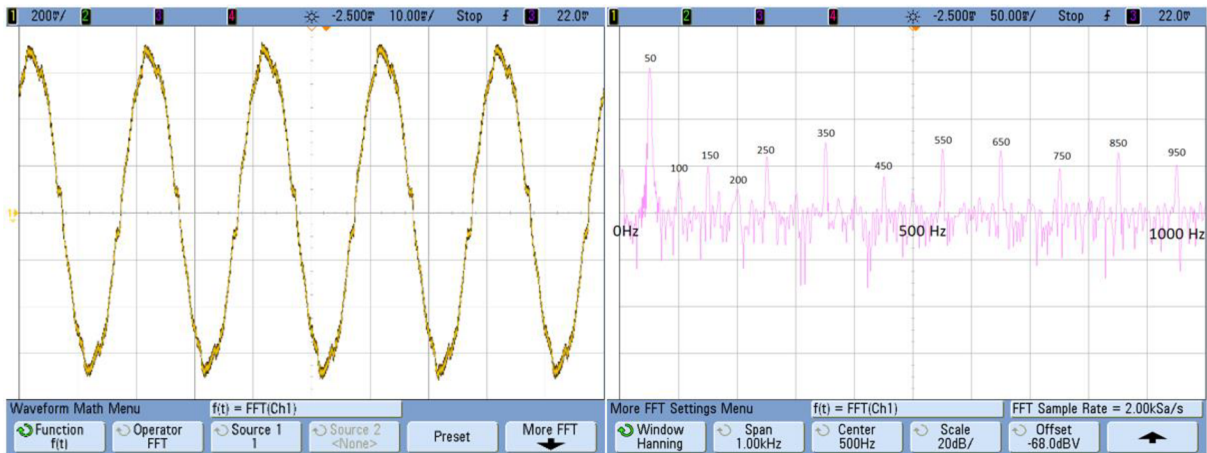


Obrázek 24: Reálné frekvenční spektrum proudu při spínání po periodách komerčním wattrouterem [zdroj: autor]

Na obrázku č. 25 je průběh signálu pro poměr odběrových a přetokových period 1:1 (shodující se s poměrem 25:25 v modelovém výpočtu) a odpovídající frekvenční spektrum na intervalu 0–1000 Hz. Porovnáním s modelovým spektrem (viz obrázek č. 25) je vidět shoda v dominantních frekvencích 25 Hz, 75 Hz, 125 Hz, 175 Hz, 225 Hz a 275 Hz. U vyšších frekvencí se již objevují odchylky. První harmonická 50 Hz se v reálném signálu sice na rozdíl od modelu vyskytuje, oproti dominantním složkám má malou amplitudu. Vyšší harmonické síťové frekvence, ale nabývají na velikosti. Jejich příčinou může být neharmonický průběh proudu produkovaný použitým měničem. Výstupní proud z měniče a jeho frekvenční spektrum je pro úplnost uvedeno na obrázku č. 26.



Obrázek 25: Průběh signálu pro poměr odběrových a přetokových period 1:1 a jeho frekvenční spektrum [zdroj: autor]



Obrázek 26: Výstupní proud z měniče SMA SB 1100LV a jeho frekvenční spektrum [zdroj: autor]

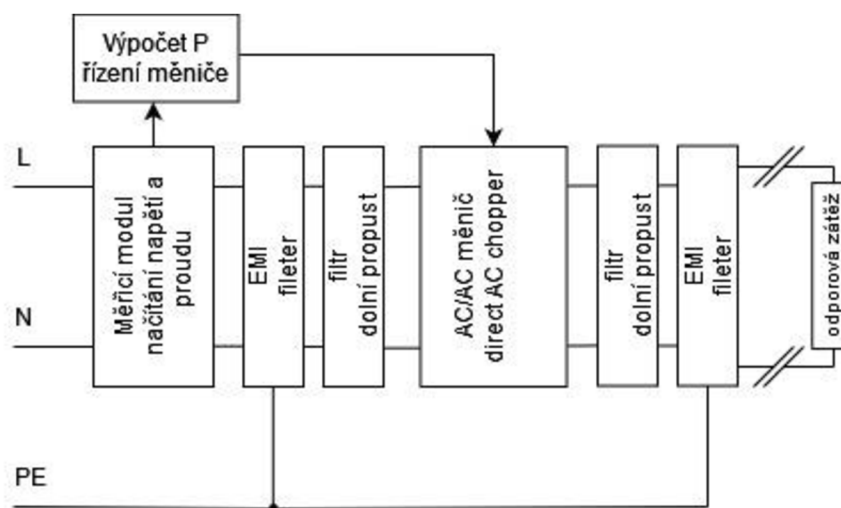
Ověřit všechna namodelovaná spektra, která jsou v disertační práci popsána výše lze v praxi velmi obtížně. Pro zpracování signálu je potřeba mít poměr odběrových a přetokových period po určitou dobu neměnný. Taková situace nenastává často ani při ustáleném výkonu slunečního záření. Většinou wattrouter musí v rámci integrační doby střídat poměr odběrových period ku přetokovým periodám, aby byla zajištěna „bezpřetoková“ bilance energií, například mezi 1:3 a 1:4. Pokud by se podařilo zachytit signál s neměnným poměrem odběrových a přetokových period po dostatečně dlouhou dobu, pro korektní výpočet spektra osciloskopem je potřeba splnit další podmínku. Osciloskop vypočítává frekvenční spektrum z dat obsažených v tzv. akvizičním okně. Pro správný výpočet spektra je třeba, aby se periodicky opakující sekvence odběrových a přetokových period v proudovém signálu v akvizičním okně opakovala celočíselně krát (1x, 2x atd.). Této podmínce při síťové frekvenci 50 Hz odpovídají poměry odběrových a přetokových period 1:49 (1:49), 1:24 (2:48), 1:9 (5:45), 1:4 (10:40), 1:1 (25:25) atd. (v závorce je uveden poměr pro 50 period v matematickém modelu). Pro ostatní poměry je pro zpřesnění spektra nutné mnohonásobně zvětšit počet opakování periodické sekvence odběrových a přetokových period v akvizičním okně. Tím se ale zase snižuje rozsah vypočítaného spektra (pro délku akvizičního okna odpovídající 250 síťovým periodám získáme spektrum pro 0–100 Hz).

Je vidět, že wattrouter svojí činností generuje velké množství mezipřetokových složek spektra proudu s amplitudami o vysokých hodnotách, a to nejvýznamněji v intervalu 1–100 Hz. Jelikož wattroutery nejsou široce rozšířenými regulačními prvky, výše zmíněný jev není v literatuře popsán ani analyzován, na rozdíl od jevů souvisejících s vyššími harmonickými složkami spekter u nelineárních zátěží.

4.3 Princip funkce inovativního wattrouteru

Na základě zjištění problematiky s mezharmonickými kmitočty, které jsou generované při používání stávajících wattrouterů, je navržen inovativní princip spínání zátěže, kdy nedochází k šíření dalších frekvenčních složek. Dále inovativní princip spínání zátěže eliminuje potřebu fyzických přetoků energie do distribuční sítě, nutných u stávajících wattrouterů založených na principu regulace spotřeby spínáním zátěže po jednotlivých periodách.

Blokové schéma inovativního wattrouteru je zobrazeno na obrázku č. 27. Stejně jako u komerčních wattrouterů je nutné sledovat hodnoty síťového napětí a proudu tekoucího rozhraním domácnosti a distribuční sítě. Měřicí modul zajišťuje galvanické oddělení měřených signálů a přizpůsobuje rozsah jejich hodnot s ohledem na rozsah měřicí části wattrouteru. Pro zjištění aktuální nadprodukce energie z FVE jsou výstupní signály z měřicího modulu vzorkovány pomocí vhodného mikrokontroleru, který také provádí patřičné výpočty. Dále jsou vypočtená data odeslána do modulu AC/AC měniče, který má na starosti vlastní řízení příkonu vyhrazeného spotřebiče. Eliminace rušivých vlivů, které vznikají PWM modulací průběhu síťového napětí a mohly by se šířit do sítě, jsou potlačeny potřebnými filtry. Návrh a realizace jednotlivých částí wattrouteru jsou podrobně popsány v dalších kapitolách této disertační práce.

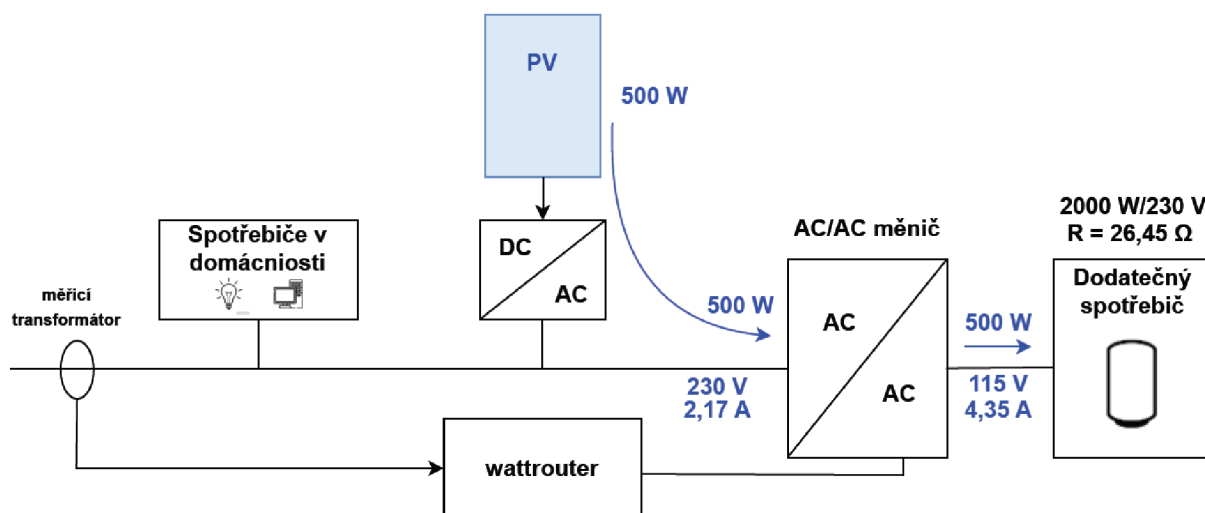


Obrázek 27: Blokové schéma inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

Celý wattrouter se hardwarově skládá z několika částí. Jako první je navržena měřicí DPS, pomocí které se navzorkuje vstupní napětí a proud. Druhou částí je řídicí deska, která má na starosti zpracování vstupních signálů přicházejících z měřicí části. Řídicí deska následně přijatá data pomocí mikropočítače zpracuje a vyhodnotí dle naprogramovaného softwaru. Následně

data odešle do DPS, která řídí spínání přídatného spotřebiče. Výstupní napětí AC/AC měniče ovládající vyhrazený spotřebič je řízeno PWM signálem, který je přiveden přes budič na výkonový tranzistor. V poslední fázi je navržen vhodný vstupní a výstupní filtr k zamezení šíření nežádoucích frekvencí.

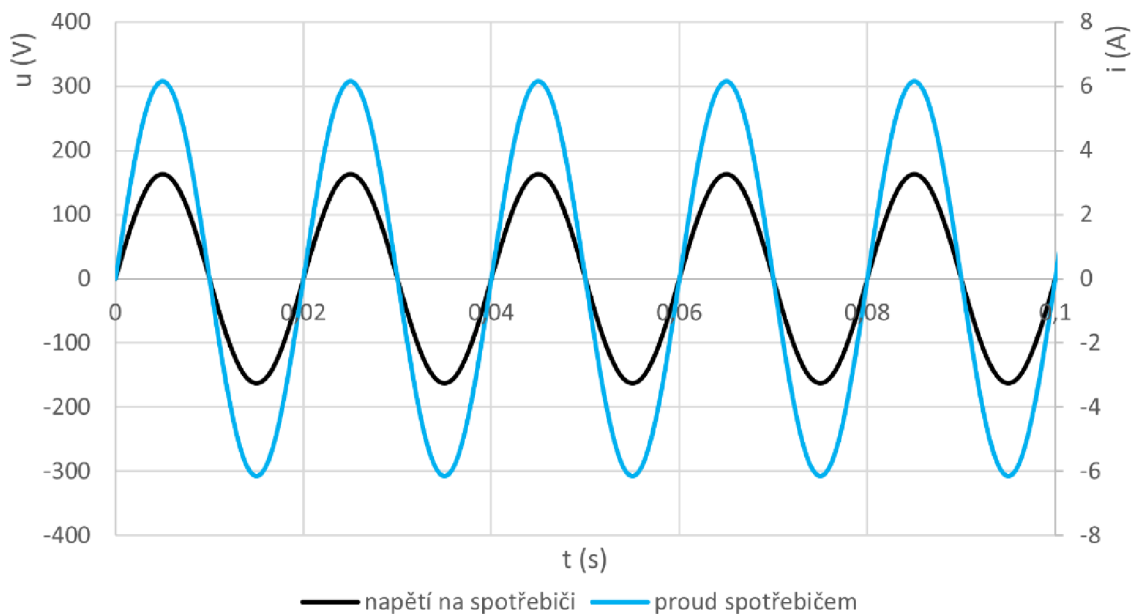
Princip spínání v inovativním wattrouteru spočívá v plynulé regulaci napětí na vyhrazeném spotřebiči pomocí AC/AC měniče. Amplituda střídavého napětí na výstupu měniče je nastavována tak, aby spotřebičem odebíraný výkon odpovídal aktuální nadvýrobě z fotovoltaické elektrárny. Veškerá nadvýroba elektrické energie z FVE se tímto způsobem v každém časovém okamžiku umožňuje do vyhrazeného spotřebiče a nedochází k žádnému přetoku elektrické energie do distribuční sítě. Inovativní princip spínání wattrouter je schematicky znázorněn na obrázku č. 28.



Obrázek 28: Princip spínání zátěže u inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

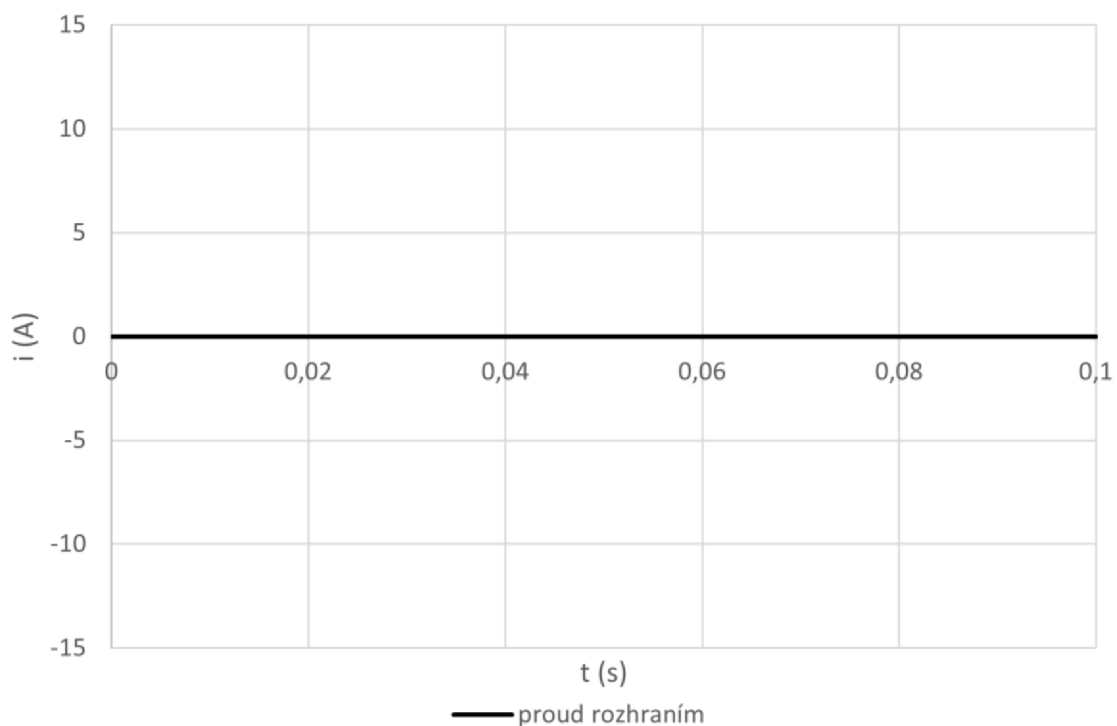
Pro danou velikost nominálního příkonu dodatečného spotřebiče (při napájení 230 V je příkon 2000 W a tomu odpovídá odpor 26,45 Ω) a aktuálně generovanou nadvýrobu 500 W nastaví AC/AC měniči na výstupu napětí 115 V, a tak je vyhrazeným spotřebičem spotřebováváno právě 500 W. Tímto způsobem je zaručeno, že je veškerý výkon z FVE umožněn v dodatečném spotřebiči.

Obrázek č. 29 znázorňuje průběh napětí a proudu vyhrazeným spotřebičem, který je možné naměřit za AC/AC měničem. Vyobrazený graf je opět vztažený k aktuální nadvýrobě fotovoltaické elektrárny 500 W.



Obrázek 29: Průběh napětí a proudu vyhrazeným spotřebičem [zdroj: autor]

Pokud inovativní wattrouter ideálně nastavuje napětí na AC/AC měniči podle aktuální nadvýroby, je proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace nulový. Předpokládáme, že ostatní spotřebiče v domácnosti jsou vypnuté. Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace je pro tento případ zobrazen na obrázku č. 30.

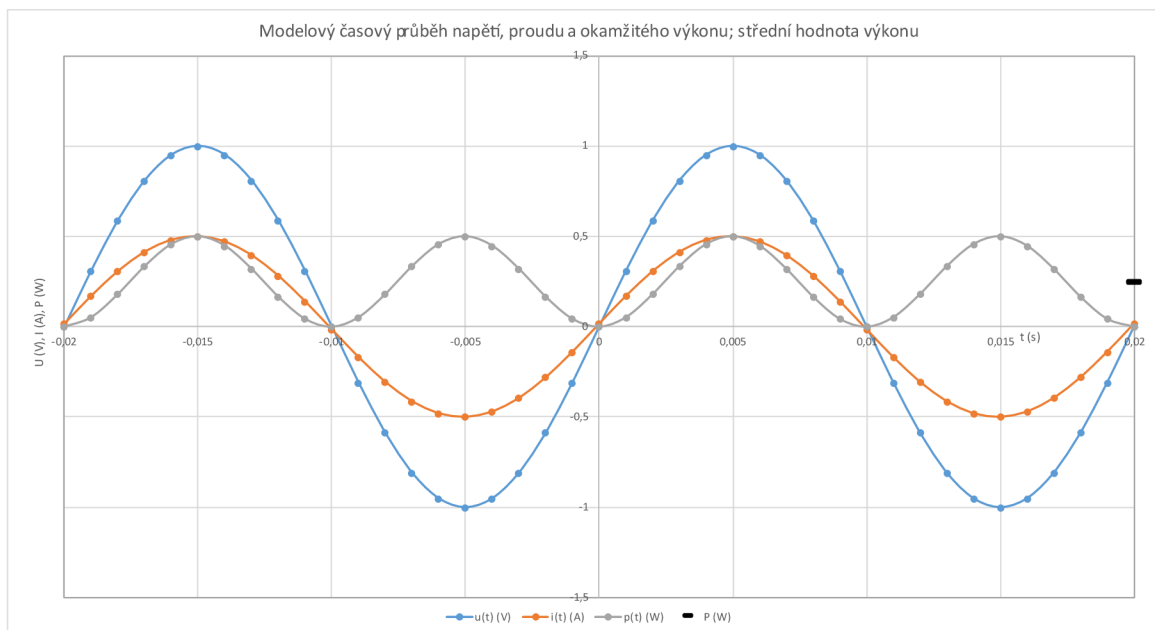


Obrázek 30: Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace [zdroj: autor]

V první fázi vývoje wattrouteru bylo zamýšleno použít autotransformátor s dostatečným počtem odboček jako AC/AC měnič, který reguluje příkon do přídavného spotřebiče. Typický autotransformátor umožňující regulovat napětí od 0 do 230 V má přibližně 250 závitů. V případě že autotransformátor má z každého závitu odbočku, je napěťový krok výstupu 0,92 V. Aby bylo možné ovládat každou odbočku zvlášť, a tak regulovat výstupní napětí, je nutné ke každé odbočce přidat výkonový spínač umožňující spínání v nule pro eliminaci rušivých vlivů na distribuční síť. Počet potřebných spínacích prvků by bylo možné snížit vzájemným kombinováním segmentů o různém počtu závitů (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128). Tak by počet nezbytných spínacích prvků klesl na 35. Složitost výše uvedených řešení je neúměrná výsledné funkci inovativního wattrouteru, a tak bylo navrženo řešení, které využívá pulzně šířkovou modulaci k regulaci výstupního napětí. Tato metoda se ukázala jako softwarově a hardwarově optimální. Procesor ATmega328p umožňuje interval činitele plnění 0–100 % rozdělit na 255 kroků, což představuje podstatě stejně velký regulační krok jako autotransformátor.

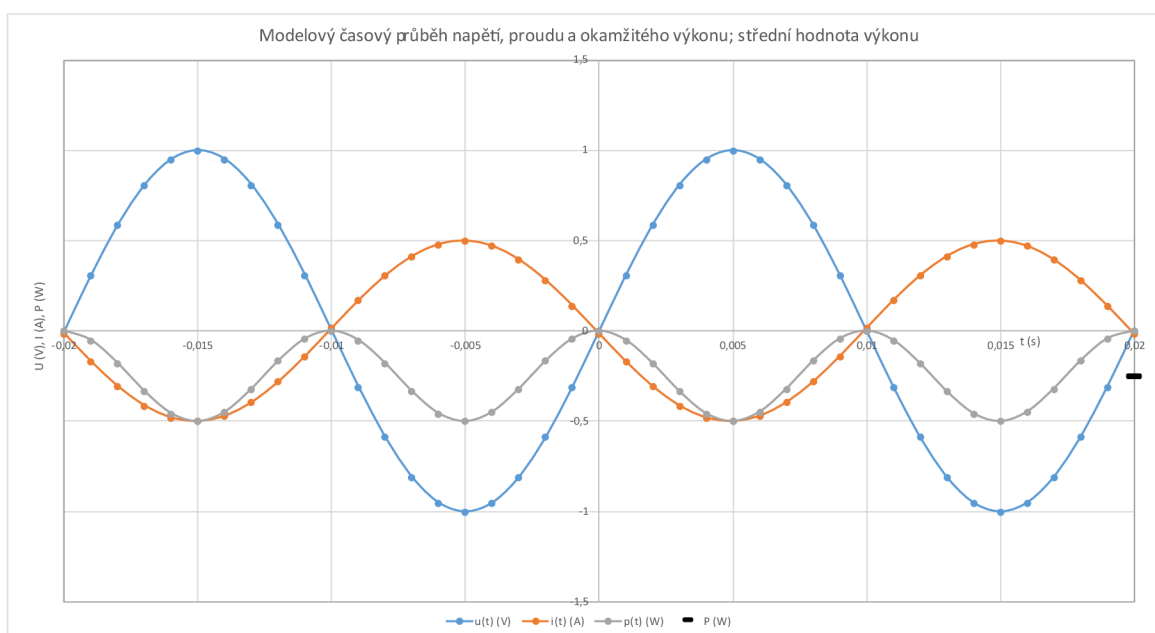
4.4 Metoda měření činného výkonu

Výše je v disertační práci popsáno, jakým způsobem může inovativní wattrouter řídit spotřebu energie vyhrazeným spotřebičem. Řízení je závislé na správném vyhodnocení velikosti produkované nadvýroby z FVE. Řídicí jednotka vzorkuje s dostatečnou frekvencí průběhy výstupních signálů napětí a proudu z měřicího modulu. Okamžitou hodnotu výkonu vypočte řídicí jednotka vynásobením aktuální hodnoty napětí, proudu a příslušné konstanty. Integrací okamžitých hodnot výkonu po stanovený celočíselný počet period a následným vydělením dobou integrace je získána střední hodnota činného výkonu. Tato hodnota je použita pro nastavení odpovídajícího činitele plnění PWM signálu pro AC/AC měnič. Základní princip detekce spotřeby či dodávky elektrické energie je ilustrován následujícími obrázky. Obrázek č. 31 znázorňuje průběh proudu, napětí a okamžitého výkonu, kde průběh proudu je v grafu vyznačen oranžovou barvou, průběh napětí modrou barvou a průběh okamžitého výkonu šedou barvou. Jelikož jsou oba zde uvedené průběhy napětí a proudu ve fázi, jedná se o čistě činnou spotřebu elektrické energie odpovídající odporové zátěži. Střední hodnota okamžitého výkonu je vyznačena černou značkou na konci daného časového intervalu. Jelikož jde o odběr energie ze sítě, její hodnota je kladná. Černá značka na konci časového intervalu odpovídá střední hodnotě okamžitého výkonu zobrazeného časového intervalu.



Obrázek 31: Průběh napětí, proudu a okamžitého výkonu při spotřebě. [zdroj: autor]

V případě, že na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace dostáváme z naměřených hodnot graf, který je zobrazen na obrázku č. 32, jedná se o dodávku elektrické energie do distribuční sítě a to o čistě činném charakteru. Průběh proudu, který je vyznačený oranžovou barvou, je v protifázi vůči průběhu napětí, které je v grafu reprezentováno modrou barvou. Střední hodnota okamžitého výkonu vyznačeného černou značkou na konci časového intervalu je záporná – jde tedy o přetok energie do sítě.



Obrázek 32: Průběh napětí, proudu a okamžitého výkonu při dodávce [zdroj: autor]

Pokud je detekována nenulová střední hodnota výkonu na rozhraní domovní instalace a distribuční sítě, inovativní wattrouter upraví změnou činitele plnění PWM hodnotu výstupního napětí na AC/AC měniči. Na základě detekovaných rychlých změn, například při zapnutí/vypnutí běžných spotřebičů v domácnosti nebo při pomalejší změně výkonu z FVE, je neustále upravováno výstupní napětí na AC/AC měniči tak, aby odebíraný výkon vyhrazeným spotřebičem odpovídal aktuální nadvýrobě z fotovoltaické elektrárny.

4.5 Možnosti bezpečného měření napětí a proudu

Část vývoje a výzkumu wattrouteru se zaměřuje na výběr správné metody pro načítání síťového napětí s následným zpracováním načtených hodnot pomocí mikrokontroleru. Z důvodu bezpečnosti veškeré navržené způsoby načítání napětí v domovním rozvodu jsou realizovány s galvanickým oddělením. Galvanické oddělení zaručuje, že v části obvodu s malým napětím nemůže být ani při poruše zařízení způsoben úraz elektrickým proudem, ani že nebude nízkým napětím poškozena část obvodu s malým napětím. Použitím vhodné metody načítání síťového napětí se snižují nároky na potřebný výpočetní výkon, protože není nutné přepočítávat fázově posunutý nebo zkreslený signál.

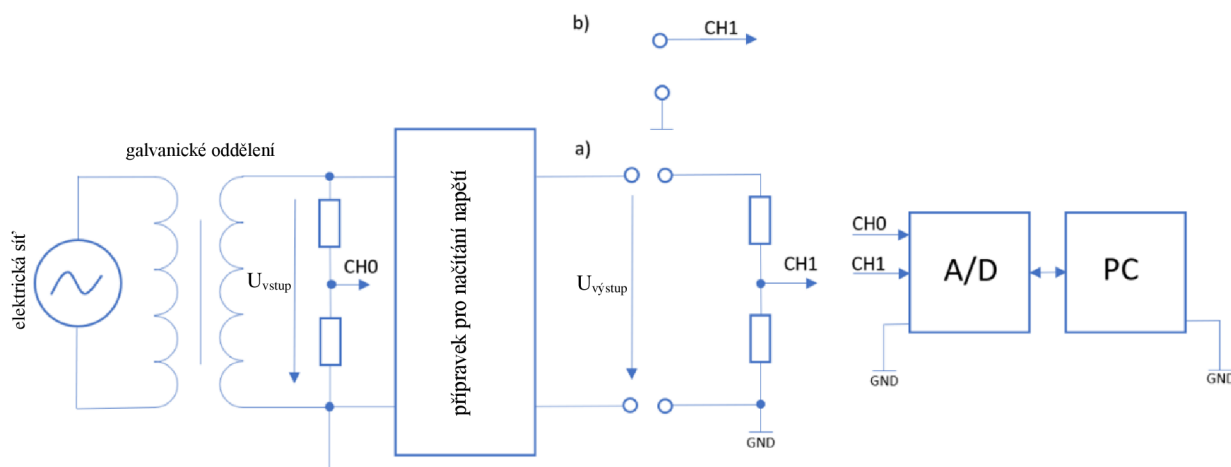
4.5.1 Výběr metody a prvku pro načítání napětí

Průběh síťového napětí byl načítán pomocí šesti přípravků. Jednotlivé typy přípravků se od sebe odlišují způsobem přenosu vstupního signálu na výstup, a tedy způsobem galvanického oddělení nízkonapěťové části od části s malým napětím. Analýza byla provedena na sadě optočlenů, které pro přenos načtených vstupních hodnot na výstup využívají princip opticko-elektrické metody, kdy světlo emitovaného z LED dopadá na povrch fotodiody. [35] [36] Dalšími porovnávanými přípravky byly dva transformátory. U transformátoru je přenos vstupních hodnot realizován pomocí magnetické indukce, která se šíří jádrem transformátoru na výstup. Stejného principu využívá i jednofázový snímač, který obsahuje proudový transformátor. Jeho výstupní signál je však ještě dále upraven elektronikou, která je součástí tohoto přípravku. Dále byl otestován samostatný proudový transformátor, který je součástí jednofázového snímače. Posledním testovaným přípravkem byl izolovaný zesilovač určený přímo pro snímání napětí. [38]

V laboratoři katedry Fyziky na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze byla provedena analýza přípravků umožňujících načítání průběhů síťového napětí. Jednotlivé moduly byly mezi sebou porovnány a zhodnoceny z pohledu přesnosti. Sledovanými parametry

byly THD_u , fázový posun prvních harmonických složek a fázový posun průchodu nulou. Tyto parametry zohledňují zkreslení výstupního sinusového signálu z jednotlivých přípravků. Dále byly výstupní sinusové signály porovnány pomocí parametrů označených jako chybová plocha a chybová energie.

Experiment zaměřující se na načítání průběhu síťového napětí byl realizován pomocí automatické měřicí soustavy. Vzorkování výstupního signálu z jednotlivých přípravků bylo provedeno pomocí šestnácti bitového A/D převodníku DT9816. Uvedený A/D převodník je napájen a řízen přes USB konektor přímo z PC. [48] Pro všechna experimentální měření byl použit nastavitelný laboratorní transformátor Thalheimer LTS 604, který zprostředkoval galvanické oddělení měřeného přípravku od sítě. Ovládání výše zmíněného převodníku obstarával software naprogramovaný ve vývojovém prostředí LabVIEW. Software je naprogramovaný tak, že načtené hodnoty vykreslí do grafu pro vizuální kontrolu. Pokud načtená data nevykazují chybu, je možné hodnoty uložit do souboru pro další zpracování. Pro dosažení nejvyšší přesnosti byl výstupní signál z jednotlivých přípravků zpracován A/D převodníkem se vzorkovací frekvencí 750 000 vzorků za sekundu. Pro každý přípravek bylo načteno 150 000 vzorků, které byly následně exportovány do textového souboru pro další zpracování. Schéma měřicí soustavy je zobrazeno na obrázku č. 33.

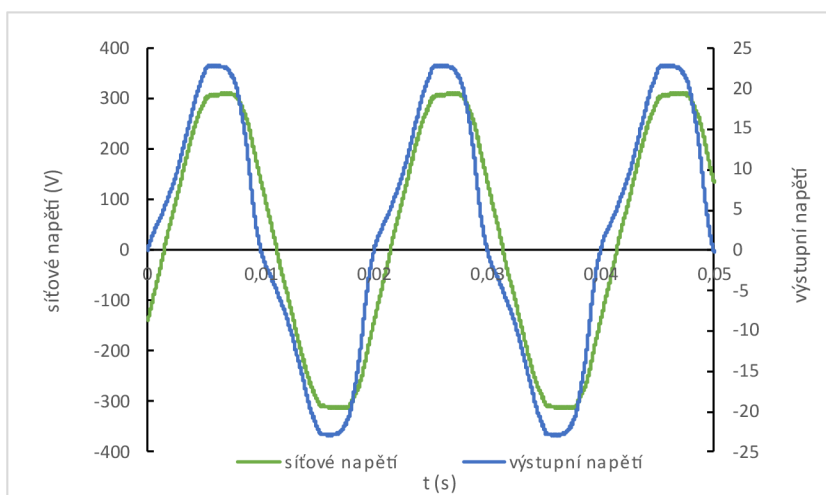


Obrázek 33: Měřicí soustava pro porovnání jednotlivých přípravků [zdroj: autor]

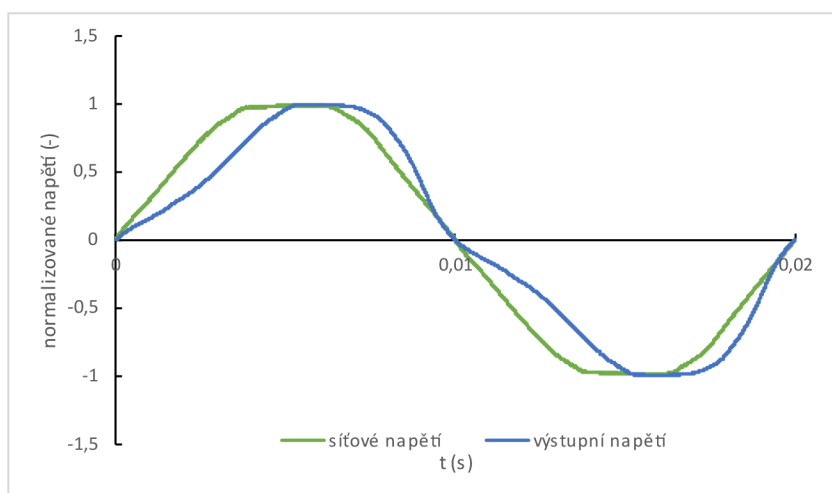
- Transformátor K-2803GCE-1F

Pro navrhovaný wattrouter byla otestována přesnost dvou transformátorů. První z transformátorů nese označení K-2803GCE-1F s převodním poměr 1:14,7 a vstupním

napájecím napětím 230 V. Jádru transformátoru tvoří EI plechy o rozměrech 30×14×27 mm (délka, šířka, výška). Síťové napětí bylo přivedeno přímo na svorky primárního vinutí transformátoru. Vstupní a výstupní signál byl sledován na výstupech CH0 a CH1 odporových děličů, jak znázorňuje obrázek č. 33. Na transformátoru 230 V K-2803GCE-1F byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 34. Pro srovnání jednotlivých metod a přípravků byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného transformátoru normalizován podle dosažených maximálních hodnot, dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál pro transformátor K-2803GCE-1F je znázorněn na obrázku č. 35. V následujících grafech je vstupní signál označen černou barvou a výstupní signál z přípravku je označen šedivou barvou.



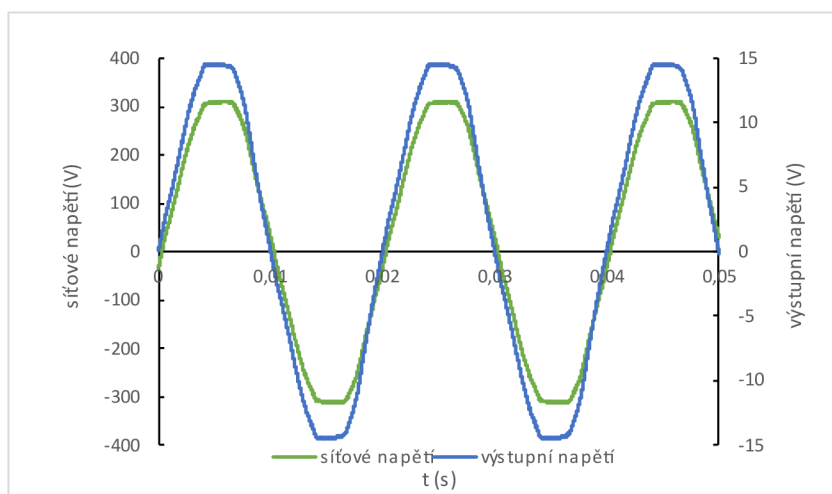
Obrázek 34: Vstupní a výstupní signál transformátoru K-2803GCE-1F [zdroj: autor]



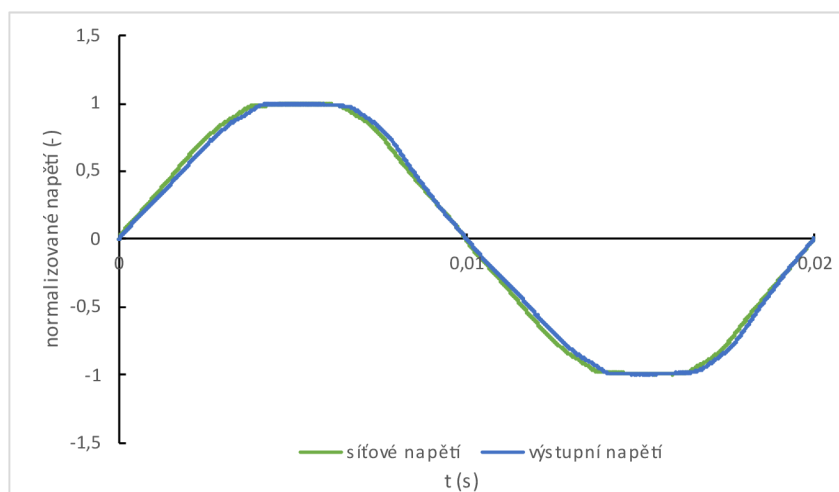
Obrázek 35: Normalizovaný a fázově korigovaný signál transformátoru K-2803GCE-1F [zdroj: autor]

- Transformátor BV EI 305 2055 HAHN

Druhý testovaný transformátor nese označení BV EI 305 2055 HAHN a je určený jako napěťový zdroj. Stejně jako první transformátor má jádro tvořené pomocí EI plechů o rozměrech 32,8×27,8×29,5 (délka, šířka, výška) a jeho transformační poměr je 1:21,6. Transformátor BV EI 305 2055 HAHN disponuje dvěma totožnými sekundárními vinutími. Vstupní síťové napětí bylo přivedeno přímo na primární svorky zmíněného transformátoru a výstupní signál byl sledován na jednom ze dvou sekundárních vinutí a druhé vinutí zůstalo nezapojené. Vstupní a výstupní signál byl sledován na výstupech CH0 a CH1 odporových děličů, jak znázorňuje obrázek č. 33. Na transformátoru BV EI 305 2055 HAHN byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 36. Pro možnost srovnání s dalšími přípravky byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného transformátoru normalizován podle dosažených maximálních hodnot. Dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál pro transformátor BV EI 305 2055 HAHN je znázorněn na obrázku č. 37.



Obrázek 36: Vstupní a výstupní signál transformátoru BV EI 305 2055 HAHN [zdroj: autor]

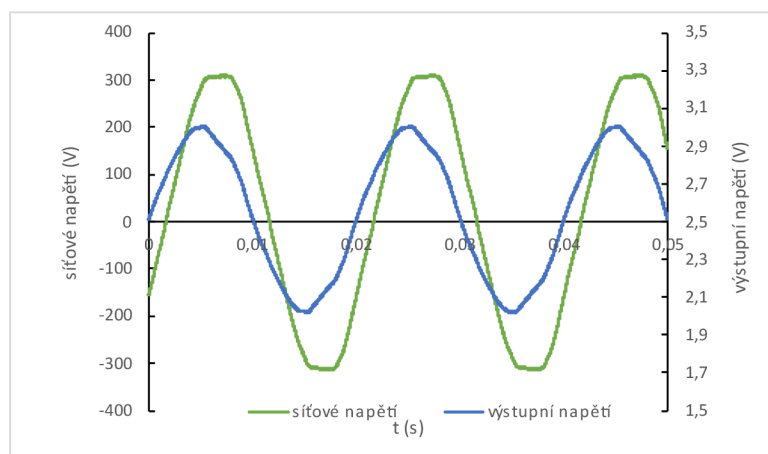


Obrázek 37: Normalizovaný a fázově korigovaný signál transformátoru BV EI 305 2055 HAHN [zdroj: autor]

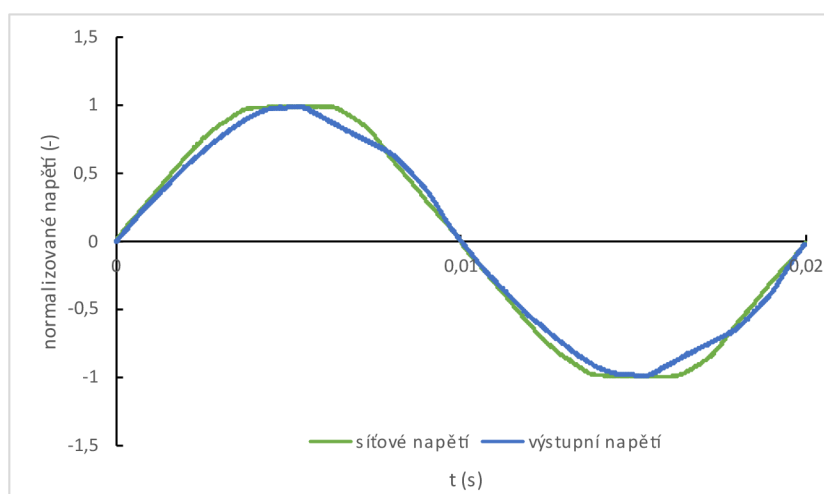
- Jednofázový snímač střídavého napětí ZMPT101B

Dále byl pro měření síťového napětí vybrán jednofázový snímač střídavého napětí s označením ZMPT101B. Základem snímače je DPS, na které je osazen přesný proudový transformátor nesoucí stejné označení. Osazený proudový transformátor ZMPT101B zaručuje galvanické oddělení od sítě. Předřadný rezistor o hodnotě $820\text{ k}\Omega$ omezuje proud tekoucí do primárního vinutí transformátoru. Paralelně k sekundárnímu vinutí je připojen měřicí rezistor o hodnotě $100\ \Omega$. Výstupní signál dále vstupuje do operačního zesilovače LM358, který je součástí jednofázového snímače střídavého napětí, kde je signál filtrován, zesílen a odeslán na výstupní svorku. Dále snímač disponuje víceotáčkovým potenciometrem, kterým je možné nastavit zesílení výstupního signálu. Vstupní a výstupní sinusový signál byl sledován na výstupech CH0 a CH1, jak znázorňuje obrázek č. 33. Pro senzor ZMPT101B byla využita varianta bez odporového děliče na výstupu. Elektronika, která je součástí tohoto senzoru upraví signál tak, aby mohl být rovnou načten pomocí A/D převodníku.

Na snímači jednofázového střídavého napětí ZMPT101B byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 38. Pro možnost srovnání s dalšími přípravky byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného transformátoru normalizován podle dosažených maximálních hodnot. Dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál snímače ZMPT101B je znázorněn na obrázku č. 39.



Obrázek 38: Vstupní a výstupní signál snímače ZMPT101B [zdroj: autor]

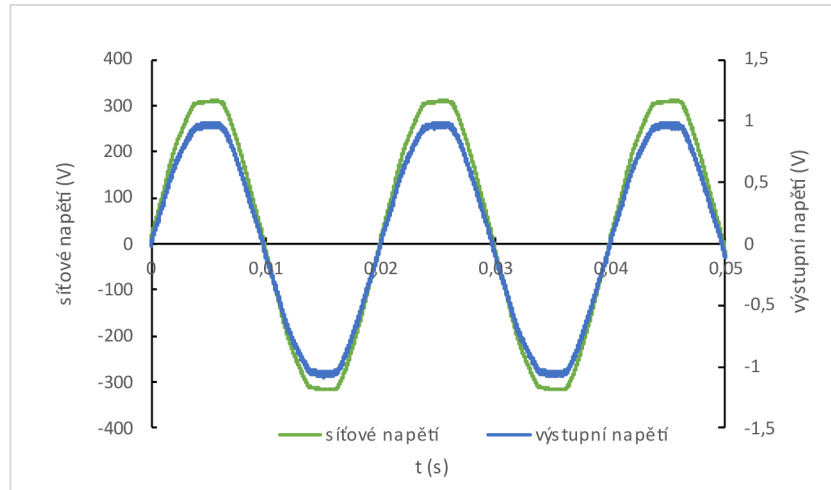


Obrázek 39: Normalizovaný a fázově korigovaný signál snímače ZMPT101B [zdroj: autor]

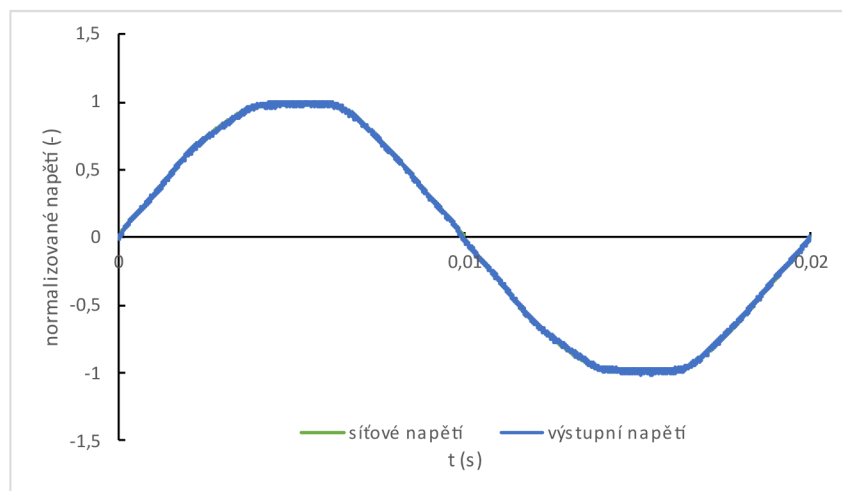
Proudový transformátor ZMPT101B

Na základě značně zkresleného výstupního signálu z jednofázového snímače střídavého napětí ZMPT101B bylo provedeno měření i na samotném proudovém transformátoru ZMPT101B. Proudový transformátor zajišťuje galvanické oddělení primárního a sekundárního vinutí s transformačním poměrem 1:1. Transformátor ZMPT101B disponuje toroidním feritovým jádrem. Aby bylo možné načíst vstupní síťové napětí musel být proud tekoucí do proudového transformátoru omezen předřadným rezistorem o velikosti 150 k Ω . Vstupní a výstupní sinusový signál byl sledován na výstupech CH0 a CH1, jak znázorňuje obrázek č. 33. Výstupní signál byl pak snímán na měřicím rezistoru o hodnotě 500 Ω . Na proudovém transformátoru ZMPT101B byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 40. Pro možnost srovnání s dalšími přípravky byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného proudového transformátoru

normalizován podle dosažených maximálních hodnot. Dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál proudového transformátoru ZMPT101B je znázorněn na obrázku č. 41.



Obrázek 40: Vstupní a výstupní signál proudového transformátoru ZMPT101B [zdroj: autor]

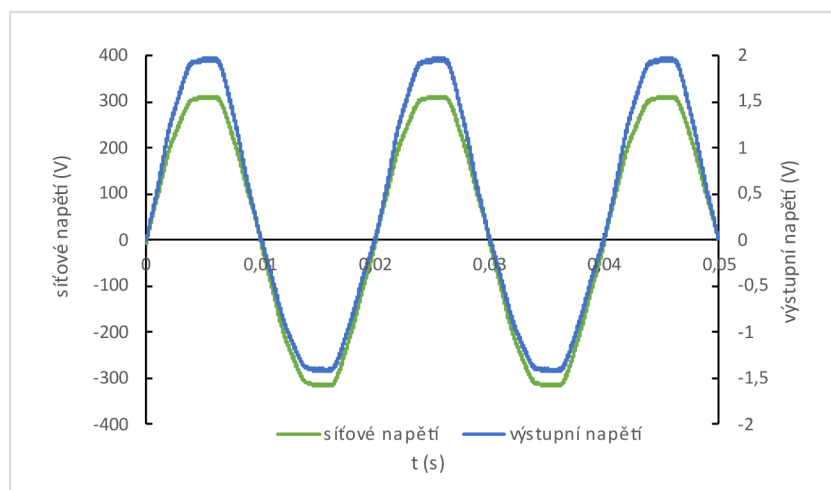


Obrázek 41: Normalizovaný a fázově korigovaný signál proudového transformátoru ZMPT101B [zdroj: autor]

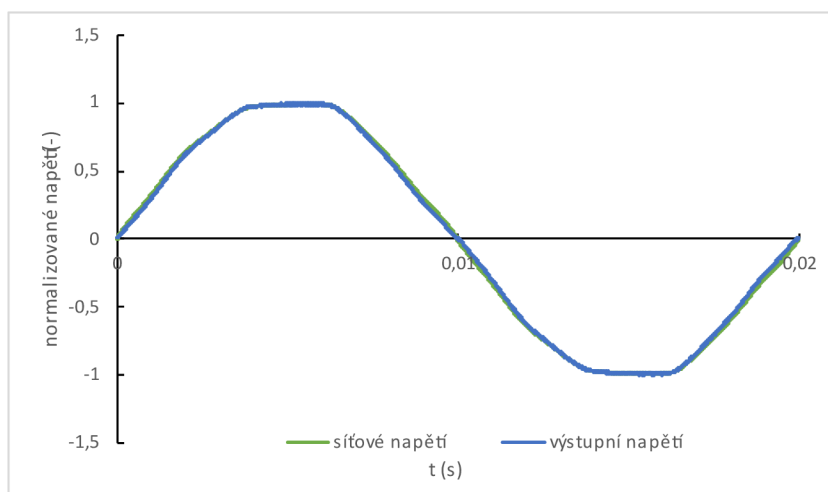
- Přípravek s optočlenem HCPL-4562

Předposlední přípravek, který byl posuzován pro svoji přesnost přenosu vstupního napětíového signálu na výstup, je jednoduchý obvod HCPL-4562. Tento obvod zaručuje galvanické oddělení od síťového napětí pomocí opticko-elektrické cesty. Obvod HCPL-4562 je tvořen LED a fotodiódou připojenou k bázi tranzistoru. Z výstupního obvodu byla použita jen fotodióda bez zapojení integrovaného tranzistoru. Každý integrovaný obvod HCPL-4562 obsahuje jednu LED a jednu fotodiódu. Pro možnost měření střídavého napětí sítě je potřeba použít dva tyto obvody a jejich LED zapojit antiparalelně tak, aby jeden z integrovaných

obvodů mohl měřit kladnou půlvlnu a druhý zápornou půlvlnu střídavého signálu. Vstupní proud LED bylo nutné omezit pomocí předřadného rezistoru o velikosti 20 k Ω . Velikost předřadného rezistoru je dána nominálním proudem integrovaných LED. Výstupní signál přípravku s dvěma integrovanými obvody HCPL-4562 byl měřen na měřicím rezistoru o velikosti 20 k Ω . Mezi měřicí rezistor a výstup fotodiody byl vložen operační zesilovač LM358 zapojený jako napěťový sledovač. Takto upravený výstupní signál byl rovnou načítán ze svorky CH1 pomocí A/D převodníku bez použití dalšího odporového děliče. Vstupní signál byl načítán pomocí odporového děliče ze svorky CH0, jak je znázorněno na obrázku č. 33. Na přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 42. Pro možnost srovnání s dalšími přípravky byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného přípravku normalizován podle dosažených maximálních hodnot. Dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 je znázorněn na obrázku č. 43.



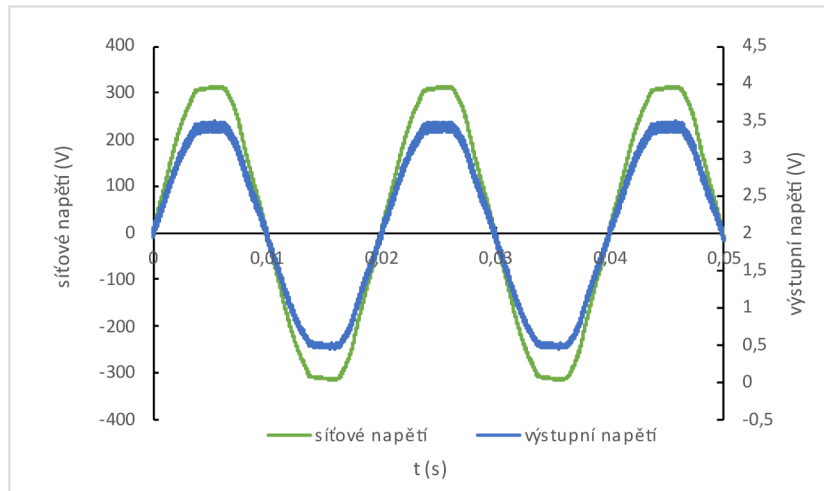
Obrázek 42: Vstupní a výstupní signál přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 [zdroj: autor]



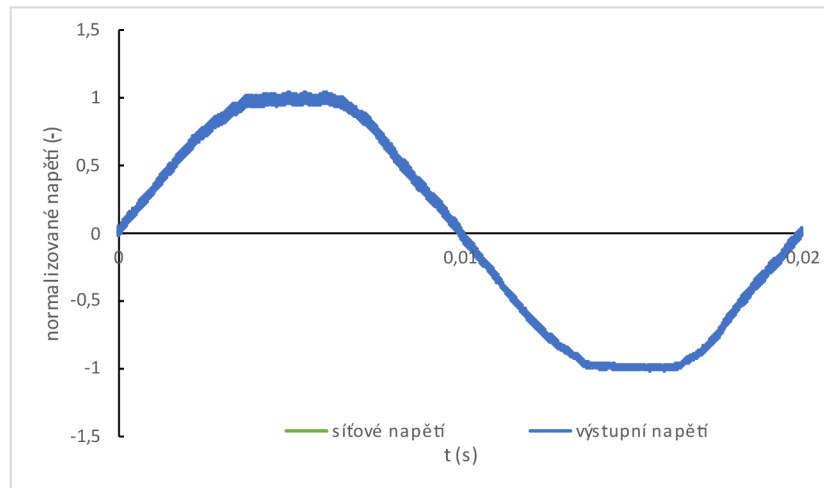
Obrázek 43: Normalizovaný a fázově korigovaný signál přípravku s integrovanými obvody HCPL-4562 [zdroj: autor]

- Přípravek s operačním zesilovačem AMC1211

Přesnost přenosu vstupního střídavého signálu na výstup s galvanickým oddělením byla zjišťována i pro přípravek s izolačním zesilovačem od společnosti Texas Instruments. Jako izolační zesilovač byl použit integrovaný obvod s označením AMC1211. Izolační zesilovač AMC1211 využívá princip integrovaného A/D a D/A převodníku s izolační bariérou, která tvoří galvanické oddělení. Pro přenos síťového napětíového signálu do části s malým napětím je potřeba vstupní signál upravit odporovým děličem tak, aby jeho napětí špička-špička bylo v rozmezí 0–2 V. Odporový dělič zaručí snížení napětí špička-špička do požadované úrovně, ale vstupní signál je stále střídavého charakteru. Přípravek s integrovaným obvodem AMC1211 je proto osazen 1V zdrojem, který střídavý signál posune do kladného kvadrantu. Takto upravený signál je pak možné zpracovat integrovaným obvodem AMC1211. Signál je digitalizován A/D převodníkem a kapacitní vazbou se přenesse přes izolační bariéru, dále je D/A převodníkem signál rekonstruován a zapojením s operačním zesilovačem LM358 vyfiltrován, zesílen a odeslán na výstupní svorku přípravku. Na přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 byl zaznamenán průběh, který je zobrazen na obrázku č. 44. Pro možnost srovnání s dalšími přípravky byl vstupní a výstupní signál výše uvedeného přípravku normalizován podle dosažených maximálních hodnot. Dále byly signály korigovány posunem tak, aby ve stejný okamžik procházely nulou. Takto normalizovaný signál přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 je znázorněn na obrázku č. 45.



Obrázek 44: Vstupní a výstupní signál přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 [zdroj: autor]



Obrázek 45: Normalizovaný a fázově korigovaný signál přípravku s integrovaným obvodem AMC1211 [zdroj: autor]

4.5.2 Přesnost jednotlivých metod měření síťového napětí

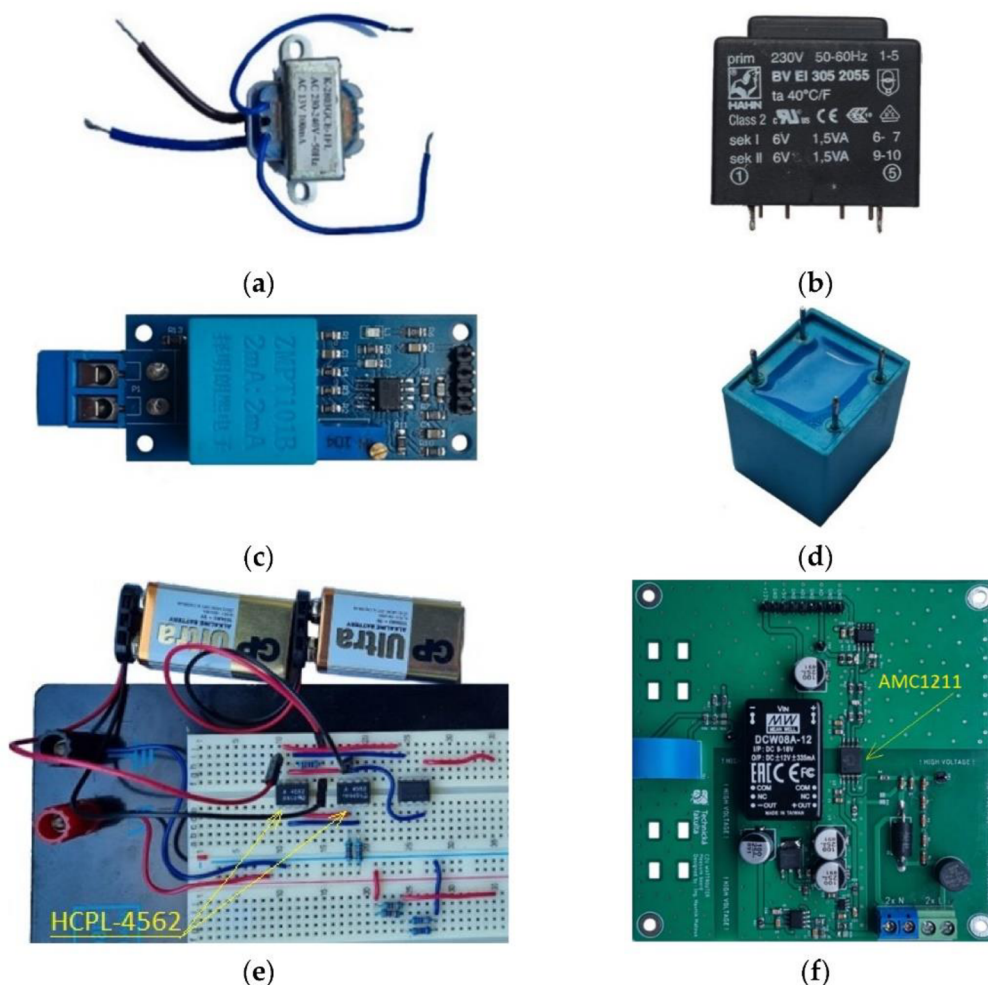
Pro porovnání přesnosti přenosu signálu ze vstupu na výstup byly jednotlivé přípravky zkoumány následujícími metodami. První metoda porovnávala THD_u , které určuje míru zkreslení výstupního signálu vůči vstupnímu. Druhá metoda hodnotila odchylky tvarů vstupního a výstupního signálu. Dalším ukazatelem byla chyba při výpočtu činného výkonu způsobena zkreslením signálu daným přípravkem. Dále byl sledován fázový posun průchodu nulou výstupního signálu vzhledem k vstupnímu signálu a na základě zjištěné hodnoty je následně prováděna časová korekce při výpočtu činného výkonu. Pro porovnání přesnosti jednotlivých metod byl vybrán ukazatel chyby výpočtu činného výkonu, protože je to nejdůležitější parametr pro zaručení správné funkce wattrouteru. Výběrem vhodného přípravku je eliminováno zanesení chyby měření vstupní veličiny. Výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka 4: Chyba výpočtu činného výkonu u jednotlivých přípravků

	K-2803GCE-1FL	BV EI 305 2055	ZMPT101B v DPS	ZMPT101B	HCPL-4562	AMC1211
Chyba činného výkonu [%]	11,2	0,544	11,288	1,461	1,598	- 0,209

Na základě získaných výsledků je pro měření síťového napětí s galvanickým oddělením nejvhodnější použít izolační zesilovač AMC1211 od společnosti Texas Instruments. Menší nevýhodou je náchylnost na rušení okolními vlivy a složitost zapojení obvodu. Pomocí integrovaného obvodu AMC1211 bude řešeno načítání síťového napětí pro účely inovativního wattrouteru.

Následující obrázek č. 46 zobrazuje všechny výše popsané přípravky pro načítání síťového napětí s galvanickým oddělením.

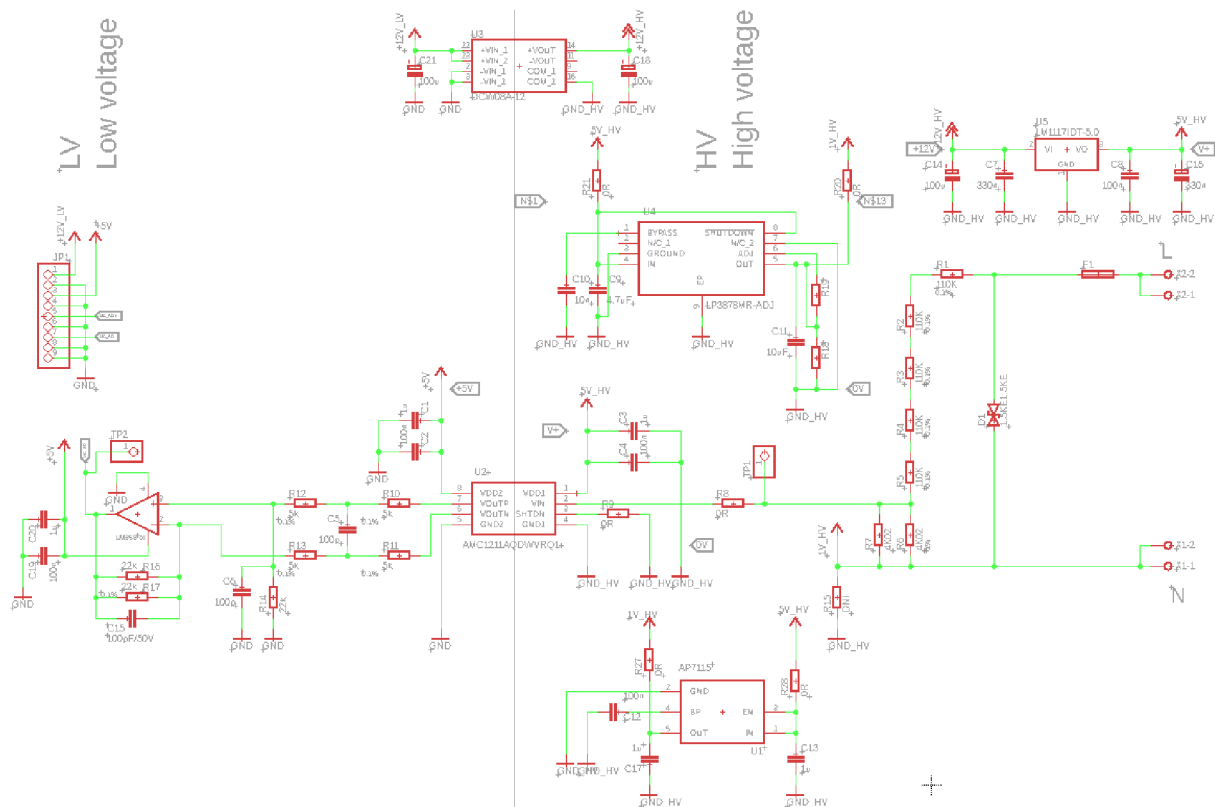


Obrázek 46: Přípravky pro načítání síťového napětí [zdroj: autor]:

- (a) transformátor K-2803GCE-1FL, (b) transformátor HAHN BV EI 305 2055, (c) senzor střídavého napětí ZMPT101B, (d) samostatný proudový transformátor ZMPT101B, (e) přípravek s optočlenem HCPL 4562, (f) přípravek s operačním zesilovačem AMC1211

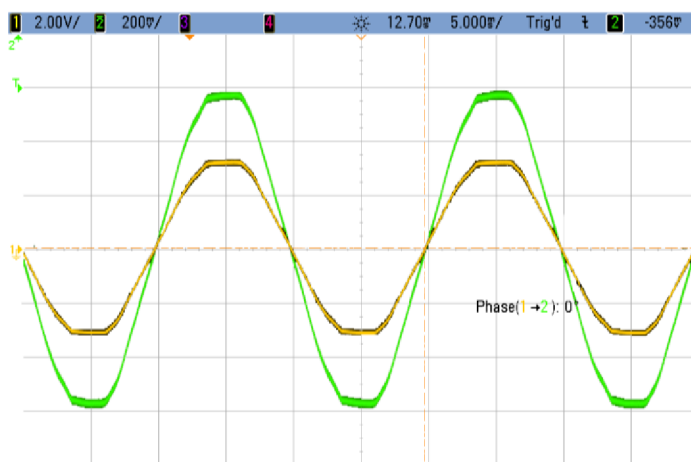
4.5.3 Návrh obvodu pro měření síťového napětí

Návrh obvodu pro měření síťového napětí s galvanickým oddělením vychází z teoretických předpokladů a výsledků tezí této disertační práce. Galvanické oddělení zaručí integrovaný obvod AMC1211 od společnosti Texas Instruments. Pro tento obvod je nutné upravit vstupní signál tak, aby byl v rozmezí 0–2 V. Snížení síťového napětí zaručuje odporový dělič s přesnými rezistory SMD (Surface Mount Device). Rezistory s přesností 0,1 % jsou využity z důvodu minimalizace zanesení chyby měření. Bezpečná izolační vzdálenost v části odporového děliče je dosažena použitím pouzdra rezistorů typu MINI MELF-0204W a rozložením vstupního napětí mezi několik rezistorů, které mají vývody dostatečně daleko od sebe. Odporový dělič je tvořen rezistory o velikosti 550 k Ω a 2001 Ω . Výstupní hodnota špičkového napětí ze vstupního odporového děliče je ± 1 V. Posunutí vstupního střídavého signálu plně do kladných hodnot zaručuje lineární stabilizátor AP7115 s pevným výstupem 1 V. Tímto způsobem je upraven vstupní signál do meze 0–2 V, kterou požaduje izolační zesilovač AMC1211. Na výstupu z AMC1211 je zapojen filtrační obvod a operační zesilovač, který zesílí výstupní signál na požadovanou úroveň. Výstupní signál je pak směřován na konektor, který bude sloužit pro propojení měřicího modulu a řídicí jednotky. Napájení obvodů v části s malým napětím je řešeno pomocí galvanicky odděleného zdroj DC-DC DCW08A-12, který přenáší do této části napětí o velikosti 12 V. V části je napětí dále upraveno pomocí lineárního stabilizátoru na hodnotu 5 V, která je potřebná pro napájení izolačního zesilovače AMC1211 a 1V zdroje AP7115. Pro laboratorní úkony je DPS v části s malým napětím vybavena regulátorem napětí LP3878MR-ADJ s nastavitelným výstupem, který slouží pro nastavitelnou regulaci posunu vstupního signálu do kladného kvadrantu. Schéma obvodu bylo navrženo pomocí softwaru EagleCad a je zobrazeno na obrázku č. 47.



Obrázek 47: Schéma zapojení měření síťového napětí [zdroj: autor]

Na obrázku č. 48 je zobrazen graf z osciloskopu, který zachycuje průběh vstupního signálu a výstupního signálu z přípravku s izolovaným zesilovačem AMC1211. Žlutě je zobrazen vstupní signál síťového napětí, který byl načítán pomocí napěťové sondy VOLTcraft PP-360 100:1 a zeleně je zachycen výstup z měřicího přípravku pomocí běžné osciloskopické sondy. Pomocí matematické funkce osciloskopu je zjištěna a na obrázku č. 48 zobrazena i hodnota fázového posunu obou signálů, jež je nulová.



Obrázek 48: Porovnání vstupního a výstupního napěťového signálu na měřicím přípravku [zdroj: autor]

Na základě výsledků měření byla pomocí softwaru EagleCad navržena DPS, která bude sloužit jako měřicí modul vyvíjeného wattrouteru. Software Fusion 360 umožňuje z navržené DPS vytvořit 3D model, pomocí kterého je možné lépe zkontrolovat rozmístění jednotlivých součástek. Po kontrole všech součástek a jejich jednotlivého rozmístění je DPS zadána do výroby.

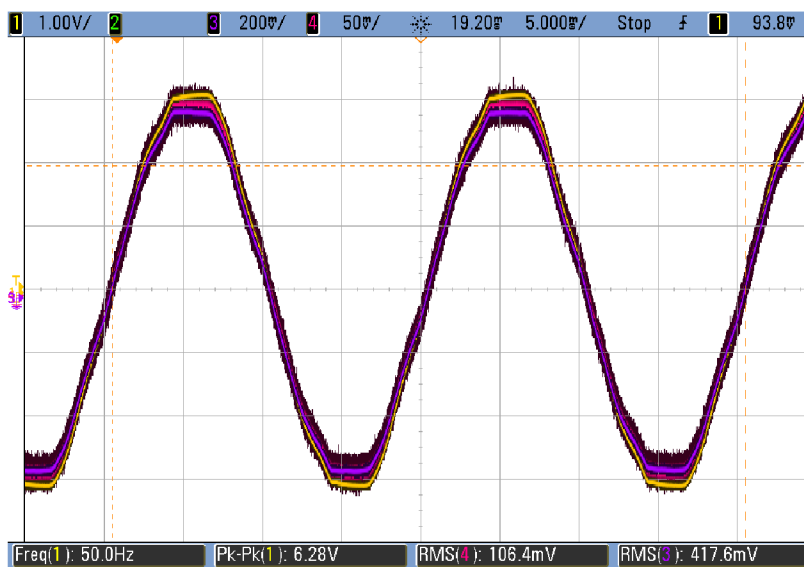
4.5.4 Přípravky pro měření proudu

Dalším dílčím požadavkem pro realizaci inovativního wattrouteru je návrh měření proudu tekoucího na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace. Na základě získaných dat z tohoto senzoru bude pomocí řídicí jednotky vyhodnocována velikost a směr toku proudu. Měřicí metoda musí z bezpečnostních důvodů zaručit galvanické oddělení od sítě. Wattroutery dostupné na trhu pro měření proudu využívají proudový transformátor. Hlavním kritériem výběru vhodného senzoru je jednoduchost implementace, přesnost, bezpečnost a možnost osazení do DPS. Na základě uvedených kritérií je vybrán senzor ZHT103X. Přesnost navrženého senzoru je porovnána s profesionální osciloskopickou proudovou sondou LEM HEME Type PR 30 CURRENT PROBE. Obrázek č. 49 zobrazuje graf z osciloskopu, který prezentuje výsledky měření porovnávající přesnost uvedených senzorů.

Měření je provedeno na laboratorní zátěži, kde fázový vodič prochází proudovým senzorem ZHT103X. Stejný vodič objímá klešťová sonda LEM HEME Type PR 30. Profesionální proudová sonda LEM HEME Type PR 30 je napájena 9V baterií a je připojena přímo do osciloskopu. Navržený senzor ZHT103X je pro správnou funkci osazen měřicím rezistorem, ze kterého je pomocí klasické osciloskopické sondy snímán požadovaný signál. Oba výše uvedené senzory převádějí proud tekoucí fázovým vodičem na napětí. Pro kontrolu byla k dané měřicí soustavě připojena napěťová sonda VOLTCRAFT PP-360 100:1, která zaznamenává průběh napětí na laboratorní zátěži tvořené reálným rezistorem.

Na obrázku č. 49 žlutý signál reprezentuje napěťovou sondu VOLTCRAFT PP-360 100:1, červený průběh je zaznamenán pomocí proudové sondy LEM HEME Type PR 30 a fialový průběh je načten pomocí proudového senzoru ZHT103X. Z měření je patrné, že průběh signálu, který je načten pomocí proudového senzoru ZHT103X není zásadně zkreslen a v podstatě odpovídá průběhu signálu z profesionální proudové sondy LEM HEME Type PR 30. Tvary signálů z obou senzorů odpovídají reálnému průběhu, který zaznamenává napěťová sonda VOLTCRAFT PP-360 100:1. K malé odchylce dochází pouze v oblasti „plata“ to je v oblastech

maxim a minim sledovaného signálu. Správnou kalibrací lze vliv tohoto rozdílu na výpočet činného výkonu eliminovat. Na základě těchto výsledků je stanoveno, že měření proudu na rozhraní distribuční sítě a domácí elektroinstalace bude prováděno pomocí senzoru ZHT103X.



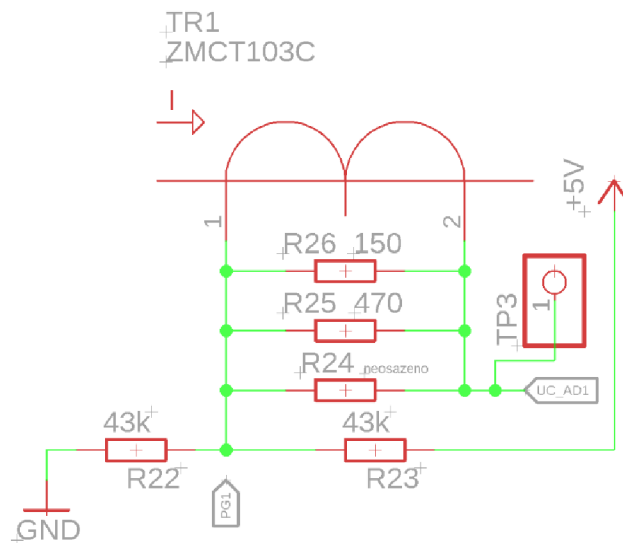
Obrázek 49: Ověření přesnosti proudového senzoru ZHT103X [zdroj: autor]

Pro možnost implementace měření proudu do měřicí DPS je vytvořeno schéma pomocí návrhového softwaru Eagle. Návrh obvodu pro měření proudu s možností implementace do inovativního wattrouteru je popsán v následující kapitole.

4.5.5 Návrh obvodu pro měření proudu

Pro účely měření proudu je vybrán proudový transformátor ZHT103X, který má převodový poměr 5 A / 5 mA. Rozsah tohoto transformátoru do 5 A limituje velikost regulovatelného výkonu prototypu inovativního wattrouteru na 1150 W. Pro vyšší výkony lze použít transformátor s větším rozsahem při zachování obvodového schématu. Pro možnost načtení celého průběhu střídavého signálu pomocí mikrokontroleru je nutné střídavý výstupní signál z proudového senzoru posunout do kladných hodnot. Potřebný posun je realizován pomocí zdroje stabilizovaného stejnosměrného napětí o velikosti 5 V a odporového děliče sestaveného z SMD rezistorů o velikosti odporů 43 k Ω . Odporový dělič je tvořen rezistory R22 a R23 a je zobrazen na obrázku č. 50. K proudovému senzoru ZHT103X je nutné připojit měřicí rezistor. Pro možnost ideálního nastavení měřicího rezistoru jsou k senzoru paralelně připojeny tři SMD rezistory R24, R25 a R26. Rezistor R24 není osazen hodnota rezistoru R25 je 470 Ω a hodnota rezistoru R26 je 150 Ω , jak je znázorněno na obrázku č. 50.

Pro možnost vytvoření kompaktní měřicí desky je proudový senzor umístěn na měřicí DPS, která bude sloužit jako měřicí modul vyvíjeného wattrouteru. Měřicí modul je tvořen samostatnou DPS, která umožňuje měřit napětí a proud na rozhraní distribuční sítě a domácí elektroinstalace. Schéma zapojení senzoru bude integrováno do celkového schématu měřicího modulu. Obrázek č. 50 zobrazuje kompletní schématické zapojení senzoru ZHT103X, kde je výstupní signál přiveden na konektor UC_AD1, který bude sloužit pro propojení měřicího modulu a řídicí jednotky. Tato část obvodu je také vybavena testovacím bodem TP3, který umožňuje snadné ověření správné funkcionality pomocí osciloskopu.



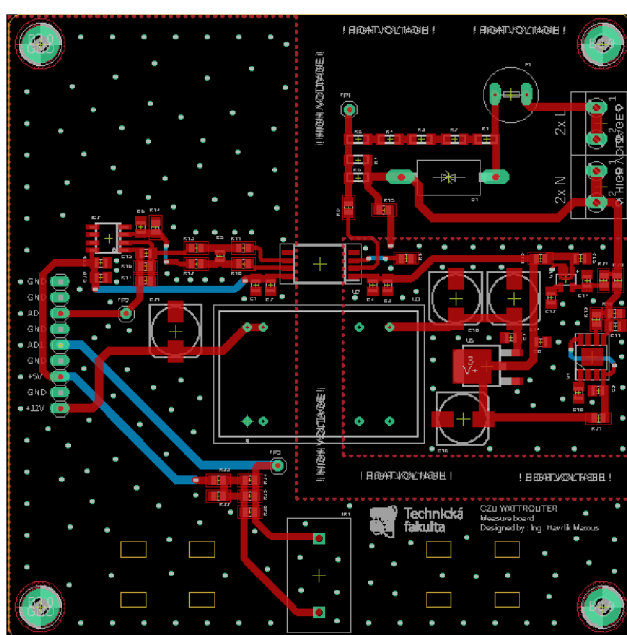
Obrázek 50: Schéma zapojení proudového senzoru ZHT103X [zdroj: autor]

4.6 Realizace měřicího modulu wattrouteru

Na základě návrhu jednotlivých obvodů pro měření proudu a napětí je pomocí programu Eagle navrženo celkové schéma měřicího modulu. Kompletní schéma měřicího modulu nově vyvíjeného wattrouteru je přiloženo v příloze této disertační práce. Z uvedeného schématu vychází návrh DPS měřicího modulu. Design desky plošných spojů byl také navrženo pomocí softwaru Eagle. Pro nově vyvíjený wattrouter je stanoveno, že jednotlivé jeho části budou navrženy na DPS o rozměrech 100×100 mm. Jednotlivé rozmístění a propojení daných součástí je zobrazeno na obrázku č. 51.

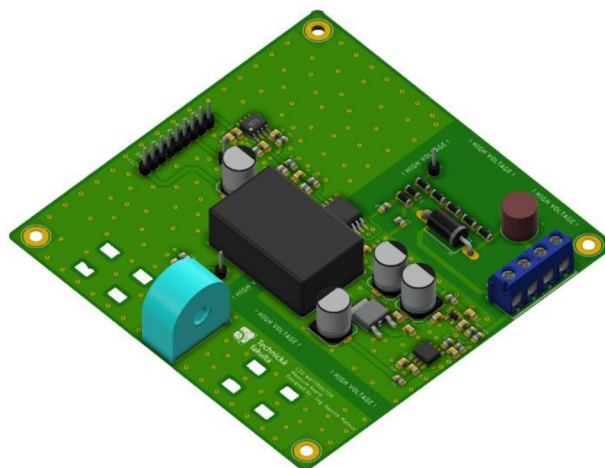
Měřicí modul wattrouteru potřebuje pro správnou funkci přivést na svorku L fázový vodič a na svorku N nulový vodič. Tím je zaručeno měření napětí na dané fázi. Proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace je měřen tak, že daný fázový vodič je provlečen skrz

proudový transformátor. Dále měřicí modul vyvíjeného wattrouteru potřebuje napájení 5 V a 12 V. Toto napětí je na DPS měřicího modulu přivedeno z modulu řídicí jednotky přes konektory +5V a +12V. Napětí 12 V je pomocí DC–DC měniče přivedeno i do nízkonapěťové části měřicího modulu. Tam je napětí 12 V stabilizováno na 5 V a slouží k napájení izolovaného zesilovače AMC1211 a obvodů zaručující posun vstupního napěťového signálu do kladných hodnot. Napětí 5 V v části s malým napětím slouží k posunu vstupního proudového signálu do kladných hodnot. Dále je potřeba na straně s malým napětím napájet operační zesilovač LM358 a izolovaný zesilovač AMC1211. Soupis součástek potřebných pro realizaci měřicího modulu je uveden v příloze č. 6.



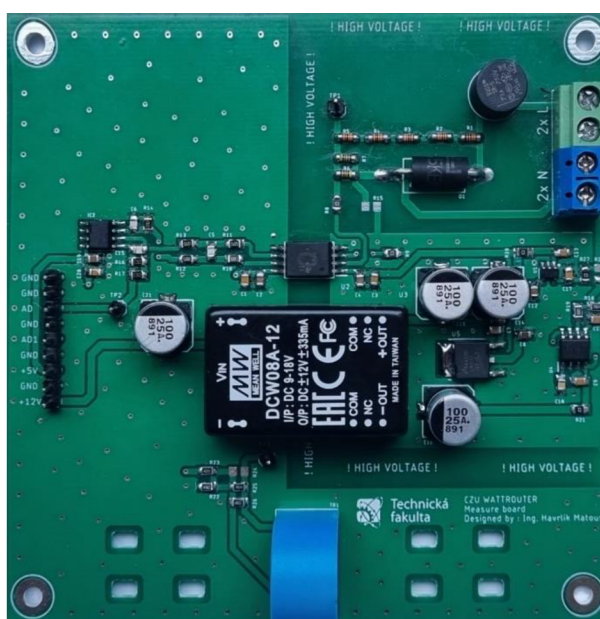
Obrázek 51: Návrh DPS měřicího modulu [zdroj: autor]

Návrh desky plošných spojů měřicího modulu inovativního wattrouteru je ověřen pomocí DRC (Kontrola pravidel návrhu). Tato možnost je implementována přímo ve vývojovém prostředí Eagle a kontroluje například dodržení bezpečných izolačních vzdáleností mezi nízkonapěťovou částí a částí s malým napětím. Pro detailní kontrolu rozmístění jednotlivých součástek je tento návrh převeden do 3D pomocí softwaru Fusion360. 3D model měřicího modulu je zobrazen na obrázku č. 52.



Obrázek 52: Měřicí modul wattrouteru ve 3D [zdroj: autor]

Obrázek č. 53 zobrazuje reálný měřicí modul vyvíjeného wattrouteru. Měřicí modul je osazen na dvouvrstvé DPS o velikosti 100×100 mm a tloušťce 1,6 mm. Součástky měřicího modulu jsou osazeny pouze z vrchní strany. Deska disponuje měřicími body pro snadné zachycení vstupního a výstupního signálu. Výřezy v DPS slouží pro možnost uchycení vodiče provlečeného skrze proudový transformátor.



Obrázek 53: Měřicí modul vyvíjeného wattrouteru [zdroj: autor]

4.7 Realizace řídicí jednotky wattrouteru

Vyhodnocení naměřených dat a řízení spínání přídatného spotřebiče zajišťuje řídicí modul wattrouteru. Tato část nově vyvíjeného wattrouteru je opět navržena na DPS o rozměrech

100 × 100 mm. Stejný rozměr DPS a stejné rozložení montážních děr umožňuje snadné stohování jednotlivých částí wattrouteru.

Hlavní komponentou řídicího modulu je mikrokontroler ATmega328 od společnosti Atmel v provedení SMD. Chod procesoru je řízen externím krystalem s frekvencí 16 MHz. Snadné programování procesoru je zajištěno pomocí USB-B konektoru a převodníku CH340G, který převádí komunikaci z USB na UART (Universal asynchronous receiver-transmitter).

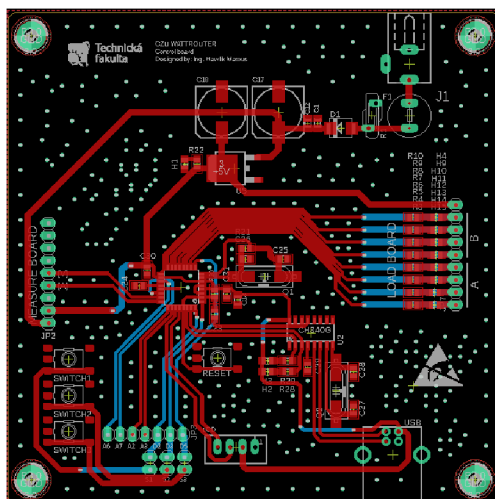
Napájení řídicího modulu je zajištěno pomocí externího 12 V zdroje. Toto napětí je na DPS řídicího modulu přivedeno přes konektor JACK 2,1 mm. Pro účely napájení procesoru je napětí sníženo na 5 V pomocí lineárního stabilizátoru LM117IDT-5.0. Tímto sníženým napájecím napětím je pomocí konektoru +5V napájena i část s malým napětím měřicího modulu wattrouteru. Hlavní napájecí napětí 12 V je z řídicí jednotky na měřicí modul wattrouteru distribuováno pomocí konektoru +12V.

Pro snadné zobrazení aktuálních hodnot jednotlivých proměnných je řídicí jednotka osazena konektorem s označením LCD. Pomocí tohoto konektoru je možné k řídicímu modulu připojit LCD o velikosti 16×2 nebo 20×4 s I²C (Inter-Integrated Circuit) modulem. Displej 16×2 umožňuje zobrazit 16 znaků na každém ze dvou řádků. Displej 20×4 umožňuje zobrazit 20 znaků na každém ze čtyř řádků. Tlačítka s označením SIWTCH1, SIWTCH2 a SIWTCH3, která jsou přes propojku S1, S2 a S3 připojena na vstupní piny mikroprocesoru ATmega328 jsou na DPS umístěna pro případné listování jednotlivými položkami zobrazovaných na LCD.

Naměřené hodnoty napětí a proudu jsou z měřicího modulu do řídicí jednotky přenášeny pomocí konektorů s označením UC_AD a UC_AD1. Na konektor s označením UC_AD je přiveden výstupní signál z obvodu měřicího napětí v domovní elektroinstalaci. Na konektor s označením UC_AD1 je přiveden výstupní signál z proudového transformátoru, který měří proud na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace. Tyto signály jsou přivedeny na 10bit A/D převodník, který je přímo integrován v procesoru ATmega328. A/D převodník zaručí převod analogových signálů na digitální. Získané digitální signály jsou zpracovány pomocí obslužného programu. DPS řídicí jednotky disponuje také 8 digitálními vstupně výstupními piny, které je možné použít pro spínání dodatečných spotřebičů nebo pro připojení ostatních periférií.

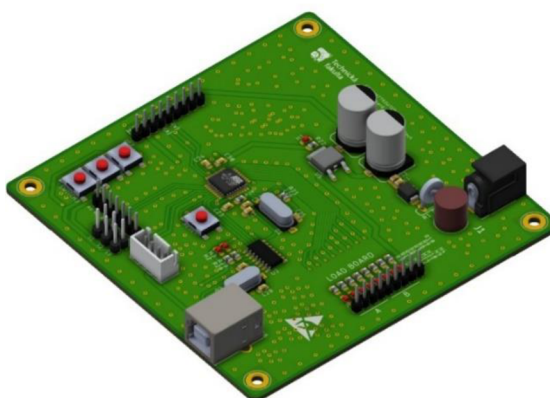
Celé schéma řídicí jednotky navržené v programu Eagle je zobrazené v příloze č. 2 této disertační práce. Při návrhu DPS řídicí jednotky je použit stejný postup jako při návrhu měřicího

modulu. Rozmístění jednotlivých komponent a jejich propojení je realizováno v softwaru Eagle. Detailní kontrola rozmístění komponent je provedena v 3D programu Fusion360. Potřebná data jsou do 3D návrhového programu Fusion360 exportována přímo z vývojového softwaru Eagle. Jednotlivé použité součástky ve svých knihovnách obsahují 3D modely, které následně umožňují generovat 3D model DPS. Obrázek č.54 zobrazuje návrh řídicí jednotky v softwaru Eagle. Soupis součástek potřebných pro realizaci řídicí DPS je uveden v příloze č. 7.



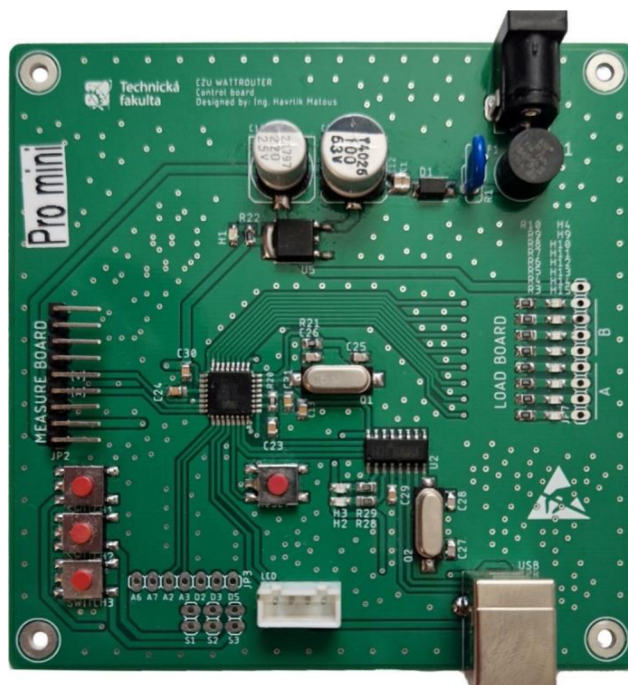
Obrázek 54: Návrh DPS řídicí jednotky [zdroj: autor]

Řídicí jednotka je osazena na dvouvrstvé DPS o velikosti 100×100 mm a tloušťce 1,6 mm. Součástky řídicí jednotky jsou osazeny pouze z vrchní strany. Návrh desky plošných spojů je opět zkontrolován pomocí DRC. Následně je vytvořen export dat do 3D návrhového programu Fusion360. Obrázek č. 55 zobrazuje 3D návrh řídicí jednotky, který umožňuje kontrolu a optimalizaci rozmístění jednotlivých komponent.



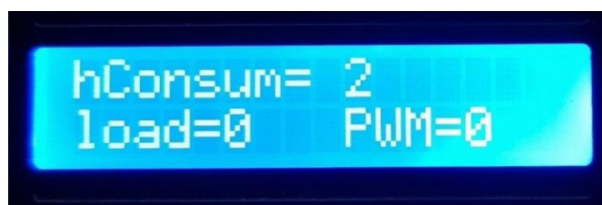
Obrázek 55: Řídicí jednotka wattrouteru ve 3D [zdroj: autor]

Obrázek č. 56 zobrazuje reálnou řídicí jednotku vyvíjeného wattrouteru. Montážní otvory jsou navrženy pro šroub M3, pomocí těchto montážních otvorů je možné propojit GND potenciál mezi jednotlivými deskami.



Obrázek 56: Řídicí jednotka inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

K řídicí jednotce je připojen LCD 16x2 pomocí sběrnice I²C, který zobrazuje aktuální spotřebu domácnosti. Tento údaj je na LCD označen jako „hConsum“. Dále je na LCD zobrazen údaj „load“, který zobrazuje aktuálně vyhrazeným spotřebičem odebíraný výkon (W) nastavený wattrouterem tak, aby došlo k vykompenzování nadvýroby elektrické energie a omezení proudu mezi domovním rozvodem a distribuční sítí na nulu. Poslední údaj, který je zobrazován na LCD je údaj „PWM“, který udává nastavení střídavého signálu (%). Způsob zobrazení výše uvedených hodnot na šestnácti znakovém dvouřádkovém LCD je patrný na obrázku č. 57.



Obrázek 57: LCD řídicí jednotky wattrouteru [zdroj: autor]

Pokud je hodnota „hConsum“ záporná je v domácnosti díky FVE nadbytek elektrické energie, která by mohla proudit do distribuční sítě. V případě detekce přetoku elektrické energie je ihned

spočtena velikost potřebného výkonu do zátěže „load“ a střída spínacího signálu „PWM“ tak, aby byla přebytečná energie ihned vykompenzována a nedošlo tak k nežádoucímu přetoku elektrické energie do distribuční sítě. Pokud je hodnota „hConsum“ kladná dochází v domácnosti k vyšší spotřebě elektrické energie, než dokáže dodat FVE. V tomto případě jsou hodnoty „load“ a „PWM“ nulové, tím je zajištěno že je vyhrazený spotřebič odpojen a nedochází ke zvýšení spotřeby elektrické energie.

4.7.1 Software řídicí jednotky

Řídicí jednotka inovativního wattrouteru je vybavena softwarem, který na základě získaných dat z jednotlivých senzorů počítá aktuální činný výkon. Dále se software stará o předání spočtených dat modulu obsluhující spínání přídavného spotřebiče. Jako první software nahrany v mikrokontroleru řídicí jednotky spustí autokalibraci, která se aktivuje vždy po připojení wattrouteru do sítě.

```
1 for (int cycle = 0; cycle < numberForAverage; cycle++){
2   sumVoltage = 0;
3   sumCurrent = 0;
4   numberOfSamples = 0;
5   startOfintegration= micros();
6   actualTime= startOfintegration;
7   while(actualTime - startOfintegration < 100000){
8     voltage = analogRead(A0);
9     current = analogRead(A1);
10    sumVoltage = sumVoltage + voltage;
11    sumCurrent = sumCurrent + current;
12    numberOfSamples++;
13    actualTime = micros();
14    if (actualTime < startOfintegration)
15      startOfintegration = startOfintegration - 4294967295;
16  }
17  voltageArray[cycle] = sumVoltage/numberOfSamples ;
18  currentArray[cycle] = sumCurrent/numberOfSamples;
19  }
20 for (int cycle = 0; cycle < numberForAverage; cycle++){
21   averageVoltage += voltageArray[cycle];
22   averageCurrent += currentArray[cycle];
23 }
24 averageVoltage=averageVoltage/numberForAverage;
25 averageCurrent=averageCurrent/numberForAverage;
```

Zdrojový kód 1: Autokalibrace inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

Autokalibrace spočte průměrnou hodnotu proudu a napětí z pěti period a tyto hodnoty následně uloží do proměnných „averageVoltage“ a „averageCurrent“ tak, aby mohly být použity pro výpočet činného výkonu v následující části programu. Část kódu, který řeší autokalibraci zobrazuje Zdrojový kód č. 1. Tato část kódu je umístěna ve smyčce „setup()“, která zajišťuje, aby se tato část spustila pouze po zapnutí inovativního wattrouteru. V hlavní části programu ve smyčce „loop()“ je pak počítán činný výkon. Na základě výpočtu činného výkonu, který je v programu označen jako „activePower“, je spočtena hodnota „load“, která určuje kolik energie je potřeba umožnit v přídavném spotřebiči. Následně je hodnota „load“ přepočtena na hodnotu „pwm“, která určí činitele plnění (Duty Cycle). Proměnná „pwm“ využívá funkci ceil(), díky které je vždy výsledné číslo zaokrouhleno na nejbližší vyšší celé číslo. Následně je hodnota proměnné „pwm“ odeslána do DPS obsluhující generování PWM signálu.

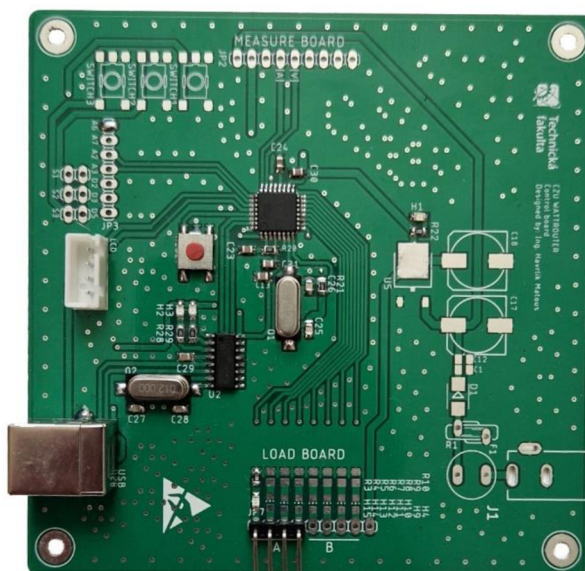
```
1 sumActivePower = 0;
2 numberOfSamples = 0;
3 activePower = 0;
4 startOfIntegration = micros();
5 actualTime = startOfIntegration;
6 while(actualTime - startOfIntegration <= 100000){
7   voltage = analogRead(A0);
8   current = analogRead(A1);
9   sumActivePower=sumActivePower+(voltage-averageVoltage)*(current-averageCurrent);
10  numberOfSamples++;
11  actualTime = micros();
12  if (actualTime < startOfIntegration)
13    startOfIntegration = startOfIntegration - 4294967295;
14 }
15 activePower = sumActivePower / numberOfSamples / 41861.16*1982.6;
16 load = (-(previousLoad-activePower)+(abs(previousLoad-activePower)))/2;
17 pmw = ceil(load*255/additionalAppliance);
18 if (pmw > 255)
19   pmw = 255;
20 Wire.beginTransaction(8);
21 Wire.write(int(pmw));
22 Wire.endTransmission();
```

Zdrojový kód 2: Výpočet činného výkonu inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

Hlavní část programu dále obsluhuje zobrazování jednotlivých hodnot na LCD a odesílání diagnostických dat po sériové lince do PC. Celý program obsluhující řídicí jednotku je v příloze č. 4 této disertační práce.

4.8 Realizace spínání zátěže

Pro spínání přídatného spotřebiče pomocí PWM signálu je využita DPS, která již byla navržena pro řídicí jednotku a odpovídá popisu výše. Deska plošných spojů pro spínání zátěže je osazena pouze nutnými součástkami pro zprovoznění PWM signálu s frekvencí 62,5 kHz na jednom z výstupu integrovaného obvodu ATmega32. Mikrokontroler ATmega32, který je na této DPS osazen přijímá data z řídicí jednotky pomocí I²C sběrnice, která je vyvedena na konektor LCD. Na základě přijatých dat nastavuje střidu PWM signálu na daném výstupu. Celkové schéma DPS, která generuje PWM signál na základě přijatých dat, je zobrazeno v příloze č. 3 této disertační práce. Osazená DPS určená pro generování PWM signálu je zobrazena na obrázku č. 58 a v příloze č. 8 je uveden soupis osazených součástek.



Obrázek 58: DPS pro generování PWM signálu s frekvencí 62,5 kHz [zdroj: autor]

4.8.1 Software spínací jednotky

DPS, která řídí spínání zátěže má upravený řídicí registr časovače tak, aby bylo možné co nejjednodušším způsobem navýšit frekvenci výstupního PWM signálu. Pro účely inovativního wattrouteru je navržena frekvence 62,5 kHz.

Řídicí registr časovače upravuje příkaz „`TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001`“, který zaručí, že na výstupním pinu č. 10 bude PWM signál o daném činiteli plnění s frekvencí 62,5 kHz. Software nahraný v mikrokontroleru ATmega32 dále umožňuje komunikaci s řídicí jednotkou po I²C sběrnici, která je obsluhována knihovnou „Wire.h“. Pomocí příkazu

„analogWrite(pwmPin,receivedPWM)“ je specifikováno na jakém výstupním pinu mikrokontroleru ATMeaga32 bude aplikován PWM signál. V proměnné „receivedPWM“ je uložena spočtená hodnota činitele plnění odpovídající aktuálnímu přebytku elektrické energie, který je potřeba umořit ve vyhrazeném spotřebiči, aby nedošlo k přetoku do distribuční sítě. Hodnota činitele plnění je zapisována do proměnné „receivedPWM“ pomocí I²C sběrnice z řídicí jednotky. Software ovládající spínání zátěže dále umožňuje odesílat diagnostická data po sériové lince do PC. Celý software, který ovládá spínání přídatného spotřebiče je zobrazen v následující části této disertační práce.

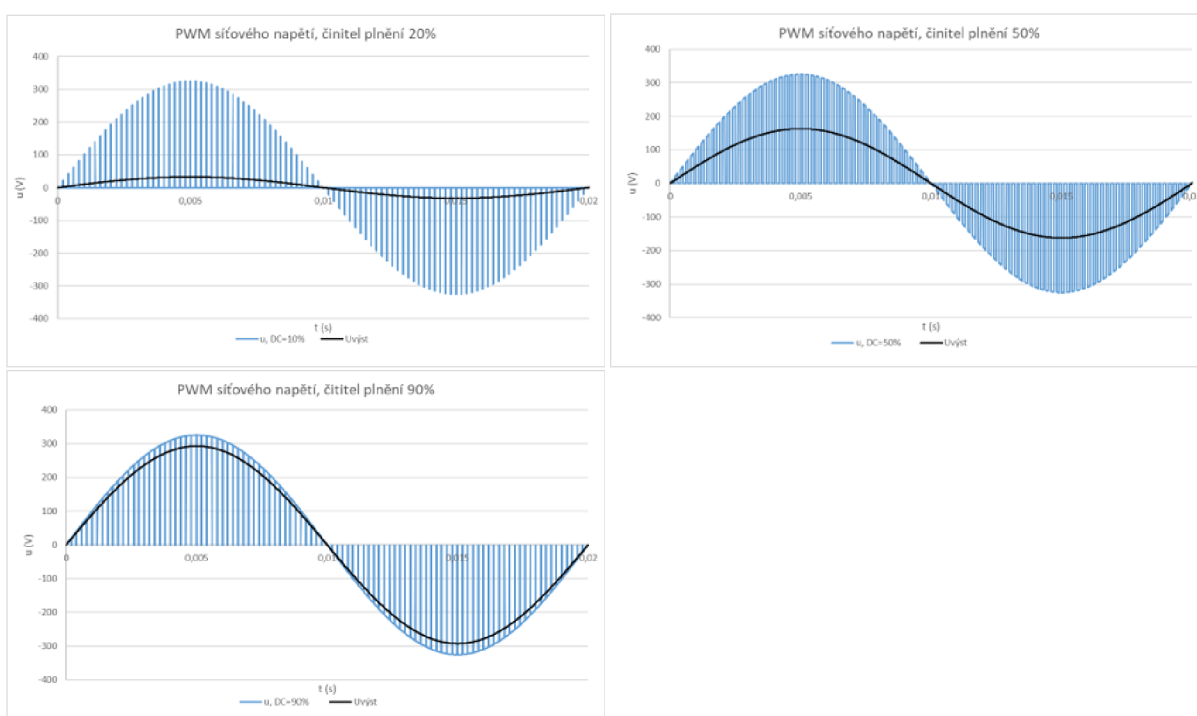
```
1 #include <Wire.h>
2 int pwmPin=6;
3 int receivedPWM = 0;
4
5 void setup() {
6   TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001;
7   pinMode(pwmPin,OUTPUT);
8   Wire.begin(8);
9   Wire.onReceive(receiveData);
10  Serial.begin(9600);
11 }
12
13 void loop() {
14   analogWrite(pwmPin,receivedPWM);
15 }
16
17 void receiveData(int byteCount) {
18   while (Wire.available()) {
19     receivedPWM = Wire.read();
20   }
21   //Serial.print("Přijato: ");
22   //Serial.println(receivedPWM);
23 }
```

Zdrojový kód 3: Ovládání spínacího prvku pomocí PWM signálu [zdroj: autor]

PWM signál generuje mikroprocesor na výstupní pin č. 10. Stavové hodnoty PWM signálu jsou 0 V a 5 V. Signál je v této formě vstupním signálem pro driver ovládající tranzistor spínající síťové napětí. Činitel plnění PWM signálu nabývá na intervalu 0–100 % 255 diskretních hodnot. Velikost činitele plnění PWM signálu je aktualizována po každém odměru pěti period síťového napětí. Změna činitele plnění kompenzuje velikost a polaritu hodnoty činného výkonu vypočteného z průběhu proudu a napětí během pěti předcházejících period.

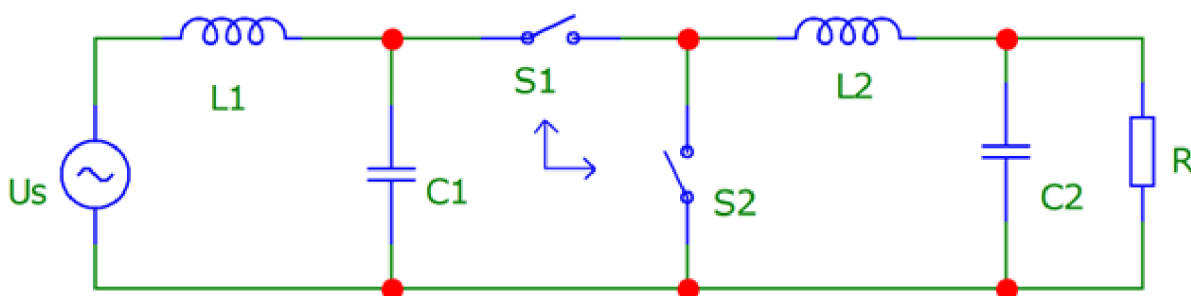
4.8.2 AC chopper – PWM modulátor průběhu síťového napětí

Řízení spotřeby vyhrazeného spotřebiče inovativního wattrouteru podle aktuální nadvýroby pomocí AC/AC měniče je založeno na principu AC chopperu. AC chopper je zde využit pro plynulou změnu střední hodnoty střídavého výstupního napětí na základě šířky řídicích impulzů. Změnou činitele plnění (Duty Cycle) PWM signálu od 0 % do 100 % dochází ke změně výstupní efektivní hodnoty napětí v rozsahu 0–230 V. [49] Následující grafy zobrazené na obrázku č. 59 znázorňují předpokládaný průběh síťového napětí modulovaného chopperem pomocí PWM modrou barvou a průběh výstupního napětí po odfiltrování nežádoucích frekvencí při činiteli plnění 20, 50 a 90 % černou barvou.



Obrázek 59: Úroveň výstupního signálu při určitém činiteli plnění (20, 50 a 90 %) [zdroj: autor]

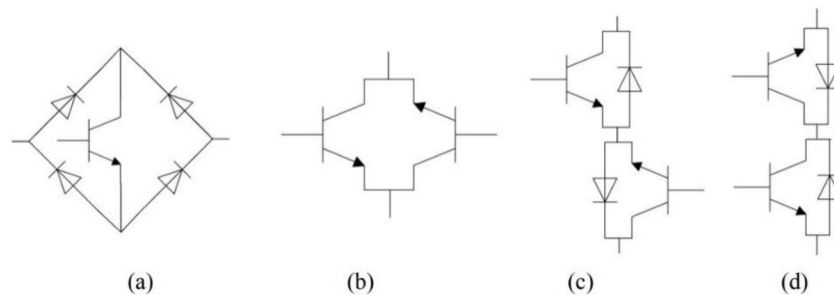
Pro realizaci AC chopperu byla zvolena nejjednodušší topologie podle obrázku č. 60.



Obrázek 60: Základní schéma AC chopperu [50]

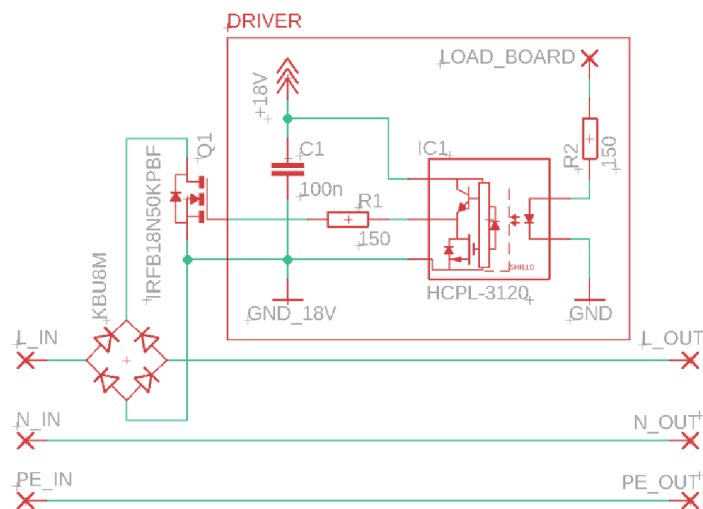
Kde: $S1$ slouží jako spínací prvek zajišťující PWM modulaci vstupního signálu. $S2$ slouží pro spínání freewheeling obvodu. $L1$ a $C1$ jsou prvky vstupního filtru a $L2$ a $C2$ jsou prvky výstupního filtru. [50]

Z možných dostupných konstrukčních řešení spínacího prvku $S1$ pro PWM modulaci signálu byl pro jednoduchost řízení vybrán obvod $a)$ s jedním tranzistorem a čtyřmi usměrňovacími diodami viz obrázek č. 61 [51]



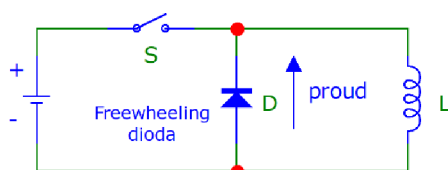
Obrázek 61: Konstrukční řešení spínacího prvku $S1$ s jedním nebo dvěma tranzistory pro střídavé průběhy napětí [51]

Spínací prvek pro PWM modulaci síťového napětí byl realizován tranzistorem IRFB18N50KPBF a běžným integrovaným dvoucestným usměrňovačem KBU8M, jelikož je diodami usměrňován 50Hz síťový průběh napětí. Řídicí deskou vygenerovaný PWM signál je přiveden přes rezistor do integrovaného obvodu HCPL-3120, který slouží jako budič výkonového tranzistoru. Schéma obvodu, které realizuje PWM modulaci vstupního síťového napětí inovativního wattrouteru, je zobrazeno na obrázku č. 62.



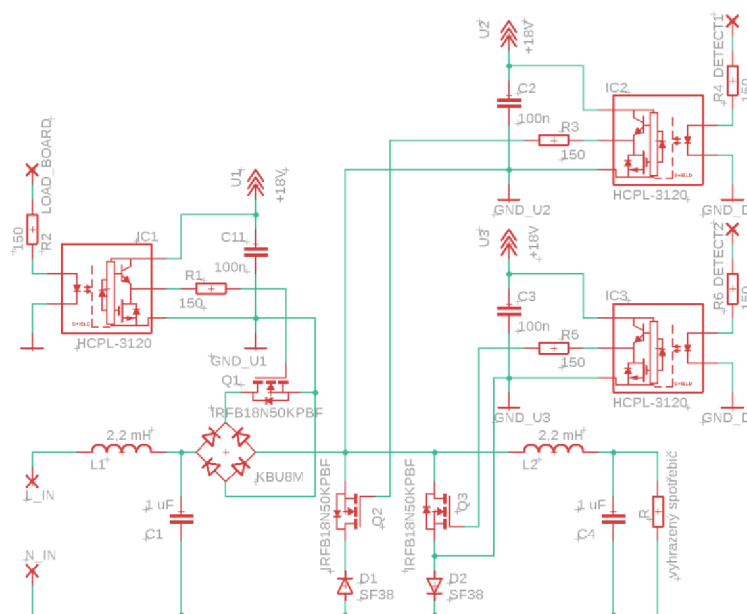
Obrázek 62: Obvod pro PWM modulaci průběhu síťového napětí [zdroj: autor]

Spínací prvek $S2$ zajišťující kontinuitu proudu cívku $L2$ výstupního filtru při spínání a rozpínání prvku $S1$ byl nejprve realizován stejným způsobem jako $S1$. Jelikož v tomto případě diody musí usměrňovat střídavé napětí o frekvenci odpovídající PWM modulaci, tedy 62,5 kHz, bylo nutné použít velmi rychlé diody. Ukázalo se, že je velmi obtížné synchronizovat spínací prvky $S1$ a $S2$. Od tohoto řešení bylo upuštěno. Následně byl navržen obvod vycházející z principu fungování tzv. „freewheeling“ diody používané ve spínaných zdrojích. Schéma zapojení této diody je na obrázku č. 63. Dioda zajistí nepřerušeni proudu cívku po otevření spínacího prvku a tím zamezí vzniku nežádoucích naindukovaných napěťových špiček, jež by mohly zničit spínací prvek či jiné části obvodu. [52] [53]



Obrázek 63: Jednoduché schéma s freewheeling diodou v obvodu se spínacím prvkem a indukčností [54]

V případě wattrouteru je modulované napětí střídavé. Pro každou polaritu spínaného napětí je potřeba vlastní freewheeling dioda zapojená v patřičném směru. To, že bude každá dioda aktivní jen pro odpovídající polaritu spínaného napětí, zajistí spínací tranzistor obsluhující danou diodu. Komplementární spínání tranzistorů odpovídá střídání polarity modulovaného síťového napětí. Schéma zapojení výsledného AC chopperu je na obrázku č. 64.



Obrázek 64: Schéma výsledného AC chopperu [zdroj: autor]

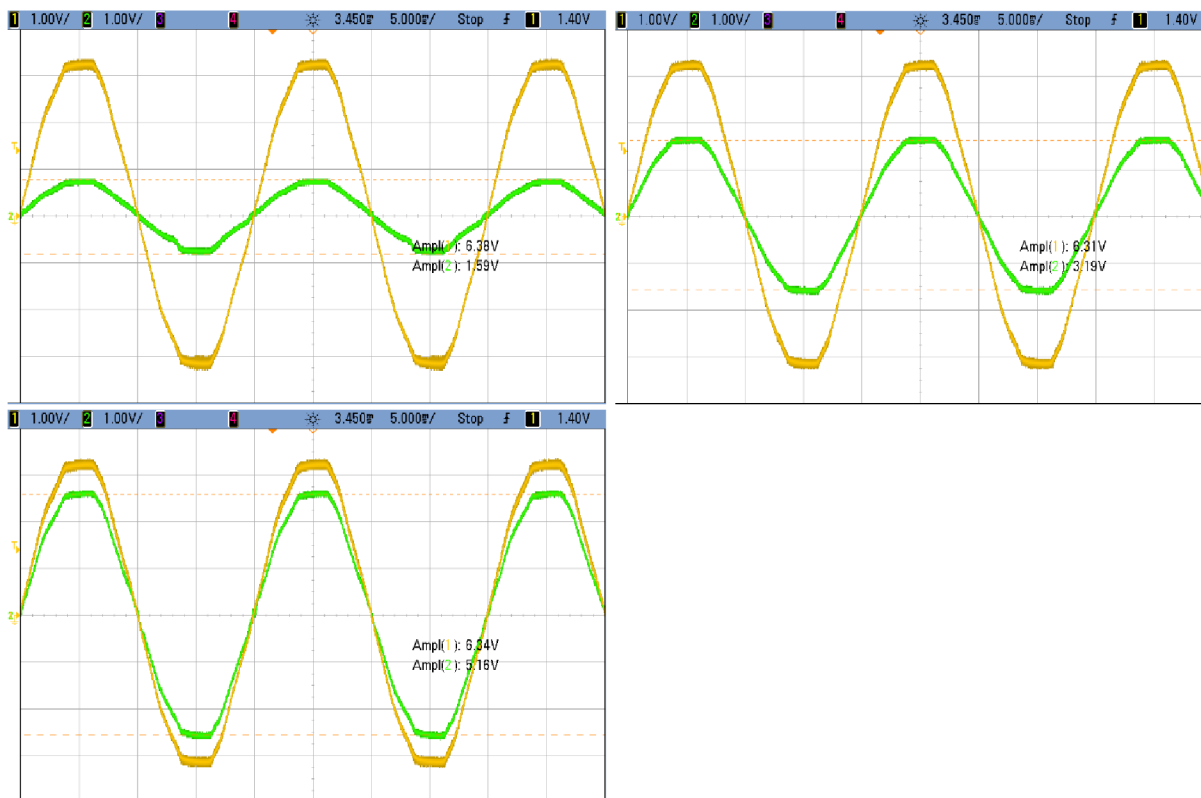
Kde: $L1$, $C1$ slouží jako vstupní filtr, $L2$, $C2$ jako výstupní filtr, diodový můstek s tranzistorem $Q1$ jako spínací prvek pro PWM modulaci síťového napětí, $D1$ je freewheeling dioda pro kladnou půlvlnu síťového modulovaného napětí, $Q2$ spínací tranzistor s ochrannou diodou pro $D1$, kdy $Q2$ je sepnutý při kladné polaritě síťového napětí, $D2$ je freewheeling dioda pro zápornou půlvlnu síťového modulovaného napětí, $Q3$ spínací tranzistor s ochrannou diodou pro $D2$, sepnutý při záporné polaritě síťového napětí. IC1, IC2 a IC3 slouží jako budiče výkonových tranzistor

Tranzistor $Q1$ je sepnut po celou dobu kladné půlvlny a tranzistor $Q2$ je sepnut po celou dobu záporné půlvlny síťového napětí. Spínání tranzistorů $Q2$ a $Q3$ může zajišťovat samostatný obvod detekující polaritu síťového napětí na kondenzátoru $C1$, čímž je eliminován fázový posun průběhu napětí způsobený cívkou $L1$. V prototypu bylo ale využito softwarové řešení detekce polarity vstupního napětí implementované do hlavního programu řídicí jednotky, neboť fázový posun napětí byl malý.

4.8.3 Vstupní a výstupní filtr

PWM modulace síťového napětí generuje v proudovém průběhu množství vyšších frekvenčních složek počínaje základní modulační frekvencí. Tyto složky je nutné na vstupu a výstupu chopperu eliminovat, aby nevstupovaly ani do rozvodů sítě ani do přívodu i samotného vyhrazeného spotřebiče. Na vstupu a výstupu chopperu lze použít jednoduchý LC filtr, pro který byly navrženy hodnoty indukčnosti cívky 2,2 mH a kapacity kondenzátoru 1 μ F zaručující dostatečný útlum nežádoucích frekvenčních složek. Výpočet LC filtru jako dolní propusti byl proveden online webovou aplikací Redexpert firmy Würth Elektronik s požadavkem na útlum minimálně 30 dB na frekvenci 62,5 kHz. [55]

Funkčnost AC/AC měniče s PWM modulací s navrženými vstupními a výstupními filtry byla otestována pomocí měření na osciloskopu. Reálné měření na AC chopperu s příslušnými LC filtry je zobrazené na obrázku č. 65, kde žlutá křivka znázorňuje průběh vstupního síťového napětí a zelené křivky odpovídají výstupním průběhům napětí z AC chopperu pro tři různé hodnoty činitele plnění PWM (20, 50 a 80 %). Naměřené grafy, prokazují velmi dobré odfiltrování nežádoucích frekvenčních složek u všech výstupních průběhů.



Obrázek 65: Měření výstupního a výstupního napěťového průběhu při určitém činiteli plnění (20, 50 a 80 %) [zdroj: autor]

Další významné rušení vzniká v okamžicích spínání a rozpínání choppovacího tranzistoru. Toto rušení má odlišný charakter a je nutné ho potlačit EMI (Electromagnetic Interference) filtrem. Jelikož vhodný EMI filtr nebyl v rámci práce realizován, bylo nutné pro potřeby testování v reálném provozu s připojením zařízení do sítě omezit tento typ rušení jiným způsobem. Velikost nežádoucích frekvenčních složek generovaných rychlým spínáním a rozpínáním tranzistoru při PWM modulaci napěťového signálu závisí na rychlosti sepnutí či vypnutí. Zpomalením tohoto přechodu lze generované špičky omezit. Toho bylo dosaženo zvětšením odporu omezujícího proud do brány tranzistoru. Tato provizorní změna parametru rezistoru způsobující zpoždění úplného otevření a zavření tranzistoru vedla k omezení rozsahu regulovatelného výstupního napětí z 0–100 % na přibližně 15–100 %.

Pro konstrukci prototypu zařízení byly použity tlumivky P MEC s železoprachovým jádrem dimenzované na nominální proud 4 A s průřezem vodiče $0,64 \text{ mm}^2$. [56] Maximální výkon prototypu je tímto omezen na 920 W. Prvky LC filtrů jsou zde velmi kompaktní. Pro větší výkony je nutné použít tlumivky s větším průřezem vodiče vinutí, čímž by se úměrně zvětšovala jejich velikost.

5 Výsledky a diskuse

Nově navržený wattrouter by měl odstranit dva předpokládané zásadní nedostatky stávajících komerčních wattrouterů spínajících vyhrazenou zátěž po periodách: a) cílené využívání přetoků energie do sítě, b) generování nežádoucích frekvenčních složek proudu. Wattroutery jsou typicky nasazovány v případě, že daná spotřebitelská jednotka s vlastní FVE nemá smlouvu o odběru výroby FVE s dodavatelem elektrické energie a jakákoliv forma přetoku, byť elektroměrem nedetekovaná je tudíž nepřípustná. Hypotézou je, že spínání po periodách, kdy se na rozhraní sítě a spotřebitelské jednotky střídají periody odběru a dodávky vede ke generování množství frekvenčních složek proudu, které by v případě většího nasazení standardního typu wattrouteru mohlo vést k zásadnímu zhoršení parametrů sítě.

Výše uvedená hypotéza byla ověřena jak matematickými modely, tak měřeními reálných proudových průběhů za současného výpočtu frekvenčních složek rychlou Fourierovou transformací pomocí osciloskopu. Při spínání po periodách dochází ke generování širokého spektra nežádoucích proudových složek. Navržený inovativní způsob řízení spotřeby zaručuje, že aktuální přebytečná nadvýroba z FVE je okamžitě celá umořována ve vyhrazeném spotřebiči. Nedochozí tedy k žádnému přetoku elektrické energie do distribuční sítě a je zároveň zamezeno vzniku a šíření nežádoucích frekvenčních složek, které způsobují komerční wattroutery spínáním po periodách. Nežádoucí frekvenční složky vznikající u inovativního wattrouteru pulsně šířkovou modulací průběhu síťového napětí „direct AC chopperem“, jsou odfiltrovány vstupním a výstupním filtrem.

Primárním cílem této disertační práce je návrh a realizace regulačního prvku (wattrouteru), který bude možné připojit do rozvodu domácnosti s vlastní FVE a DC/AC měničem. Navržený wattrouter bude sloužit jako prvek, který vhodným řízením spotřeby vyhrazeného spotřebiče zamezí přetoku nadbytečné elektrické energie z fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě, ale na rozdíl od stávajících wattrouterů nebude spínat po periodách. U inovativního wattrouteru nebude docházet k fyzickým přetokům energie do sítě a nebude generovat nežádoucí frekvence.

Primární cíl disertační práce je splněn. Prototyp inovativního wattrouteru je navržen pomocí vývojového software EagleCad. Kde jsou jeho jednotlivé části zkonstruovány na oboustrannou DPS o rozměrech 100 × 100 mm. Jednotlivé části wattrouteru je možné stohovat na sebe tak, aby bylo možné celý wattrouter umístit na DIN lištu v elektrickém rozvaděči a snadno připojit

ke stávajícímu fotovoltaickému systému. Prototyp wattrouteru disponuje jedním výstupem generující PWM signál, který na základně naměřených dat upravuje střidu PWM signálu do AC chopperu (řízení spínání vyhrazeného spotřebiče) a tak zaručuje, že je veškerá nadbytečná elektrická energie vyráběná z FVE umožena ve vyhrazením spotřebiči.

Dílčím cílem disertační práce je softwarové vybavení wattrouteru, které bude zajišťovat veškerou funkčnost celého zařízení. Vyvíjené zařízení bude postaveno na mikroprocesoru od společnosti Atmel. Konkrétně bude využit 8bitový mikrokontroler ATmega328p, který disponuje 10bitovým A/D (analogově/digitálním) převodníkem. Pomocí A/D převodníku budou načítány vstupní signály napětí a proudu. Mikroprocesor disponuje také výstupními piny, pomocí kterých budou ovládány výkonové prvky spínající vyhrazený spotřebič. Potřebný software bude naprogramován a zkompilován pomocí vývojového nástroje Visual Studio Code.

Jak hypotéza, tak primární cíl byly splněny, což znamená, že i dílčí cíl této práce byl dosažen. Veškerá logika wattrouteru je naprogramována pomocí jazyku Wiring ve vývojovém prostředí Visual Studio Code. Kompletní kód, který je v příloze této disertační práce je zkompilován a nahrán do mikrokontroleru ATmega328P. Mikrokontroler ATmega328P disponuje 10bitovým A/D převodníkem, který umožňuje získat měřená dat z jednotlivých senzorů v digitální podobě. Získána data jsou pak zpracována a vyhodnocena pomocí naprogramovaného algoritmu.

Dalším cílem disertační práce bylo porovnání bezpečných metod načítání nízkého napětí a proudu na rozhraní distribuční sítě a domovní elektroinstalace jako součást návrhu inovativního wattrouteru. Porovnávány byly jednotlivé senzory založené na různých principech fungování a následně byly vybrány vhodné senzory na základě složitosti implementování do prototypu wattrouteru a velikosti chyby měření. Pro načítání proudu je zvolen proudový transformátor ZHT103X a pro načítání nízkého napětí je zvolen izolovaný zesilovač AMC1211 od společnosti Texas Instruments. Tyto prvky zaručují galvanické oddělení od sítě nízkého napětí a jejich přesnost je dostačující pro vyvíjené zařízení.

Komplexním cílem této disertační práce bylo navrhnout a otestovat wattrouter do 5 kW. Disertační práce se zabývá problematikou současných wattrouterů a jejich vlivy na distribuční síť. Většina zařízení, která jsou dnes dostupná na trhu umožňují maloodběrateli využívat veškerou nadvýrobu z vlastní fotovoltaické elektrárny tím způsobem, že pokud wattrouter

detekuje přetok elektrické energie do distribuční sítě, začne spínat vyhrazený spotřebič po periodách.

Součástí výzkumu je matematická analýza, která v této disertační práci popisuje problematiku spínání přídavného spotřebiče po periodách. Studie ukazuje, že wattroutery využívající výše zmíněný způsob spínání generují velké množství frekvenčních složek v širokém frekvenčním pásmu do distribuční sítě. Nejvýraznější frekvenční složky se vyskytují v pásmu 1–100 Hz. Matematická analýza byla ověřena v reálném provozu na wattrouteru Greenbono AKU. Výsledné grafy získané pomocí osciloskopu a funkce FFT, potvrzují teoretické předpoklady a zobrazují reálná frekvenční spektra, která jsou generována spínáním vyhrazených spotřebičů po periodách do distribuční sítě.

Disertační práce také popisuje inovaci wattrouteru, která zamezuje fyzickým přetokům nadvýroby do distribuční sítě. Pro princip spínání po periodách současných wattrouterů jsou fyzické přetoky do distribuční sítě nezbytné. Současné wattroutery během period sepnutí umožňují spotřebiči čerpat energii z nadvýroby a zbytek potřebné energie je doplňován odběrem z distribuční sítě. Během period, kdy je spotřebič vypnutý, naopak nadvýroba do distribuční sítě přetéká a vrací tak zpět energii ze sítě odebranou v periodách sepnutí. Stávající wattroutery takto využívají dlouhého integračního okna elektronických fakturačních elektroměrů. V rámci této integrační doby wattrouter zajišťuje nulovou energetickou bilanci odběrů a přetoků a elektroměr proto není schopen fyzické přetoky do sítě registrovat. Inovativní princip spínání je založen na principu AC/AC měniče s proměnným výstupním napětím o síťové frekvenci. V případě nadvýroby udržuje wattrouter změnou výstupního napětí přetok do distribuční sítě na nule. AC/AC měnič je realizován jako AC chopper s PWM modulací síťového napětí o frekvenci 62,5 kHz se vstupním a výstupním filtrem.

Přesnost wattrouteru je ovlivňována senzory, které měří vstupní napětí a proud. Část výzkumu této disertační práce se zabývá porovnáním přesnosti jednotlivých napěťových senzorů s ohledem na jejich přesnost, bezpečnost a použití v mikroprocesorové technice. Tato část studie ukazuje, s jakou přesností je možné měřit síťové napětí.

Ověření hypotézy bylo provedeno pomocí osciloskopu v laboratoři katedry fyziky, kde byly sledovány proudy na rozhraní distribuční sítě. Prototyp inovativního wattrouteru implementovaný do silového rozvaděče je zobrazen na obrázku č. 66. V příloze č. 5 je detailní pohled na odkrytý wattrouter.



Obrázek 66: Prototyp inovativního wattrouteru [zdroj: autor]

Na začátku studia byl proveden průzkum nejen českého, ale i zahraničních trhů. Byly nalezeny jen zařízení pracující na principu spínání po periodách. Po skončení vývoje inovativního wattrouteru s navrženým řízením spotřeby PWM modulací síťového napětí byly při opakovaní průzkumu trhů s využitím umělé inteligence nalezeny dva zahraniční výrobky, které zřejmě nějakým způsobem používají metody navržené v disertační práci. Prvním je výrobek Power Diverter, model 2 od firmy Immersun, který výrobce uvedl na trh během doktorského studia jako nástupce modelu 1. Výrobce uvádí jako metodu řízení výkonu PWM. Bližší informace nejsou dostupné. Druhým výrobkem je Eddi firmy Myenergi. Kdy byl výrobek uveden na trh se nepodařilo zjistit. Firma na jaře 2023 z důvodu zadlužení ukončila svoji činnost. Tento již nevyráběný produkt dle propagačních materiálů výrobce používá k regulaci výkonu technologii „VariSine™ – pure sine wave PWM“, což by mohlo odpovídat navržené metodě v disertační práci. Podrobnější informace ani zde nejsou dostupné.

6 Závěry a doporučení pro využití poznatků v praxi nebo pro další rozvoj oboru

Většina stávajících wattrouterů používá k regulaci spotřeby nadvýroby nevhodné metody (spínání přídavného spotřebiče po periodách). Prvním nedostatkem této metody je cílené využívání přetoků do sítě kompenzující odběry energie ze sítě během period sepnutí vyhrazeného spotřebiče. Druhým nedostatkem je, že činností zařízení je produkováno široké spektrum frekvenčních složek proudového signálu. Širší uplatnění tohoto typu wattrouteru by mohlo být z hlediska energetické sítě problematické.

Byla navržena jednoduchá metoda řízení spotřeby nadvýroby, která umožňuje trvalé připojení spotřebiče, který se spolu s wattrouterem z pohledu rozvodu, k němuž je připojen, chová jako proměnná lineární zátěž. Vlastnímu přídavnému spotřebiči s neměnným odporem je předřazen regulovatelný AC–AC měnič napětí. Podle aktuální nadvýroby je nastavováno výstupní střídavé napětí tak, aby spotřebič umožňoval právě aktuální nadvýrobu. Jelikož měnič využívá PWM modulaci síťového napětí se spínací frekvencí v řádu desítek kHz, je měnič opatřen na vstupu i výstupu vhodnými frekvenčními filtry.

Bylo navrženo a realizováno zařízení využívající metodu řízení výstupního střídavého napětí pro napájení vyhrazeného spotřebiče. Testy v reálném provozu prokázaly vhodnost této metody. Výhodou tohoto zařízení jsou i nízké výrobní náklady.

7 Seznam vědeckých publikací

7.1 Vědecké publikace v recenzovaných impaktovaných časopisech:

Havrlík, M.; Libra, M.; Poulek, V.; Kouřim, P. Analysis of Output Signal Distortion of Galvanic Isolation Circuits for Monitoring the Mains Voltage Waveform. *Sensors* 2022, 22, 7769. <https://doi.org/10.3390/s22207769>

Daneček, M.; Havrlík, M.; Beránek, V.; Šafránková, J.; Libra, M.; Poulek, V.; Sedláček, J.; Belza, R. Design and data comparison of the photovoltaic power plants in the southern and northern hemispheres. *Agronomy Research* 2020. <https://doi.org/10.15159/ar.20.096>

7.2 Konference

- XXII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS 2020
 - UNIQUE PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS
- XXIII. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS 2021
 - ON-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN PRAGUE – 10 KWP
- BioPhys Spring 2020
 - DATA EVALUATION OF THREE UNIQUE PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

7.3 Zahraniční stáž a spolupráce s komerční sférou:

- Zahraniční stáž 2021 Slovinsko
- Science camp 2022 Indonésie

8 Bibliografie

- [1] *Fotovoltaika - sluneční záření v České republice. Isofen Energy - titulní stránka* [online]. In: . 2009 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
- [2] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [3] VOBOŘIL, David. Příčiny solárního boomu v České republice. In: *OENERGETICE.cz* [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/priciny-solarniho-boomu>
- [4] *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. In: . [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/>
- [5] Sluneční elektrárny, stav k 31.03.2023. In: *ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD* [online]. 2023 [cit. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/vyvoj-poctu-provozoven-instalovaneho-vykonu-podporovanych-zdroju-energie-ke-dni-31032023>
- [6] NOS, Filip. Základní možnosti připojení fotovoltaické elektrárny. Se sítí nebo bez ní?. In: *ESTAV.cz* [online]. c2014–2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6456.fotovoltaika-jak-se-lisi-zarizeni-pro-primou-spotrebu-a-pro-prodej-elektricke-energie-do-site>
- [7] *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers*. 2nd ed. London: Earthscan, 2008. ISBN 978-184-4074-426.
- [8] Pro výrobce: Průvodce procesem připojení výrobní. In: *ČEZ Distribuce* [online]. 2022 [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-vyrobce>
- [9] Wattrouter. In: *Lunke* [online]. 2022 [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://res.cloudinary.com/lunek/image/upload/v1519911359/mvbtrgb5jangzimkamxa.png>
- [10] SOLAR CONTROLS S.R.O. *Školení WATTROUTER®* [online]. In: . 2021 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://youtu.be/cTQPTZWYtMA>
- [11] *YORIX s.r.o.* [online]. 1998 [cit. 2022-10-09]. Dostupné z: <http://www.yorix.cz/cz/home/index.htm>

- [12] *Solarcontrols.cz* [online]. c2010-2013 [cit. 2022-10-09]. Dostupné z: https://solarcontrols.cz/cz/wattrouter_models.html
- [13] A-Z TRADERS e-shop. In: *Aztraders* [online]. [cit. 2022-10-09]. Dostupné z: https://www.aztraders.cz/files/prod_files/manual-azrouterv2_v4.pdf
- [14] Elektrický proud v dějinách lidstva: Kdo objevil elektřinu a proč se jí lidé báli?. In: *Elektrina.cz* [online]. c2014–2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/elektricky-proud-a-historie-elektriny>
- [15] Elektroměry Historie a současnost. In: *PREměření* [online]. 2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.premereni.cz/Files/dulezite-informace/ke-stazeni/tiskoviny-ke-stazeni/elektromery-historie-a-soucasnost/>
- [16] Chytré elektroměry zvládnou odhalit podvodníky. Budou součástí inteligentní sítě. In: *Denik.cz* [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/ekonomika/elektromery-inteligentni-sit.html>
- [17] Co je to Smart Metering?. In: *It-slovník.cz* [online]. c2008-2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://it-slovník.cz/pojem/smart-metering>
- [18] Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií. In: *Tzb-info: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov* [online]. c2001–2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-406-2000-sb-o-hospodareni-energi>
- [19] Statické elektroměry. *Elektro* [online]. 2002, **2002**(4) [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/staticke-elektromery--14924>
- [20] *European Commission: Smart Metering deployment in the European Union* [online]. In: . [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-metering-deployment-european-union>
- [21] SAMADI, Pedram, Amir-Hamed MOHSENIAN-RAD, Robert SCHOBER, Vincent W. S. WONG a Juri JATSKEVICH. Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications* [online]. 2010, 415-420 [cit. 2024-03-10]. ISSN 2373-6836. Dostupné z: doi:10.1109/SMARTGRID.2010.5622077
- [22] HÁLA, Tomáš. *Monitoring a měření energetických veličin na vodárenských objektech*. Antonínská 548/1, Veveří, 602 00 Brno, 2016. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Lukáš Radil.

- [23] BERAN, Petr. *Parametrizace statických elektroměrů*. Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2732/8, 301 00 Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jana Jiříčková.
- [24] Vše o transformátorech proudu. In: *ElektroPrůmysl.cz* [online]. c2011–2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/vse-o-transformatorech-proudu>
- [25] PROCHAZKA, R., J. HLAVACEK a K. DRAXLER. Impulse Current Transformer With a Nanocrystalline Core. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, **2013**(1), 77-80 [cit. 2024-03-10]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2012.2217734
- [26] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [27] VOJÁČEK, Antonín. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka ?. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>
- [28] Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil. *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **199**(1), 012123 [cit. 2024-03-10]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/199/1/012123
- [29] Rogowského cívka. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2022-10-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rogowsk%C3%A9ho_c%C3%ADvka#/media/Soubor:Rogowskis_coil.png
- [30] RIPKA, Pavel. *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House, 2001. ISBN 15-805-3057-5.
- [31] HEIDARI, Hadi, Edoardo BONIZZONI, Umberto GATTI a Franco MALOBERTI. A CMOS Current-Mode Magnetic Hall Sensor With Integrated Front-End. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* [online]. 2015, **62**(5), 1270-1278 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: doi:10.1109/TCSI.2015.2415173
- [32] DRHOLEC, Jiří. *Měření na statických a indukčních elektroměrech*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava 17. listopadu 2172/15 708 00 Ostrava-Poruba, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky.

- [33] Transformer: Definition and Working Principle. In: *Electrical Article* [online]. 2019 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <http://electricalarticle.com/transformer-definition-and-working-principle/>
- [34] Základní princip transformátoru. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A1tor#/media/Soubor:Transformer3d_col3_cs.svg
- [35] SCHUBERT, E. Fred. *Light-Emitting Diodes*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9780511790546.
- [36] KACZMAREK, Michal. Two Channels Opto-Isolation Circuit for Measurements of the Differential Voltage of Voltage Transformers and Dividers. *MDPI Energies*. 2022. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/en15072694>
- [37] *Integrated Circuits Data Book: Linear Products* [online]. 1994 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: https://www.rsp-italy.it/Electronics/Databooks/Burr%20Brown/_contents/Burr-Brown%20Linear%20products%20%20-%201995.pdf
- [38] *Měřicí technika: Oddělovací zesilovače s kapacitní izolační berieriu* [online]. In: . [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: https://pmacura.cz/img451_ST_1_1996.pdf
- [39] FEMINE, Antonio, Daniele GALLO, Carmine LANDI, Alessandro SCHIAVO a Mario LUISO. Low Power Contactless Voltage Sensor for Low Voltage Power Systems. *MDPI Sensors*. 2019. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/s19163513>
- [40] *AMC1211-Q1 Automotive, High-Impedance, 2-V Input, Basic Isolated Amplifier* [online]. In: . 2018 [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1211-q1.pdf?ts=1666078678046&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [41] *The Origin of Harmonics & Their Effects on a Power System* [online]. In: . [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: <https://generatorbible.com/blog/what-is-thd/>
- [42] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-708-2976-1.
- [43] CHAPMAN, David. *Power Quality Application Guide: Harmonics Causes and Effects* [online]. In: . [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: <http://www.synergyies.com/uploads/5/3/8/8/5388914/31-causes-and-effects.pdf>
- [44] ŽÁČEK, Jaroslav a Karel KŮNDEL. EMC v technické praxi III: Omezování rušení v oblasti nízkých kmitočtů. *AUTOMA*. 2006, **2006**(6).

- [45] SÝKORA, Tomáš. Vyšší harmonické a meziharmonické: A0M15EVS – Elektrické zdroje a soustavy. In: *PowerWiki* [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/EVS/prednaska_02.pdf
- [46] LIU, Yingshu, Chunpin BI, Yao ZHAO a Xi CHEN. Energy Router with Load Switching Functionality. *Energy Procedia* [online]. 2019, **158**(02), 2561-2566 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.004](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.004)
- [47] ŠMEJKAL, Emanuel, Alexander YUROV a Jiří BLAHOVEC. Device for the study of electric pulse after-effect in vegetable tissue. *Fine mechanics and optics* [online]. 2011, **2011**(5), 153-155 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267641579_Device_for_study_of_electric_pulse_after-effect_in_vegetable_tissue
- [48] *Data Acquisition (DAQ) - Measurement Computing* [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.mccdaq.com/PDFs/specs/ECONseries-Datasheet.pdf>
- [49] SHINYAMA, TAKAYUKI, MAKOTO KAWAI a AKITERU UEDA. Characteristic of an AC Chopper Circuit with LC Filters in the Input and Output Side. *Electrical Engineering in Japan*. 2006, **155**(2), 45-52. ISSN 0424-7760.
- [50] GENG, Xin, Hou-Jun TANG, Nan JIN a Jian-Yu LAN. Direct Buck-type AC-AC Converters using VSC Method. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2013, **89**(1), 257-261. ISSN 0033-2097.
- [51] ZHANG, Jianwei. *Control strategies and applications of three-phase direct matrix converters*. Broadway, Ultimo, NSW 2007, Australia, 2018. Disertace. University of Technology Sydney.
- [52] MENDOZA SANTOS, Edwin, Eduardo CAMPOS-MERCADO, Edwin MENDOZA SANTOS, Jorge TORRES-MUÑOZ, Edwin ROMÁN-HERNÁNDEZ a Alberto MORENO OLIVA. Nonlinear Controller for the Set-Point Regulation of a Buck Converter System. *MDPI Energies* [online]. 2021, **2021**(14), 57-60 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/en14185760](https://doi.org/10.3390/en14185760)
- [53] A Reduced-Order Enhanced State Observer Control of DC-DC Buck Converter. *IEEE Access* [online]. 2018, **2018**(6), 56184-56191 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872156](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872156)
- [54] DIYOKE, Gerald. ANALYSIS AND SIMULATION OF BUCK SWITCH MODE DC TO DC POWER REGULATOR. *International Journal of Technical Research and Applications*

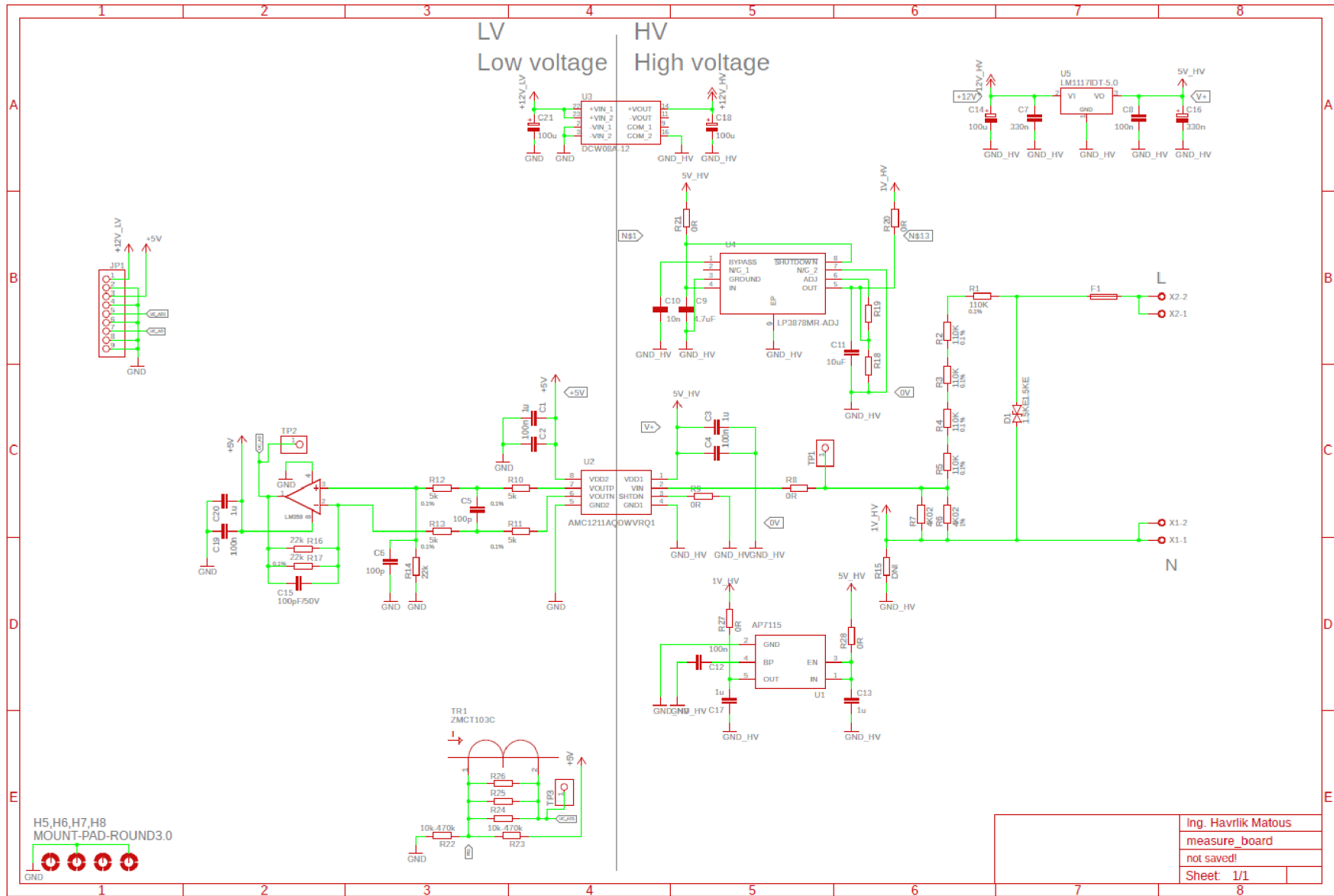
[online]. 2015, **2015**(3), 97-103 [cit. 2024-01-06]. ISSN 2320-8163. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323946482_ANALYSIS_AND_SIMULATION_OF_BUCK_SWITCH_MODE_DC_TO_DC_POWER_REGULATOR

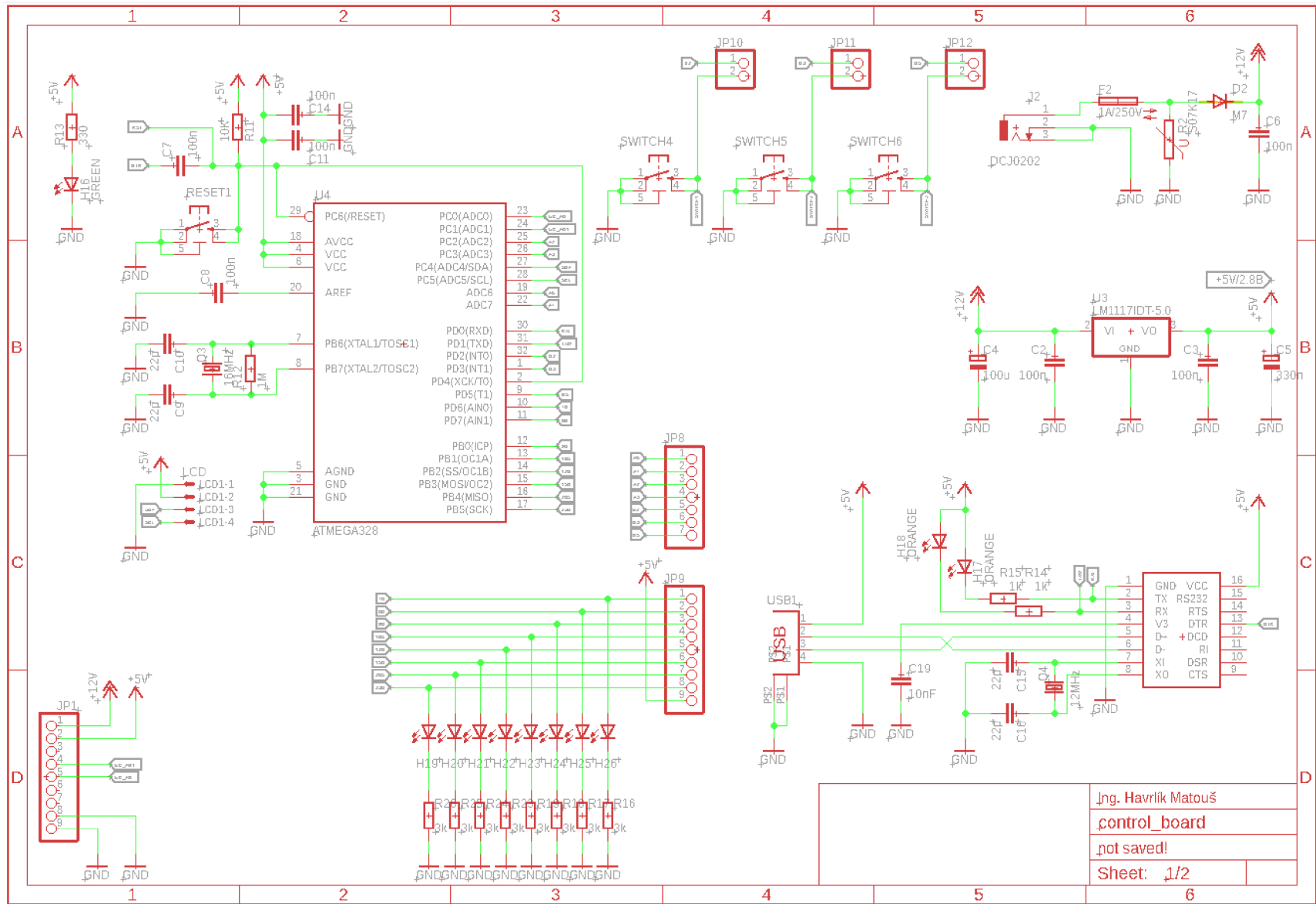
[55] WÜRTH ELEKTRONIK. EMI Filter Designer. In: *Würth Elektronik Red Expert* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://redexpert.we-online.com/we-redexpert/en/#/emifd-embedded>

[56] Akumulační tlumivky a odrušovací tlumivky. In: *PMEC Shop* [online]. 2022 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: https://shop.pmec.cz/index.php?page=details&prod=488&cat=15&group=3&page_tit=PM+EC+226%2FBv+2m2+4%2C0+A+Akumula%C4%8Dn%C3%AD+a+udru%C5%A1ovac%C3%AD+tlumivka+%7C+

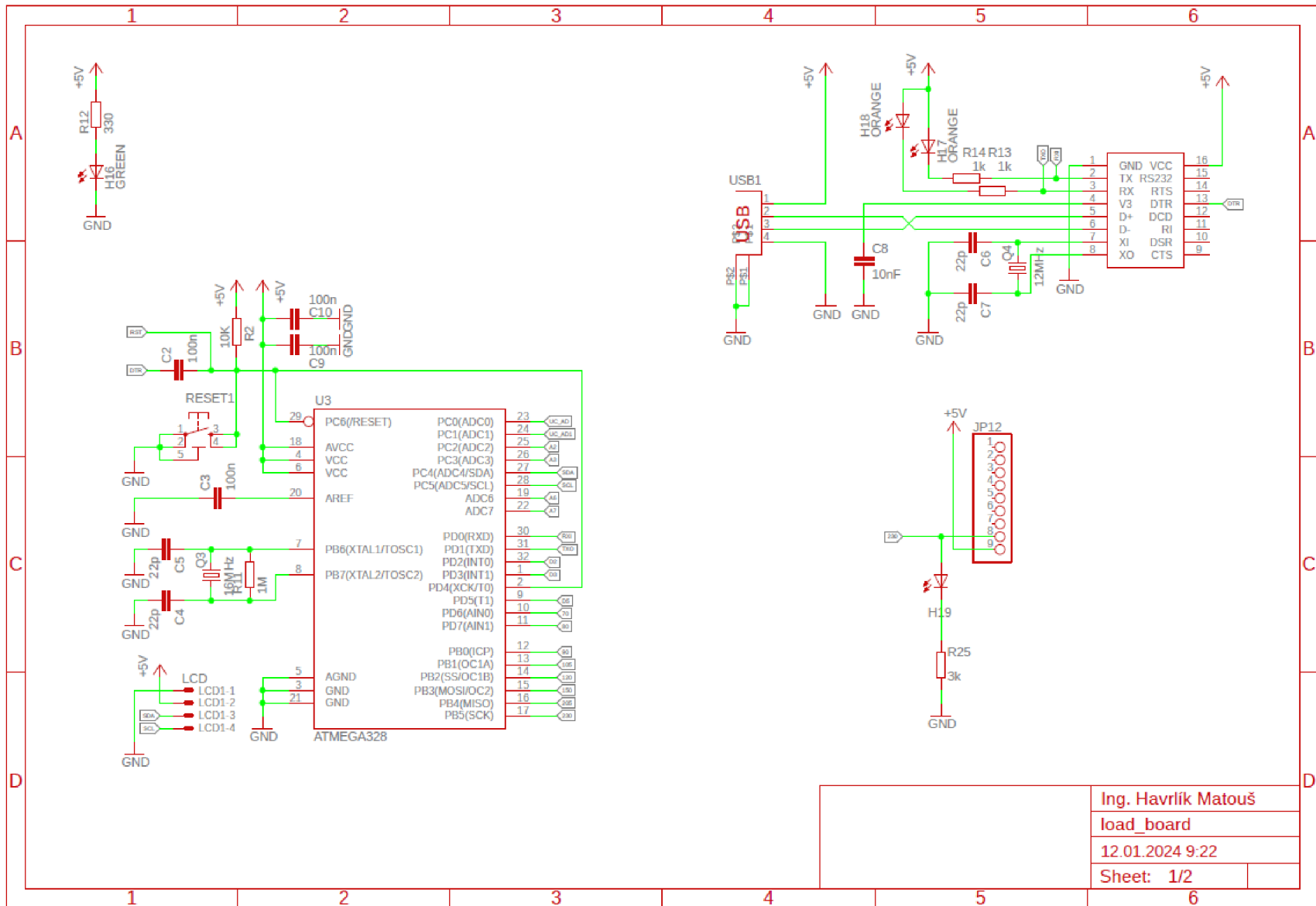
Seznam příloh

1. Celkové schéma měřicího modulu (str. 89)
2. Celkové schéma řídicí jednotky (str. 90)
3. Celkové schéma DPS pro spínání zátěže (str. 91)
4. Kompletní program řídicí jednotky (str. 92)
5. Detailní fotografie odkrytovaného inovativního wattrouteru (str. 97)
6. Seznam součástí měřicího modulu (str.98)
7. Seznam součástí řídicí desky (str. 99)
8. Seznam součástí desky generující PWM (str. 100)





.Ing. Havlík Matouš
 .control_board
 .not saved!
 Sheet: 1/2



Ing. Havlík Matouš
load_board
12.01.2024 9:22
Sheet: 1/2

```

1 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
2 #include <Wire.h>
3 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
4
5 int numberOfSamples; //pocetSamplu
6 int initializationTime = 100; //pauza ustálení přechodových dějů
7 long startOfintegration; //pocatekIntegrace
8 long actualTime; //aktualniCas
9 float sumVoltage; //sumaU
10 float sumCurrent; //sumaI
11 float voltage; //u
12 float current; //i
13 float voltageArray[10]; //pole pro vypocet prumerneho napatei
14 float currentArray[10]; //pole pro vypocet prumerneho proudu
15 float averageVoltage = 0; //prumerneNapeti
16 float averageCurrent = 0; //prumernyProud
17 int numberForAverage = 10; //pocet prumerovanych hodnot
18
19 int additionalAppliance = 300; //přídavný spotřbič o příkonu 300W
20
21
22 float activePower; // Pcin (výroba PV)
23 float sumActivePower; // suma
24
25 float previousLoad = 0; // L(t-1)
26 float load = 0; // L(t)
27 float pmw = 0; // pmw
28
29 void setup()
30 {
31   delay(initializationTime);
32   Serial.begin(9600);
33   Wire.begin();
34   lcdSetup();
35
36   for (int cycle = 0; cycle < numberForAverage; cycle++)
37   {
38     sumVoltage = 0;
39     sumCurrent = 0;
40     numberOfSamples = 0;
41     startOfintegration= micros();
42     actualTime= startOfintegration;
43
44     while(actualTime - startOfintegration < 100000)
45     {
46       voltage = analogRead(A0);
47       current = analogRead(A1);
48       sumVoltage = sumVoltage + voltage;
49       sumCurrent = sumCurrent + current;

```

```

50     numberOfSamples++;
51     actualTime = micros();
52     if (actualTime < startOfintegration)
53         startOfintegration = startOfintegration - 4294967295;
54     }
55     voltageArray[cycle] = sumVoltage/numberOfSamples ;
56     currentArray[cycle] = sumCurrent/numberOfSamples;
57 }
58 for (int cycle = 0; cycle < numberForAverage; cycle++)
59 {
60     averageVoltage += voltageArray[cycle];
61     averageCurrent += currentArray[cycle];
62 }
63 averageVoltage=averageVoltage/numberForAverage;
64 averageCurrent=averageCurrent/numberForAverage;
65 //averageValueUI(); //zobrazí na LCD
66 }
67
68 void loop()
69 {
70     sumActivePower = 0;
71     numberOfSamples = 0;
72     activePower = 0;
73     startOfintegration = micros();
74     actualTime = startOfintegration;
75     while(actualTime - startOfintegration <= 100000)
76     {
77         voltage = analogRead(A0);
78         current = analogRead(A1);
79         sumActivePower = sumActivePower + (voltage -
80 averageVoltage)*(current - averageCurrent);
81         numberOfSamples++;
82         actualTime = micros();
83         if (actualTime < startOfintegration)
84             startOfintegration = startOfintegration - 4294967295;
85     }
86
87     activePower = sumActivePower / numberOfSamples / 41861.16*1982.6;
88     load = ((previousLoad-activePower)+(abs(previousLoad-
89 activePower)))/2;
90     if (load > 300)
91         load=300;
92     PWM = ceil(load*255/aditionalAppliance);
93     previousLoad=load;
94
95
96     Wire.beginTransmission(8); // odeslání dat na adresu 8
97     Wire.write(int(PWM)); // odeslání hodnoty
98     Wire.endTransmission();

```

```

99  /***výpis na LCD a do seriovvé linky***//
100  if (activePower <0){
101    lcd.setCursor(8,0);
102    lcd.print("-");
103    activePower = activePower * -1;
104    lcdPrintPower();
105  }
106  else{
107    lcd.setCursor(8,0);
108    lcd.print(" ");
109    lcd.setCursor(9,0);
110    lcdPrintPower();
111  }
112  lcdPrintLoad();
113  lcdPrintpmw();
114
115  /* Výpis do seriovvé linky
116  Serial.print("activePower= ");
117  Serial.println(activePower,0);
118  Serial.print("load= ");
119  Serial.println(load,0);
120  Serial.print("pmw= ");
121  Serial.println(pmw,0);
122  Serial.println("-----");
123  */
124
125 }
126
127 void lcdSetup() {
128  lcd.init();
129  lcd.begin(16, 2);
130  lcd.backlight();
131
132  lcd.home();
133  lcd.print("a.Power=");
134  lcd.setCursor(0,1);
135  lcd.print("load=");
136  lcd.setCursor(9,1);
137  lcd.print("pmw=");
138 }
139
140 void averageValueUI() {
141  //LCD
142  lcd.setCursor(0,0);
143  lcd.print("aVoltage=");
144  lcd.setCursor(9,0);
145  lcd.print(ceil(averageVoltage),0);
146  lcd.setCursor(0,1);
147  lcd.print("aCurrent=");

```



```

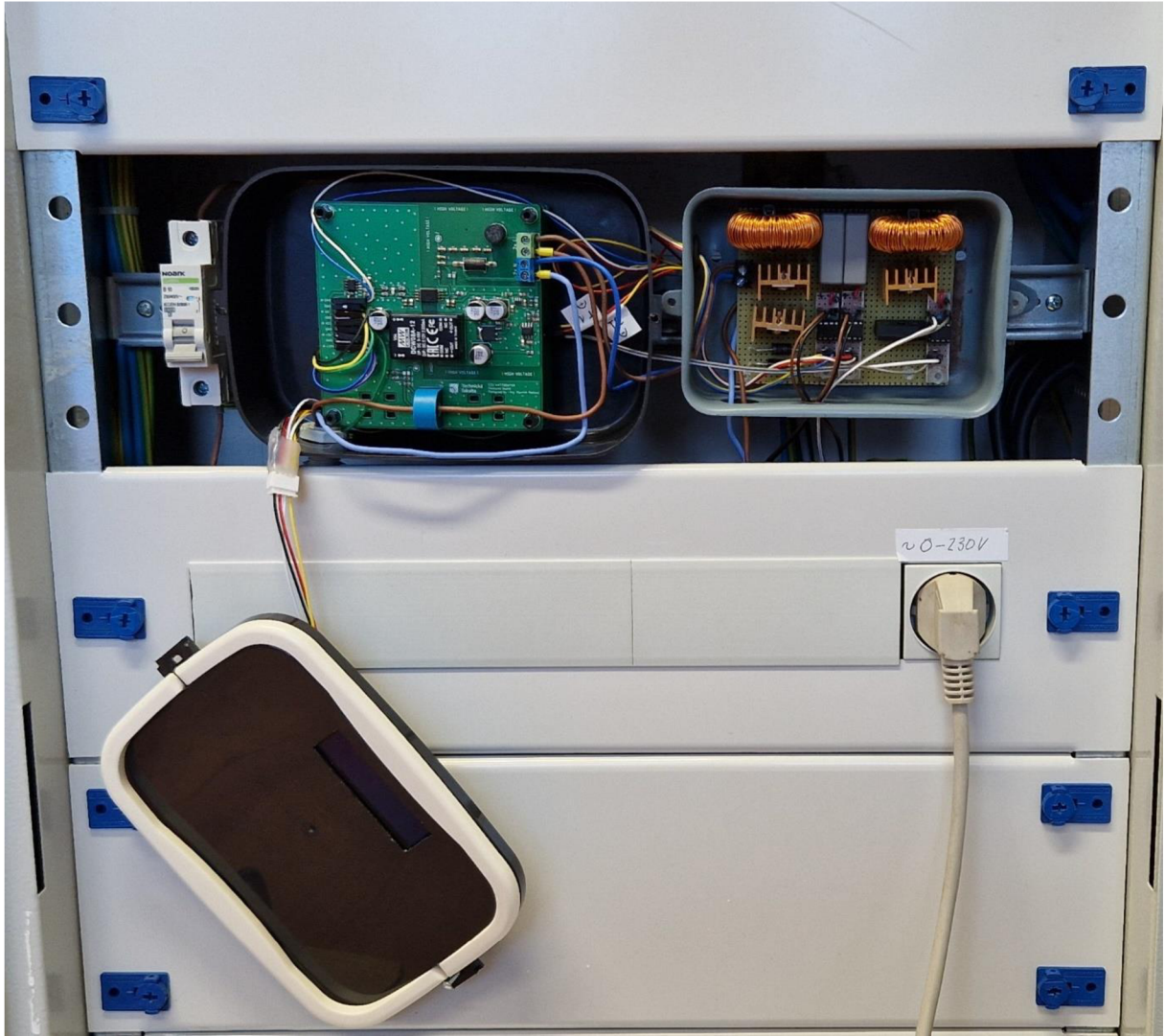
148 lcd.setCursor(9,1);
149 lcd.print(ceil(averageCurrent),0);
150
151 //Seriova linka
152 Serial.print("averageVoltage= ");
153 Serial.println(averageVoltage,4);
154 Serial.print("averageCurrent= ");
155 Serial.println(averageCurrent,4);
156 Serial.println("-----");
157
158 delay(2000);
159 }
160
161 //slouží k premazavani LCD, tak aby displej neblikal
162 void lcdPrintPower(){
163   if (activePower < 10000 && activePower >= 1000 ){
164     lcd.setCursor(9,0);
165     lcd.print(activePower,0);
166     lcd.setCursor(13,0);
167     lcd.print(" ");
168   }
169   else if(activePower < 1000 && activePower >= 100){
170     lcd.setCursor(9,0);
171     lcd.print(activePower,0);
172     lcd.setCursor(12,0);
173     lcd.print(" ");
174   }
175   else if(activePower < 100 && activePower >= 10){
176     lcd.setCursor(9,0);
177     lcd.print(activePower,0);
178     lcd.setCursor(11,0);
179     lcd.print(" ");
180   }
181   else{
182     lcd.setCursor(9,0);
183     lcd.print(activePower,0);
184     lcd.setCursor(10,0);
185     lcd.print(" ");
186   }
187 }
188
189 //slouzi k premazavani LCD, tak aby displej neblikal
190 void lcdPrintLoad(){
191   if (load < 10000 && load >= 1000 ){
192     lcd.setCursor(5,1);
193     lcd.print(load,0);
194   }
195   else if(load < 1000 && load >= 100){
196     lcd.setCursor(5,1);

```

```

197 lcd.print(load,0);
198 lcd.setCursor(8,1);
199 lcd.print(" ");
200 }
201 else if(load < 100 && load >= 10){
202 lcd.setCursor(5,1);
203 lcd.print(load,0);
204 lcd.setCursor(7,1);
205 lcd.print(" ");
206 }
207 else{
208 lcd.setCursor(5,1);
209 lcd.print(load,0);
210 lcd.setCursor(6,1);
211 lcd.print(" ");
212 }
213 }
214
215 void lcdPrintpmw(){
216 if(pmw < 1000 && pmw >= 100){
217 lcd.setCursor(13,1);
218 lcd.print(pmw,0);
219 }
220 else if(pmw < 100 && pmw >= 10){
221 lcd.setCursor(13,1);
222 lcd.print(pmw,0);
223 lcd.setCursor(15,1);
224 lcd.print(" ");
225 }
226 else{
227 lcd.setCursor(13,1);
228 lcd.print(pmw,0);
229 lcd.setCursor(14,1);
230 lcd.print(" ");
231 }
232 }

```



Part	Hodnota	Zařizení	Pouzdro
C1	1u	C-EUC0805K	C0805K
C2	100n	C-EUC0805K	C0805K
C3	1u	C-EUC0805K	C0805K
C4	100n	C-EUC0805K	C0805K
C5	100p	C-EUC0805K	C0805K
C6	100p	C-EUC0805K	C0805K
C7	330n	C-EUC0805K	C0805K
C8	100n	C-EUC0805K	C0805K
C9	4.7uF	C-EUC0805K	C0805K
C10	10n	C-EUC0805K	C0805K
C11	10uF	C-EUC0805K	C0805K
C12	100n	C-EUC0805K	C0805K
C13	1u	C-EUC0805K	C0805K
C14	100u	CPOL-EU153CLV-0810	153CLV-0810
C15	100pF/50V	C-EUC0805K	C0805K
C16	330n	CPOL-EU153CLV-0810	153CLV-0810
C17	1u	C-EUC0805K	C0805K
C18	100u	CPOL-EU153CLV-0810	153CLV-0810
C19	100n	C-EUC0805K	C0805K
C20	1u	C-EUC0805K	C0805K
C21	100u	CPOL-EU153CLV-0810	153CLV-0810
D1	1.5KE1.5KE	1.5KE1.5KE	DO201-15
F1	1A/250	TR5	TR5
H1	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H2	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H3	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H4	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
IC2	LM358	LM358	SOIC8 150MIL
JP1		PINHD-1X9	1X09
R1	110k	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R2	110k	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R3	110k	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R4	110k	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R5	110k	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R6	4k02	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R7	4k02	R-EU MELF0204W	MINI MELF-0204W
R8	0R	R-EU R0805	R0805
R9	0R	R-EU R0805	R0805
R10	5k	R-EU R0805	R0805
R11	5k	R-EU R0805	R0805
R12	5k	R-EU R0805	R0805
R13	5k	R-EU R0805	R0805
R14	22k	R-EU R0805	R0805
R15	DNI	R-EU R0805	R0805
R16	22k	R-EU R0805	R0805
R17	22k	R-EU R0805	R0805
R18	5k	R-EU R0805	R0805
R19	5k	R-EU R0805	R0805
R20	0R	R-EU R0805	R0805
R21	0R	R-EU R0805	R0805
R22	43k	R-EU R0805	R0805
R23	43k	R-EU R0805	R0805
R24	neosazeno	R-EU R0805	R0805
R25	470	R-EU R0805	R0805
R26	150	R-EU R0805	R0805
R27	0R	R-EU R0805	R0805
R28	0R	R-EU R0805	R0805
TP1		PINHD-1X1	1X01
TP2		PINHD-1X1	1X01
TP3		PINHD-1X1	1X01
TR1	ZMCT103C	ZMCT103C	ZMCT103C
U1	AP7115	AP7115-25SEG-7SOT23AP7115	SOT95P280X145-5N
U2	AMC1211AQDWVRQ1	AMC1211AQDWVRQ1	SOIC127P1150X280-8N
U3	DCW08A-12	DCW08A-12	DCW08A12
U4	LP3878MR-ADJ	LP3878MR-ADJ NOPB	SOIC127P600X170-9N
U5	LM1117IDT-5.0	LM1117IDT-5.0	TO252
X1		W237-02P	W237-132
X2		W237-02P	W237-132

Součástka	Hodnota	Zařízení	Pouzdro
C1	100n	C-EUC0805K	C0805K
C12	100n	C-EUC0805K	C0805K
C13	100n	C-EUC0805K	C0805K
C17	100u	CPOL-EU153CLV-1014	153CLV-1014
C18	330n	CPOL-EU153CLV-1014	153CLV-1014
C23	100n	C-EUC0805	C0805
C24	100n	C-EUC0805	C0805
C25	22p	C-EUC0805	C0805
C26	22p	C-EUC0805	C0805
C27	22p	C-EUC0805	C0805
C28	22p	C-EUC0805	C0805
C29	10nF	C-EUC0805	C0805
C30	100n	C-EUC0805	C0805
C31	100n	C-EUC0805	C0805
D1	M7	DIODE-SMB	SMB
F1	1A/250V	TR5	TR5
H1	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H2	ORANGE	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H3	ORANGE	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H4	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H5	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H6	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H7	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H8	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H9	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H10	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H11	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H12	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H13	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H14	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H15	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
J1	DCJ0202	DCJ0202	DCJ0202
JP2		PINH-1X9	1X09
JP3		PINH-1X7	1X07
JP4		PINH-1X2	1X02
JP5		PINH-1X2	1X02
JP6		PINH-1X2	1X02
JP7		PINH-1X9	1X09
LCD	LCD	JST-XH-04-PIN-LONG-PAD	JST-XH-04-PACKAGE-LONG-PAD
Q1	16MHz	KX-K(S)KX-K(S)	11.4X4.5
Q2	12MHz	KX-K(S)KX-K(S)	11.4X4.5
R1	S07K17	S07K17	S07K17
R3	3k	R-EU R0805	R0805
R4	3k	R-EU R0805	R0805
R5	3k	R-EU R0805	R0805
R6	3k	R-EU R0805	R0805
R7	3k	R-EU R0805	R0805
R8	3k	R-EU R0805	R0805
R9	3k	R-EU R0805	R0805
R10	3k	R-EU R0805	R0805
R20	10K	R-EU R0805	R0805
R21	1M	R-EU R0805	R0805
R22	330	R-EU R0805	R0805
R28	1k	R-EU R0805	R0805
R29	1k	R-EU R0805	R0805
RESET		TS42	TS42
SWITCH1		TS42	TS42
SWITCH2		TS42	TS42
SWITCH3		TS42	TS42
U1	ATMEGA328	ATMEGA328	TQFP32-08
U2	CH340G	CH340G	SOIC16
U5	LM1117IDT-5.0	LM1117IDT-5.0	TO252
USB		PN61729	PN61729

Součástka	Hodnota	Zařízení	Pouzdro
C1	neosazeno		
C12	neosazeno		
C13	100n	C-EUC0805K	C0805K
C17	neosazeno		
C18	neosazeno		
C23	100n	C-EUC0805	C0805
C24	100n	C-EUC0805	C0805
C25	22p	C-EUC0805	C0805
C26	22p	C-EUC0805	C0805
C27	22p	C-EUC0805	C0805
C28	22p	C-EUC0805	C0805
C29	10nF	C-EUC0805	C0805
C30	100n	C-EUC0805	C0805
C31	100n	C-EUC0805	C0805
D1	neosazeno		
F1	neosazeno		
H1	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H2	ORANGE	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H3	ORANGE	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
H4	neosazeno		
H5	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H6	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H7	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H8	MOUNT-PAD-ROUND3.0	MOUNT-PAD-ROUND3.0	3,0-PAD
H9	neosazeno		
H10	neosazeno		
H11	neosazeno		
H12	neosazeno		
H13	neosazeno		
H14	neosazeno		
H15	GREEN	LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805
J1	Neosazeno		
JP2		PINHD-1X9	1X09
JP3		PINHD-1X7	1X07
JP4		PINHD-1X2	1X02
JP5		PINHD-1X2	1X02
JP6		PINHD-1X2	1X02
JP7		PINHD-1X9	1X09
LCD	LCD	JST-XH-04-PIN-LONG-PAD	JST-XH-04-PACKAGE-LONG-PAD
Q1	16MHz	KX-K(S)KX-K(S)	11.4X4.5
Q2	12MHz	KX-K(S)KX-K(S)	11.4X4.5
R1	neosazeno		
R3	3k	R-EU R0805	R0805
R4	neosazeno		
R5	neosazeno		
R6	neosazeno		
R7	neosazeno		
R8	neosazeno		
R9	neosazeno		
R10	neosazeno		
R20	10K	R-EU R0805	R0805
R21	1M	R-EU R0805	R0805
R22	330	R-EU R0805	R0805
R28	1k	R-EU R0805	R0805
R29	1k	R-EU R0805	R0805
RESET		TS42	TS42
SWITCH1	neosazeno		
SWITCH2	neosazeno		
SWITCH3	neosazeno		
U1	ATMEGA328	ATMEGA328	TQFP32-08
U2	CH340G	CH340G	SOIC16
U5	neosazeno		
USB		PN61729	PN61729