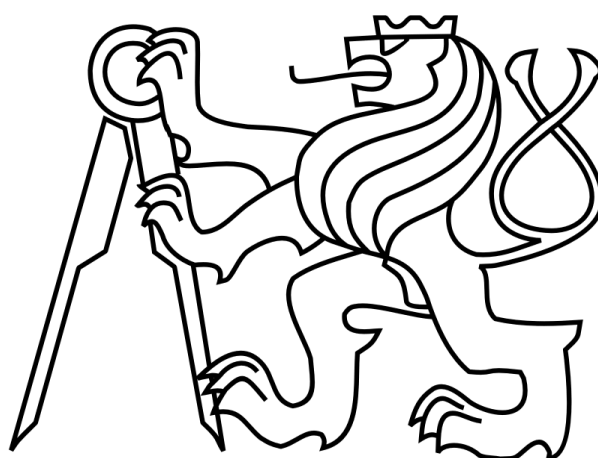


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Řídicí modul pro kogenerační jednotku

květen 2016

Diplomant: Bc. Tadeáš Holler

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Janíček, Ph.D

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum 26. 5. 2016

.....

podpis diplomanta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. HOLLER Tadeáš**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Řídicí modul pro kogenerační jednotku**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte systémy určené pro připojení energetických generátorů do rozvodné sítě. Zaměřte se na aplikace v oblasti kogeneračních jednotek.
- 2) Vytvořte návrh a zapojení řídicího modulu, který bude sloužit pro synchronizaci síťového kmitočtu připojovaného zařízení s rozvodnou sítí.
- 3) Jednotka bude měřit provozní parametry kogenerační jednotky a bude schopna optimalizovat provoz jednotky z hlediska energetické účinnosti.
- 4) Vyrobtte prototyp jednotky a ověřte její funkci a parametry v reálném provozu.
- 5) Provedte ekonomickou studii navrženého řešení a porovnejte dosažené parametry s komerčně dostupnými produkty.

Seznam odborné literatury:

- 1) Mehervan P.B. - Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants, ISBN 978-0791859537
- 2) Kehlhöfer, R. - Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, ISBN 978-1593701680
- 3) Rozenblat L. - Home Generator: Selecting, Sizing And Connecting: The Complete Guide, ISBN 978-1507536643

Vedoucí: **Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.**

Platnost zadání: 9. 9. 2017



prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 2. 2016

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí řídicího modulu pro kogenerační jednotky, výběrem vhodných komponentů pro její realizaci, a dále vytvořením grafického uživatelského rozhraní. Konstrukčně se jedná o nestandardní spojení Hallovy sondy a obvodů pro měření s bočником, přičemž aplikace modulu se specializuje na třífázovou soustavu a měření jejích hlavních parametrů jako je proud, napětí, výkon a frekvence. Výsledné zpracování je zajišťováno procesorem STM32F746. Ohled je brán na použitelnost v praxi, finanční náročnost a porovnání s komerčními produkty.

Abstract:

The thesis is dealing with design and construction of a controller module for a cogeneration unit, choosing appropriate components for its realization, and creation of graphic user interfaces. The design is about non-standard connection Hall sensor and circuit which uses measuring with a shunt. The device is specialized in measuring three-phase voltage system, such as current, voltage, power and frequency. The used type of microprocessor is STM32F746 which is produced by STMicroelectronics Company. The practical use in real environment, costs and the comparison with commercial products were considered.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Vladimíru Janíčkoví Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Seznam použitých zkratek

KVET.....	kombinovaná výroba elektrické a teplené energie
TUV.....	teplá užitková voda
We.....	elektrická energie
Wt.....	tepelná energie
FUPLA.....	function block diagram
ECU.....	Electronic Control Units
AM.....	Asynchronní motor
MTP.....	měřící transformátor proudu
ICs.....	integrated circuits
CMOS.....	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
A.....	ampér
V.....	volt
mV.....	milivolt
W.....	watt
GMS.....	Globální Systém pro Mobilní komunikaci
ISDN.....	Integrated Services Digital Network
CDMA.....	Carrier Sense Multiple Access
SMS.....	Short message service
CAN.....	Controller Area Network
USB.....	Universal Serial Bus
ADC.....	analogově-digitální převodník
DAC.....	digitálně-analogový převodník
LSB.....	Least Significant Bit
MSB.....	Most Significant Bit
IIC.....	Inter-Integrated Circuit
LCD.....	Liquid Crystal Display
SDA.....	Serial Data Line
SCL.....	Serial Clock Line
HAL.....	Hot Air Levelling
OS.....	Operating System
PCB.....	Printed Circuit Board

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Kogenerace	2
2.1	Princip kogenerace.....	2
2.2	Účinnost a ekologický vliv	2
2.3	Kogenerace s parními turbínami a motory	3
2.4	Kogenerace se spalovacími turbínami	4
2.5	Kogenerace se spalovacími motory	4
2.5.1	Vznětový motor.....	5
2.5.2	Zážehové motory	5
2.6	Kogenerační jednotka s palivovými články.....	6
2.6.1	Mikrokogenerační jednotka se Stirlingovým motorem	6
2.7	Využití kogeneračních jednotek.....	7
3	Řízení kogenerační jednotky	9
3.1	Moduly dostupné na trhu.....	9
3.2	InteliGenNTC BaseBox.....	9
4	Generátory	11
4.1	Asynchronní generátor.....	11
4.1.1	Princip činnosti asynchronního stroje	11
4.1.2	Výkon a moment asynchronního stroje	12
4.2	Synchronní generátor	13
4.2.1	Princip synchronního stroje	13
5	Synchronizace	14
5.1	Synchronizace na síť asynchronního stroje	14
5.2	Synchronizace na síť synchronního stroje	14
6	Měření elektrického napětí	16
7	Měření proudů	17

7.1	Změna rozsahu ampérmetru	17
7.1.1	Bočník.....	17
7.1.2	Měřící transformátor proudou.....	18
7.1.3	Hallova sonda.....	19
7.1.4	Hallovo sonda v CMOS technologii	19
8	Měření kmitočtu	21
8.1	Přímé číslicové měření kmitočtu.....	21
9	Měření fázového posunu.....	22
10	Číslicové zpracování měřeného signálu	23
10.1	Vzorkování signálu	24
10.2	Analogově – číslicové převodníky.....	24
10.3	Sigma-delta ADC.....	25
11	Sběrnice I ² C.....	28
11.1	Přenos dat po sběrnici I ² C.....	29
12	Mikrokontrolér STM32F746	31
12.1	Architektura ARMv7	31
13	Návrh.....	33
13.1	Měření napětí a proudů	33
13.2	Návrh s ADE79xx.....	34
13.2.1	Obvod ADE7933.....	35
13.2.2	Obvod ADE7978.....	37
13.2.3	Obvod ADE7923.....	38
14	Měření proudu Hallovou sondou.....	39
14.1	Zapojení ACS712.....	39
15	Návrh obvodového zapojení	41
15.1	Vyhodnocovací mikrokontrolér	43
16	Program.....	45

16.1	RTOS.....	45
16.1.1	Hard RTOS.....	45
16.1.2	Soft RTOS.....	45
16.1.3	Plánovač.....	46
16.2	Inicializace ADE7978.....	47
16.3	Vyčítání dat z ADE7978.....	48
16.3.1	Synchronizace na síť.....	48
16.4	Grafické prostředí.....	49
16.5	Grafické uživatelské rozhraní.....	49
16.6	Popis programu při běžném chodu.....	53
17	Finanční analýza.....	54
17.1	Náklady na desku pro snímání motorových veličin.....	54
17.2	Vyhodnocení finanční analýzy.....	54
18	Závěr.....	56
19	Zdroje.....	57
20	Seznam obrázků.....	59
21	Seznam Tabulek.....	60
22	Přílohy.....	61
22.1	Příloha A – Schéma zapojení.....	61
22.2	Příloha B – Motivy desky plošných spojů.....	64
22.3	Příloha C – Osazovací plán.....	66
22.4	Příloha D – Úplné vnitřní blokové uspořádání STM32F746.....	67
22.5	Příloha E – Fotodokumentace prototypu.....	68

1 Úvod

V dnešní době, kdy je trend starší technologie zdokonalovat, abychom jsme z nich využili jejich plný potenciál, se na řadu dostává zdokonalování výroby elektrické a tepelné energie. Projekty, u niž je výroba elektrické a tepelné energie z jednoho zdroje, jsou nejen dotovány státem, ale také jejich účinnost dosahuje přes 90 %, takže jsou ekonomicky výhodné. Mezi takoveto projekty patří právě kogenerační jednotky, u kterých je odpadní teplo z motoru, který točí generátorem, využito pro vytápění a tím je energie, která by se jinak vyzářila do okolí, využita na vytápění budov nebo ohřev vody. Ovšem jako každý zdroj energii i tento potřebuje své řízení, aby pracoval správně.

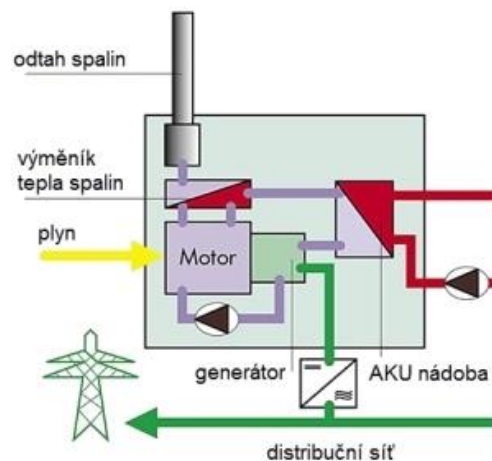
Toto téma jsem si vybral, protože jsem se v praxi setkal a podílel na konstrukci a zprovoznění 30kW kogenerační jednotky. Zajímalo mně jaká je problematika ohledně měření proudů, napětí a dalších elektrických veličin. S čím konstruktér musí počítat při návrhu zapojení, přičemž měření je prováděno na síťovém napětí a zpracováváno mikrokontrolérem. Jak nejefektivněji a jednoduše průběhy změřit a převést je na digitální podobu. Cílem práce je takovýto modul navrhnout a realizovat

2 Kogenerace

Kogenerační jednotka je stroj na výrobu elektrické a tepelné energie (KVET). Jedná se o využívání odpadního tepla při výrobě elektřiny, které by v jiných případech přišlo vniveč. Je to nově rozšířený způsob jak využít vynaloženou energii co nejefektivněji. Elektrická energie se spotřebovává přímo v objektu, nebo je dodávána do sítě. Teplená energie je využíván pro vytápění objetu, nebo pro TUV.

2.1 Princip kogenerace

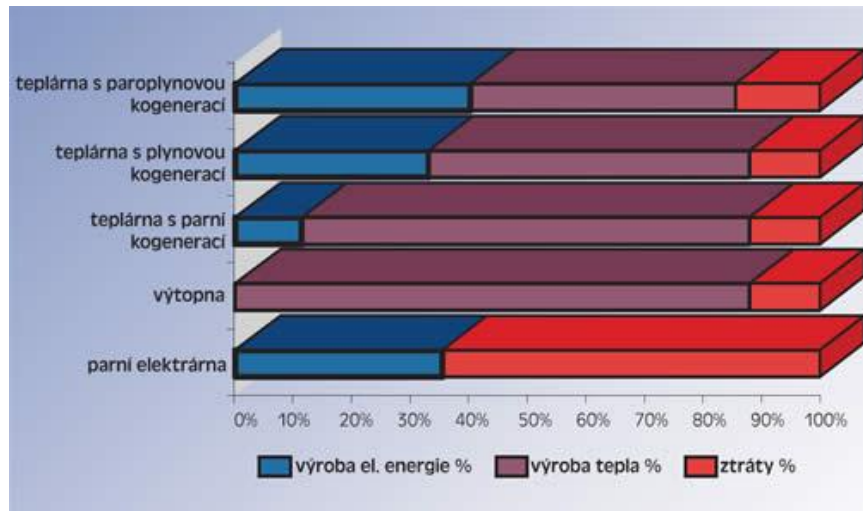
Z fyzikálního hlediska se jedná o to, že z jednoho primárního zdroje energie získáváme dvě různé energie, v tomto případě elektrickou a tepelnou energii. Jednoduše řečeno pomocí primárního zdroje energie roztáčíme generátor a přebytečné teplo z tohoto procesu se dále využívá pro vytápění. Při dobré konstrukci kogenerační jednotky lze dosáhnout účinnosti 95%.



Obr. č. 1. Blokové znázornění kogenerační jednotky [1]

2.2 Účinnost a ekologický vliv

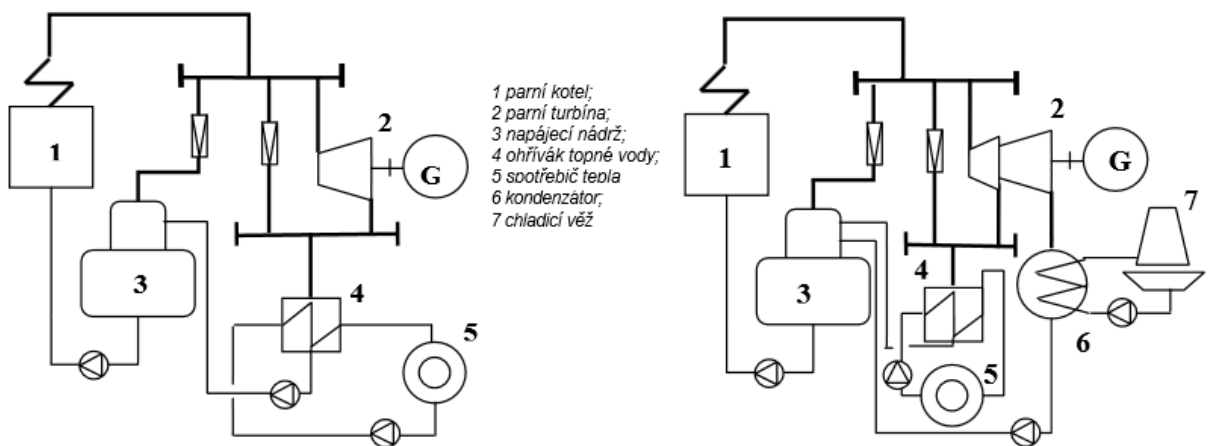
Jak už bylo výše zmíněno, účinnost kogenerační může dosahovat až 95%. Například uhelné elektrárny mají účinnost 30-45%, zbytek se energie se „ztratí“ v chladicích věžích. Dále jsou to výtopy, které využívají spalování jen pro výrobu tepla, ale mohly by je využívat i k výrobě elektrické energie. U tepláren, které využívají kogeneraci, je spotřeba neobnovitelných fosilních paliv nižší. Tím také je snížena ekologická zátěž. Další významný faktor je, že dochází k decentralizování rozvodné sítě, snížení ztrát na vedení a vyšší bezpečnosti dodávek. [1]



Obr. č. 2. Rozdělení tepla přivedeného v palivu (na výrobu elektřiny, tepla a tepelné ztráty) v jednotlivých typech kombinované výroby elektřiny a tepla a porovnání s oddělenou výrobou tepla. [1]

2.3 Kogenerace s parními turbínami a motory

Parní turbíny se v průmyslu jako kogenerační zařízení používají léta. Turbínu jako kogenerační motor lze zapojit dvojím způsobem, buď jako parní protitlakou turbínu, nebo jako kondenzační s odběrem páry dodávku tepla spotřebiteli. [3]

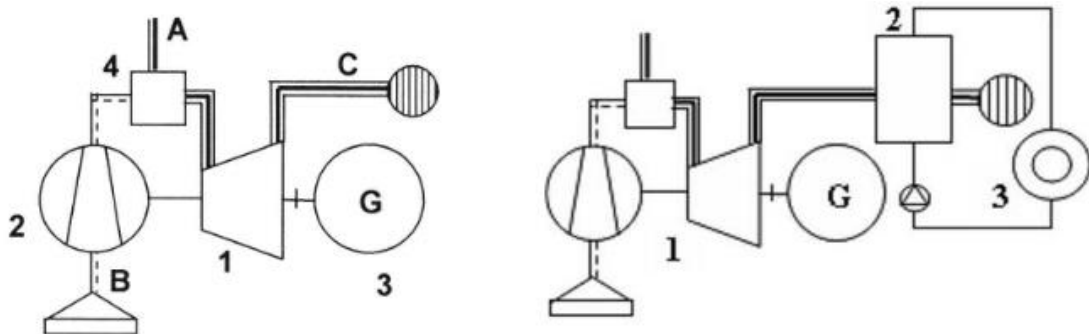


Obr. č. 3 Základní zapojení protitlaké turbíny (vlevo) a kondenzační parní turbíny s odběrem páry (vpravo) [3]

Výkony těchto kogeneračních jednotek se pohybují okolo 30MW.

2.4 Kogenerace se spalovacími turbínami

Spalovací turbína s jednoduchým otevřeným oběhem má následující části: kompresor, spalovací komory, plynové turbíny, elektrický generátor a pomocné zařízení. Kompresor nasává vzduch a stlačuje jej na požadovaný tlak. Stlačený vzduch je veden do spalovací komory, kde se v jeho proudu při stálém tlaku spaluje palivo. Tím vzniknou spaliny o vysoké teplotě a tlaku, které pak expandují v plynové turbíně. Po průchodu turbínou, již s nízkou teplotou, jsou odváděny do atmosféry. Plynová turbína pohání přímo kompresor. Přebytek výkonu je použit pro pohon elektrického generátoru. V současné době se využívají dvě koncepce: spalovací turbína průmyslového typu a spalovací turbína odvozená z leteckých proudových motorů. Výkony se pohybují v rozsahu od 250 kW do 300 MW, ale pod 3 MW mají špatné ekonomické vlastnosti.[3] Turbína v kogeneračním zapojení se od klasického liší v tom, že výstupní plyny jsou přiváděny do kotle na odpadní teplo, odkud se dále využívají. Takové-to zapojení dosahuje výkonu od 5 MW do 100 MW.[3]



1 turbína, 2 kompresor, 3 elektrický generátor, 4 spalovací komora;
A přívod paliva, B přívod vzduchu, C odvod spalin

1 spalovací turbína; 2 kotel na odpadní teplo; 3 spotřebič tepla

Obr. č. 4. Schéma uspořádání spalovací turbíny základní (vlevo) kogenerační (vpravo) [3]

Postupným technickým vývojem se zdokonalily turbíny menších výkonů a vznikly mikroturbíny a to od výkonu 25 kW do 250 kW. Turbína o ostatní komponenty jsou v jedné skříni a odhlučněny, Toto zařízení lze montovat přímo do budov.

2.5 Kogenerace se spalovacími motory

Spalovací motory, používané pro kogeneraci, jsou pístové s vnitřním spalováním, odvozené od klasických mobilních spalovacích motorů. Konstrukčně jde o nejjednodušší koncepci a lze konstruovat různé výkony od 1 kW po desítky MW.

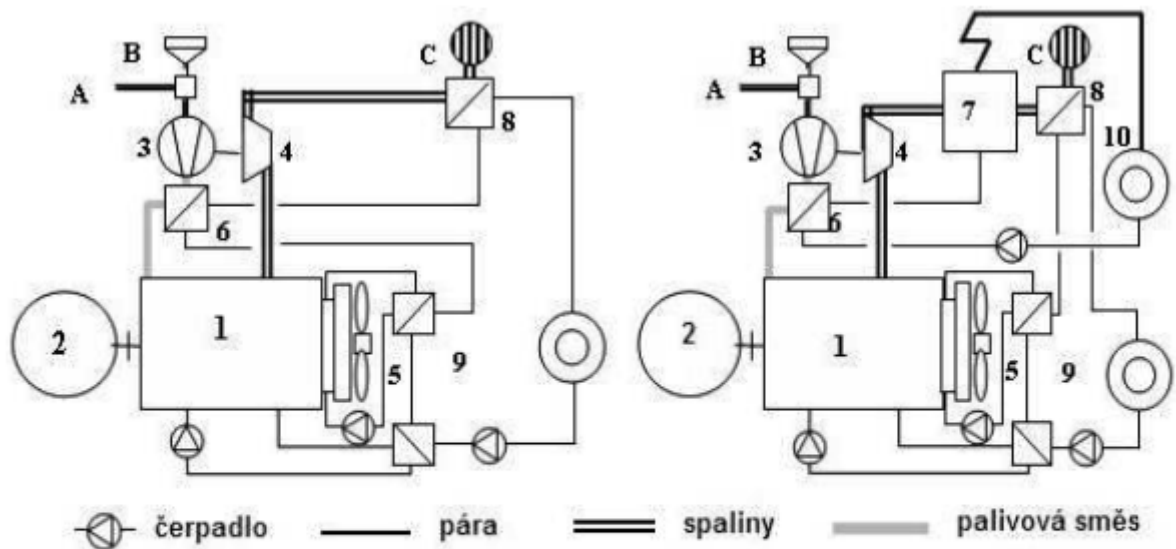
2.5.1 Vznětový motor

K zapálení paliva dochází ve válci samovznícením při vstřiku paliva do horkého stlačeného vzduchu. Účinnost těchto motorů na hřídeli je v rozpětí 35% až 45%, přičemž jmenovitý může dosáhnout 25MW.

2.5.2 Zážehové motory

Směs paliva se zapaluje pomocí elektrické jiskry. Účinnost na hřídeli se pohybuje mezi 27% až 43%, jejich výkonové rozpětí je menší. Nové generace motorů s předkomůrkou, viz níže, má směs stechiometrické složení dosahující výkonu nad 3 MW.

Pokud mají být spalovací motory využity pro kogeneraci, je zapotřebí je upravit, a to pro provoz na zemní či jiný plyn. Jedná se o úpravu palivového systému a hlavy motoru. [3]



a) dodávka tepla ve formě teplé nebo horké vody

b) dodávka tepla ve formě páry a horké vody

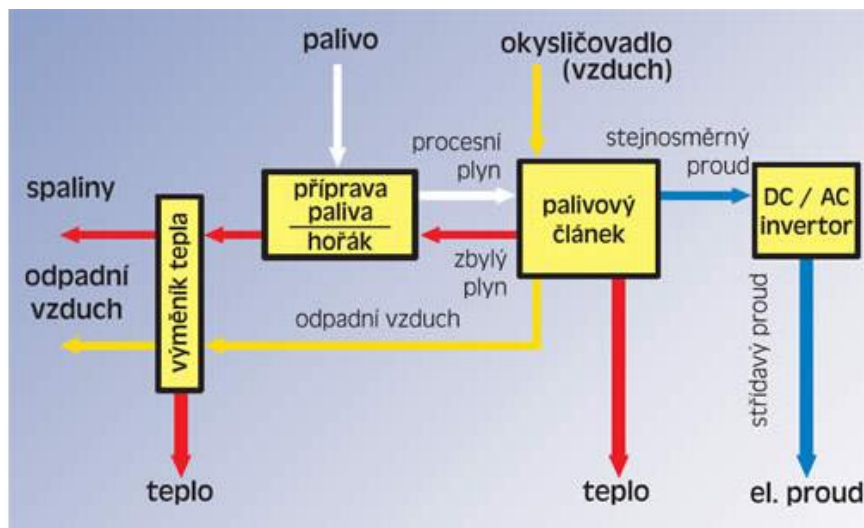
1 spalovací motor; 2 elektrický generátor; 3 kompresor přeplňovacího turbodmychadla; 4 turbína turbodmychadla; 5 okruh chlazení oleje a bloku válců motoru s ohříváký topné vody; 6 chladič stlačeného vzduchu; 7 parní kotel; 8 spalínový ohřívák topné vody; 9 okruh topné vody; 10 spotřebiče páry

Obr. č. 5. Základní zapojení motorů pro kogeneraci

V praxi se tato koncepce využívá především s upravenými dieslovými motory na zemní plyn či jiný plyn jako je například bioplyn nebo plyn ze zplyňování organického materiálu. Výkony jsou od desítky kW až do 5 MW.

2.6 Kogenerační jednotka s palivovými články

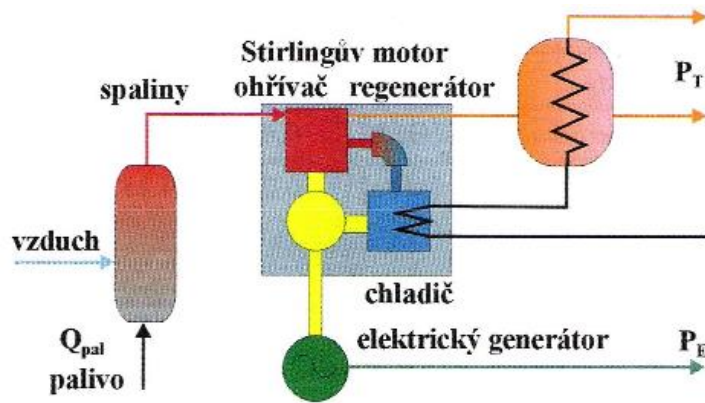
Výroba elektřiny a tepla pomocí palivových článků je založena na principu chemické reakce plynu s okysličovadlem v tzv. palivovém článku. Palivo s okysličovadlem se na katalyckém povrchu elektrod ionizují, ionty jsou vedeny elektrolytem k druhé elektrodě a uvolněné elektrony vytvářejí elektrický proud. Díky tomu, že chemická přeměna energie není limitována jako spalovací motory termodynamickými principy, dosahuje vyšší účinnosti. Často používaným plynem je zemní plyn, avšak nejvhodnějším palivem by byl vodík, ten se však špatně získává a skladuje. Okysličovadlo je vždy vzduch. Produktem reakce je voda (jedná se o proces inverzní k elektrolýze vody). Dále je vyráběn stejnosměrný elektrický proud, pro připojení do rozvodné sítě je zapotřebí střídače. [1]



Obr. č. 6. Schéma kogenerace s palivovým článkem [1]

2.6.1 Mikrokogenerační jednotka se Stirlingovým motorem

Předchozí varianty kogeneračních jednotek jsou buď to určené pro velké objekty, nebo jsou příliš drahé. Vhodným kandidátem pro malé kogenerační jednotky jsou zařízení se Stirlingovým motorem.



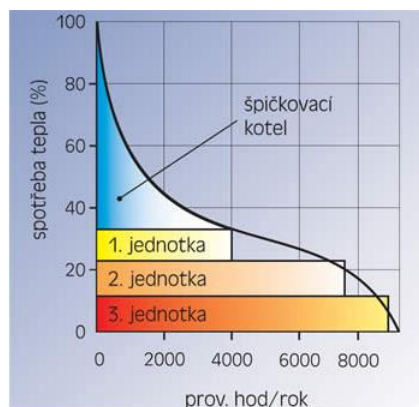
Obr. č. 7. Schéma kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem [4]

Požizovací cena takové jednotky je o dost nižší než jednotky s ostatními druhy pohonů a to z důvodu, že se nejedná o explozivní spalování a tím odpadají zařízení, jako je například ventilový rozvod, časování a zapalování.[4]

U tokových to jednotek se hodnoty výkonu elektrické energie pohybují od stovek W do desítek kW. Nejznámější výrobce kogeneračních jednotek se Stirlingovým motorem je firma Viessmann.

2.7 Využití kogeneračních jednotek

Kogenerační jednotka může z technického hlediska nahradit jakýkoliv zdroj tepla srovnatelného výkonu. Aby se instalace kogenerační jednotky ekonomicky vyplatila, musí jednotka běžet co nejvíce hodin za rok. Nejeftivněji jednotky pracují, pokud je odběr tepla celoroční. Proto se jeví jako nejvhodnější objekty pro instalaci: ubytovací zařízení, bazény, nemocnice a výtopy. Zde se může použít jako hlavní zdroj tepla a v zimě v období špiček jej může doplňovat běžný kotel.



Obr. č. 8 Pokrytí roční spotřeby tepla třemi kogeneračními jednotkami a špičkovacím kotlem

[1]

Velikost instalované kogenerační jednotky se odvíjí od spotřeby tepla v daném objektu, Výše zmíněná kombinace s běžným kotlem není jediná možná kombinace řešení. Další řešení je kombinace výkonnější kogenerační jednotky s akumulátorem tepla. V tomto případě se hledí na ekonomičnost provozu a jednotka se uvádí do provozu v době, kde je nejvýhodnější dodávat do sítě elektrickou energii. Jednotky mohou běžet i na ostrovní provoz, nijak se neliší od těch, které jsou připojeny na síť, jen musí stále běžet a jsou náročnější na regulaci a na projektování. Při projektování se musí brát ohled na ekonomičnost provozu, a vhodně zvolit výkon jak elektrické energii, tak teplené a instalovat dostatečné akumulátory, jinak se z ekonomického hlediska takový to provoz nevyplatí. [1]

3 Řízení kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka, jakož to i jiné generátorové jednotky potřebuje řízení. Aby řízení bylo správné a jednotka dosahovala co největší účinnosti, je zapotřebí správné umístění snímačů a vhodný algoritmus pro řízení. Pokud se toto dodrží a i z technického hlediska bude jednotka dobře zkonstruována, dosáhne se vysoké účinnosti. Pokud konstruktér jednotky sáhne po spalovacím či jiném explozivním motoru, bude potřebovat určité jednotku pro řízení motoru eventuálně další jednotky pro řízení poměru palivových směsí. Pokud mluvíme o generátorech, které budou dosahovat stovek kWe a výše, je tato koncepce správná, ale co se týče kogenerací v řádech jednotek a desítek kWe, je toto řešení nežádoucí. Aby cena malé kogenerace byla přijatelná, musí se řízení omezit na jednu řídicí jednotku, jejíž cena nebude vysoká. Modul by měl měřit energetické veličiny, motorové, tepelné a další, které jsou nezbytné pro běh jednotky. V kapitole 1 jsem zmínil různé druhy získávání energie, až na palivový článek se jedná o točivé stroje (generátory), u kterých je nutno snímat elektrické veličiny. Proto se pojdme podívat, jaká zařízení jsou dostupná na trhu pro tuto aplikaci.

3.1 Moduly dostupné na trhu

Jedna z firem, která se touto problematikou zabývá, je firma ComAp. V portfoliu produktů má řadu kontrolérů, jenž se dají využít pro generátory. Jako nejvhodnější volbou pro řízení kogenerační jednotky je InteliGenNTC BaseBox.

3.2 InteliGenNTC BaseBox

Jedná se o gen-set regulátor pro řízení motorgenerátoru. Má v sobě již naprogramované řízení, přiřazování a další potřebné procesy pro správný chod generátoru. Jednotlivé parametry generátoru se zadávají v příslušném prostředí. Avšak pokud se má tato jednotka použít pro kogeneraci, musí si uživatel sám naprogramovat ve FUPLA prostředí potřebné algoritmy pro regulaci teploty vody. Neboli řečeno po energetické stránce se nastavují pouze parametry, kdyžto po teplené se musí vytvořit potřebné algoritmy. Pokud chce uživatel grafický display, musí si jej dokoupit. Jestliže zákazníkovi nestačí vstupy a výstupy obsažené v InteliGenNTC BaseBoxu, musí si dokoupit rozšiřující moduly

InteliGenNTC Base box má tyto vlastnosti:

- Automatická se synchronizování se sítí (pomocí otáček nebo ECU)
- AMF funkce, zatížení, napětí a účinník
- Podporované sběrnice: CAN bus, Ethernetové připojení (RJ45), USB 2, 1× RS232 / 2× RS485 s podporou protokolu Modbus; Analog / GSM / ISDN / CDMA; SMS zprávy; ECU Modbus;
- AirGate support – vzdálená správa přes cloudový server ComAmp
- Měření generátorové hodnoty: U, I, Hz, kW, kVAr, kVA, PF, kWh, kVAhr
- Měření sítě: U, I, Hz, kW, kVAr, PF
- Volitelné měřicí rozsahy napětí a proudů – 120 / 277 V, 0–1 / 0–5 A
- Vstupy a výstupy konfigurovatelné pro různé potřeby zákazníků
- Redundance
- Historie (až 1000 záznamů) zákazníkem volitelnými seznamu uložených hodnot;
- programovatelné funkce integrované PLC, RTC
- Integrované konfigurovatelné ochrany

Fyzické vstupy a výstupy:

- Binární vstupy – 12
- Binární výstupy – 12
- Analogové vstupy – 3
- Dva třífázové napěťové vstupy 110V / 270V
- Dva třífázové proudové vstupy 1A/ 5A
- Napěťový výstup 2 Vpk-pk
- Řízení otáček
- Vstup pro magnetický senzor



Obr. č. 9 - InteliGenNTC Base box (vlevo) a InteliVision 5 (vpravo)

4 Generátory

Než se začneme zabývat proč a jak elektrické veličiny snímat, musíme se podívat na to, kde tyto veličiny vznikají a jaký mají charakter, abychom poté mohli navrhnout vhodný způsob měření, případně ovládání. Zdroje elektrické energie můžeme generovat dvěma různými generátory, a to synchronním generátorem nebo asynchronním generátorem. Každý z nich má své výhody a nevýhody, V následujícím textu bude popsán princip a jednotlivé kladné a záporné vlastnosti,

4.1 Asynchronní generátor

Asynchronní generátor pracuje na stejném principu jako asynchronní motor s tím rozdílem, že motor neroztáčíme elektrickým proudem, nespotřebujeme elektrickou energii, nýbrž je asynchronní stroj roztáčen jiným zdrojem a naopak je dodávána energie do sítě.

4.1.1 Princip činnosti asynchronního stroje

Hlavní význam pro popsání fungování asynchronního stroje má vznik točivého magnetického pole statoru. Točivé pole si lze představit jako pole permanentního magnetu, které se v prostoru otáčí. U asynchronního motoru se vytvoří pomocí proudu stojícího třífázového statorového vinutí, přičemž jsou vůči sobě prostorově posunuta o 120° a proudy jsou vzájemně časově posunuty o 120°.[5]

Asynchronní stroje mohou také pracovat jako asynchronní generátory, a to v případě, že pohaněním asynchronního motoru dosáhneme jeho mechanických otáček vyšších, než jsou otáčky synchronní, čímž indukovaná napětí a proudy v rotoru jsou opačného smyslu a stroj tedy dodává činný elektrický výkon do sítě. Poháníme-li stroj mechanickým momentem působícím proti otáčení točivého magnetického pole, pracuje jako synchronní brzda, tj. moment asynchronního stroje působí proti hnacímu mechanickému momentu.[6]

V praxi se uvádějí otáčky AM v otáčkách za minutu, pak vztah pro synchronní otáčky je:

$$n_{s1} = \frac{60 \cdot f_1}{p} (\text{min}^{-1}, \text{Hz}, -), \quad [1]$$

Kde p je počet pólových dvojic.

Mírou asynchronizmu, tj. rozdíl otáček synchronních a otáček motoru n je skluz, definovaný vztahem:

$$s = \frac{n_{S1} - n}{n_{S1}} \cdot 100 (\%). \quad [2]$$

Skutečné otáčky asynchronního motoru jsou pak dány vztahem

$$n = n_{S1} \cdot (1 - s) \quad [3]$$

Indukované proudy v obvodu rotoru vytvoří rovněž točivé magnetické pole rotoru, které se vzhledem k rotoru stroje otáčí rychlostí danou vztahem:

$$n_2 = n_{S1} - n = \frac{f_2}{p} \quad [4]$$

Kde frekvence f_2 je frekvence napětí a proudu ve vinutí rotoru definována jako

$$f_2 = n_2 \cdot p = (n_{S1} - n) \cdot \frac{f_1}{n_{S1}} = s \cdot f_1 \quad [5]$$

4.1.2 Výkon a moment asynchronního stroje

Jak bylo výše řečeno, mezi motorem a generátorem platí analogie tudíž i vztah pro výkon

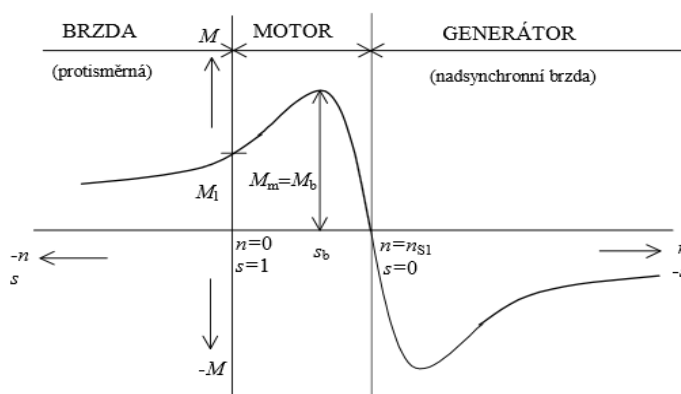
$$P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta_1 \quad [6]$$

Kde U_1 a I_1 jsou fázové veličiny. Účinnost je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_M}{P} \quad [7]$$

Kde P_m je výkon na hřídeli a P je výkon elektrický dodávaný do sítě

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P_n}{N_n} (N \cdot m, W, \text{min}^{-1}) \quad [8]$$



Obr. č. 10 Momentová charakteristika asynchronního stroje [5]

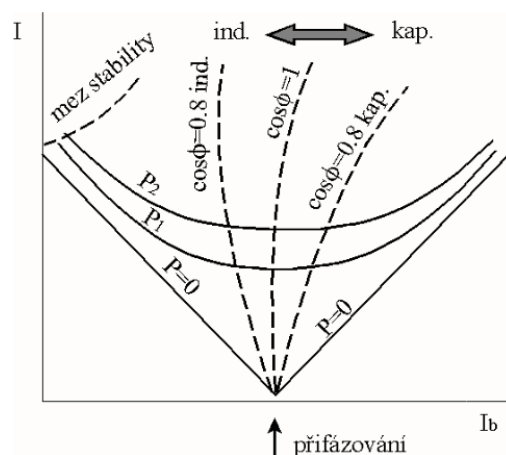
4.2 Synchronní generátor

Jedná se o elektrický točivý stroj, jehož rotor se otáčí synchronně s točivým elektromagnetickým polem vzniklým ve stroji. Synchronní alternátory představují hlavní zdroje, které napájejí energetické sítě. Alternátory jsou největší vyráběné točivé stroje a dosahují výkonů několika stovek MW. Alternátory poháněné parními, případně plynovými turbínami, se otáčí rychlostí 3000 ot/min. a nazývají se turbogenerátory. Alternátory s nižšími otáčkami se nazývají hydrogenerátory (podle jejich použití). Vyrábějí od výkonu jednotek W do MW. Výhodou synchronních strojů proti asynchronním motorům je možnost regulace účinníku velkých odběratelů se využívá pro kompenzaci účinníku. Nevýhodou synchronních strojů je obtížnější spouštění a potřeba zdroje pro napájení budicího obvodu.[7]

4.2.1 Princip synchronního stroje

Statorové vinutí tvoří tři fázové cívky, které je vzájemně prostorově natočené o 120°. Budící vinutí je na rotoru a napájí se stejnosměrným proudem ze stejnosměrné sítě nebo vlastního budiče neseného na společné hřídeli přes sběrací kroužky. Při konstantní rychlosti otáčení nabuzeného rotoru se indukují v cívkách statoru střídavá napětí. Statorové vinutí je tedy kotvou. Kmitočet indukovaných napětí je úměrný otáčkám rotoru n_1 a počtu pólů p . Při sinusovém prostorovém průběhu magnetického pole budou indukovaná napětí sinusová a v jednotlivých prostorově natočených cívkách vzájemně časově posunuta o 120°. Při souměrném zatížení alternátoru vytvoří trojfázové proudy statoru kruhové točivé pole, které má stejnou rychlost otáčení jako rotor.[7]

$$f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60} \quad [9]$$



Obr. č. 11: Regulační charakteristika synchronního stroje (křivky P jsou char. kompenzátoru)

[5]

5 Synchronizace

Synchronizace je jedna z kritických chvílí chodu motoru, proto je zapotřebí se na toto téma zaměřit. Elektrizací soustavu, která je propojena na rozsáhlém území, tvoří paralelní spojení generátorů. To umožňuje pohotovou dodávku elektrické energie do míst spotřeby. Připojování dalších jednotek k této síti nazýváme synchronizace neboli fázování. Například princip synchronizace u asynchronního generátoru je jeho velkým kladem, a to z důvodu, že jej není potřeba fázovat na síť jako je tomu u synchronních generátorů. Tím odpadájí náklady na náročnější elektroniku.

5.1 Synchronizace na síť asynchronního stroje

Jako příklad si můžeme uvést postup synchronizace na vodní turbíně, postup je následující: Generátor se připojí k síti, aniž by byla turbína poháněna vodou, tudíž generátor začíná pracovat jako elektromotor a dosáhne synchronních otáček, poté se otevře přívod vody. Turbína začne zrychlovat, až roztočí generátor na nadsynchronní otáčky a začne dodávat energii do sítě. Tím dojde k mechanickému zatížení stroje a ten se na těchto otáčkách ustálí. Pokud se asynchronní generátor připojuje do rozvodné sítě, není žádný problém, ale pokud má asynchronní generátor pracovat v režimu ostrovním nastává problém. Asynchronní generátor potřebuje ke své činnosti jalovou energii. Pokud se tak má dít, je zapotřebí technické řešení, které jalovou složku zabezpečí, jedním způsobem může být kondenzátorová baterie připojena paralelně ke svorkám generátoru. Ale v tomto případě je vhodnější synchronní generátor.[7]

5.2 Synchronizace na síť synchronního stroje

Při fázování synchronního stroje na síť nemá dojít k velkým nárazovým proudům a vyrovnávacím mechanickým momentům na alternátoru. K tomu je nutné, aby v okamžiku připojení byla okamžitá hodnota napětí sítě u_s a alternátoru u_g rovná a frekvence obou napětí stejná. Obecně můžeme průběh napětí sítě popsat:

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) \quad [10]$$

Podmínka pro přifázování je splněna, když:

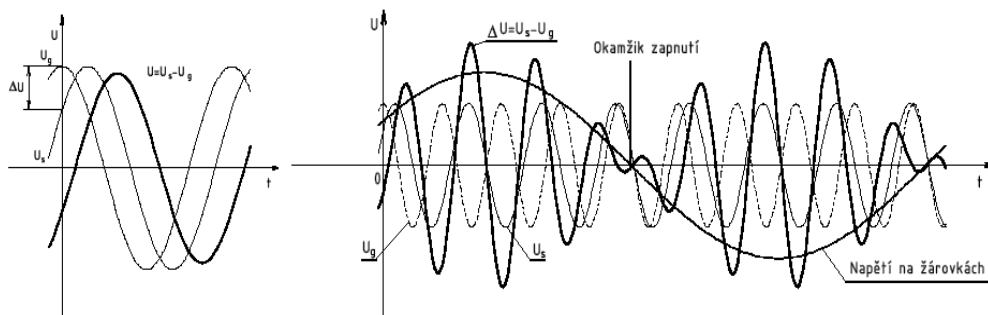
1. Je stejná velikost napětí stroje a sítě, tedy $U_G = U_S$. To se kontroluje pomocí voltmetrů, připojených na napětí stroje a sítě. Napětí stroje se reguluje na hodnotu napětí sítě přebuzením či odbuzením stroje. Stejně

napětí sítě a připojovaného generátoru je při fázování nutné, neboť rozdíl mezi oběma napětími se při zapnutí projeví jako náraz jalového proudu.

2. Kmitočty stroje a sítě jsou stejné tedy $\omega_S = \omega_G$. Kontroluje se frekventoměrem. Kmitočet stroje se poháněcím zařízením nastaví na kmitočet sítě. Shodnost kmitočtu obou spínaných dílů je důležitější než shodnost napětí. Odchyšky představují nárazy činného proudu. Tyto nárazy jsou vyvolány tím, že v okamžiku zapnutí se musí poměrně značná rotující hmota rotoru alternátoru urychlit, nebo zpomalit, podle toho má-li alternátor kmitočet nižší nebo vyšší než daná síť. Touto nahromaděnou kinetickou energií rotoru a její rychlou přeměnou v energii elektrickou se vysvětluje značný náraz činného proudu vznikající při fázování s rozdílem kmitočtu. Tento náraz způsobuje značné mechanické namáhání turbíny a alternátoru.

3. Fázový posun mezi napětím sítě a generátoru je minimální. Je nutná úhlová shoda fázorů napětí v okamžiku fázování, jinak vzniká proudový náraz způsobený rozdílem napětí obou fázorů – obr. 1a. Tento rozdíl napětí způsobí vyrovnávací proud, jehož maximální hodnota stoupá prakticky s fázovým úhlem. Jestliže při fázování je diference všech tří hodnot, tj. napětí, kmitočtu i úhlu, vyvine každá tato diference vyrovnávací proud a tyto proudy se vektorově sčítají.

4. Sled fází generátoru a sítě je stejný. To se dá vyzkoušet tzv. sledovačem fází (asynchronním motorkem), který se musí při připojení na stejné fáze stroje a sítě roztočit stejným směrem. [10]



Obr. č.12: Průběhy napětí obou soustav a jejich vzájemná časová poloha[10]

6 Měření elektrického napětí

Z předešlých kapitol plyne, že pro řízení generátorů budeme potřebovat měřit napětí. Jedná se o první z několika podstatných veličin. Jak je možné napětí měřit, jaké vlastnosti by měl měřicí přístroj mít, či jak je možné měnit jeho rozsah si na následujících odstavcích shrneme.

Přístroje, které slouží k měření elektrického napětí, se nazývají voltmetry. Tento přístroj se k měřenému obvodu připojuje vždy paralelně. Aby voltmetr neovlivňoval měřený obvod, je zapotřebí, co největšího vnitřního odporu. Tím je zabezpečeno, že většina proudu teče obvodem a ne přes voltmetr. Měření napětí může rozdělit na:

- Měření stejnosměrných napětí
- Měření střídavých napětí – zda nás zajímá efektivní nebo střední hodnota, eventuálně maximální

Ve většině případů je u voltmetru zapotřebí měnit rozsah. Na měřicí prvek je možno přivést určité maximální napětí (každá konstrukce se liší). Abychom mohli měřit napětí vyšší než je možno přivést na měřicí prvek, je nutno upravit měřicí rozsah. To se dá následujícími způsoby: [11]

- Předřadník – nejčastější metoda pro elektromechanické měřicí ústrojí
- Odporový dělič – hojně využívané zapojení
- Předřadný kondenzátor – využití pouze u elektrostatických voltmetrů
- Kapacitní dělič – vhodnější pro vyšší měřené kmitočty

Podrobnější popis měření napětí je možno najít v literatuře Elektrotechnická měření [11].

7 Měření proudů

Další veličinou, která vyplynula z kapitoly 3 je proud. Tato veličina je druhou důležitou veličinou, jenž je zapotřebí měřit. Pro připomenutí základních faktů o měření proudu slouží následující kapitola. K měření elektrického proudu se používají přístroje nazývané ampérmetry. Ampérmetr zapojujeme vždy do série s prvkem obvodu, jehož proud chceme změřit. Ampérmetr by neměl mít na obvod žádný vliv, úbytek napětí, kterým na něm při průchodu proudu vzniká, by měl být pokud co možno malý. Proto musí mít ampérmetr co nejmenší vnitřní odpor. Z tohoto důvodu se ampérmetr nikdy nesmí zapojovat do obvodu paralelně.

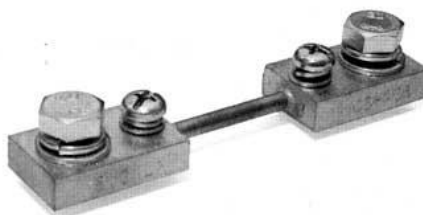
- Měření stejnosměrného proudu
- Měření střídavého proudu – sinusové, nesinusové, měří se efektivní hodnota

7.1 Změna rozsahu ampérmetru

Pro změny rozsahů ampérmetrů složí několik metod. Vybrané metody, jež jsou použity, nebo souvisí s touto prací, jsou následně zmíněny.

7.1.1 Bočník

Bočník je zařízení, jež slouží pro zvětšení měřícího rozsahu ampérmetrů, dále se používají v elektroměrných jednotkách pro střídavé napětí, jako snímací odpor.

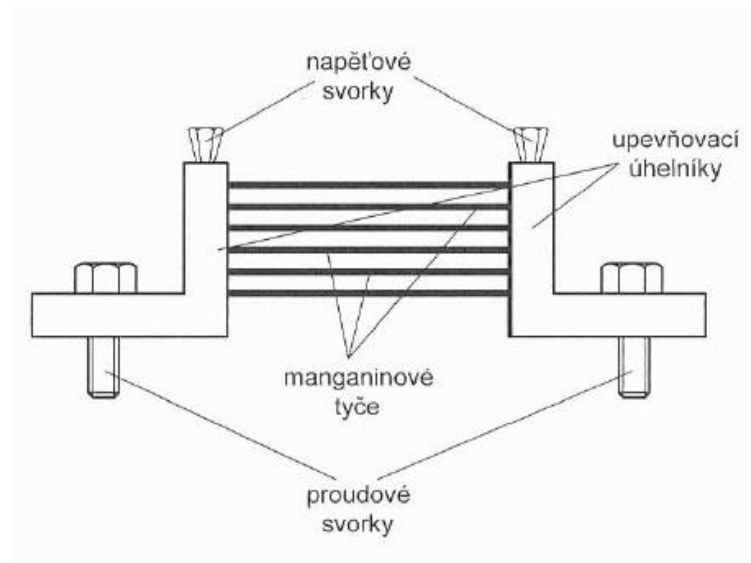


Obr. č. 13: Skutečné provedení bočníku

Z technického hlediska se při měření pomocí bočníku jedná o měření úbytku napětí na odporu. Odpor bočníku musí být velmi malý, aby nedocházelo ke ztrátám a příliš se nezahříval, proto se úbytek napětí na bočníku pohybuje v řádek desítek až stovek mV. [11]Velikost úbytku napětí na bočníku můžeme popsat následující rovnicí:

$$U = R_b \cdot I_b \quad [11]$$

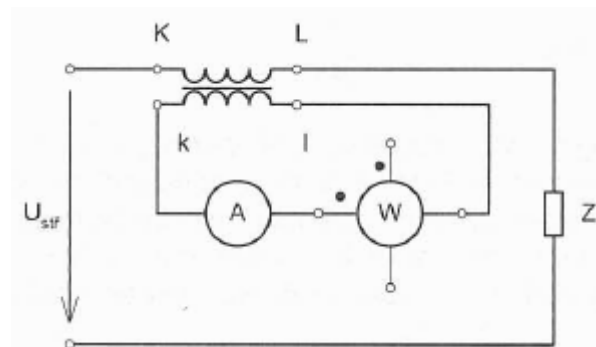
Bočníky určené pro velké proudy (nad 100 A) musí mít malý odpor, proto se zhotovují z několika paralelních silných manganinových tyčí upevněných mezi dva měděné úhelníky.



Obr. č. 14: Mechanické provedení bočníku pro velké proudy [11]

7.1.2 Měřicí transformátor proudou

Tento způsob zmiňuji z toho důvodu, že jej je nutno použít u každé větší kogenerační jednotky, protože vstupy pro snímání proudu jsou ve většině případů normalizované na maximální proud 5A. Měřicí transformátor proudu není přímo součástí práce, ale je nezbytným doplňkovým prvkem pro použití. MTP se používají ke změně rozsahů (zvětšení, někdy i zmenšení) střídavých ampérmetrů. Primární vinutí se zapojí do série se zátěží, kterou protéká měřený proud, na sekundární vinutí měřicího transformátoru se připojí jednotlivé přístroje sériově (ampérmetr, proudová cívka, wattmetru, elektroměr.) Vstupní primární svorky měřicího transformátoru proudu se označují písmeny **K**, **L**, výstupní sekundární **k**, **l**. [11]



Obr. č. 15 : Zapojení měřicího transformátoru pro měření proudu[11]

Převod měřicího transformátoru proudu je jako u všech energetických transformátorů dán poměrem počtu závitů a zároveň obráceným poměrem proudů:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} [12]$$

U měřicích transformátorů proudu nikdy nesmí dojít k rozpojení sekundárního obvodu. Jmenovitý sekundární proud měřicích transformátorů proudu je 5 A. Převod měřicího transformátoru se udává ve tvaru zlomku např. 20/5 nebo 100/5 atd.

Nejčastěji je provedení do rozvodového zařízení, kde transformují proud pro měření spotřeby elektrické energie elektroměrem. [11]

Podrobnější popis měření proudů je možno najít v literatuře Elektrotechnická měření [11].

7.1.3 Hallova sonda

Tento způsob měření si probereme podrobněji, jelikož se navrhovaném zapojení nachází ICs, jenž má Hallovu sondu. Zmíním některá fakta o tomto způsobu měření proudu, přičemž vyplyne i několik zásadních poznatků, které je zapotřebí v návrhu aplikovat.

Hallova sonda je založena na Hallově jevu. Podrobný popis najdeme v literatuře [8].

Zajímavým tématem je CMOS technologie jenž, je použita ve zvoleném ICs.

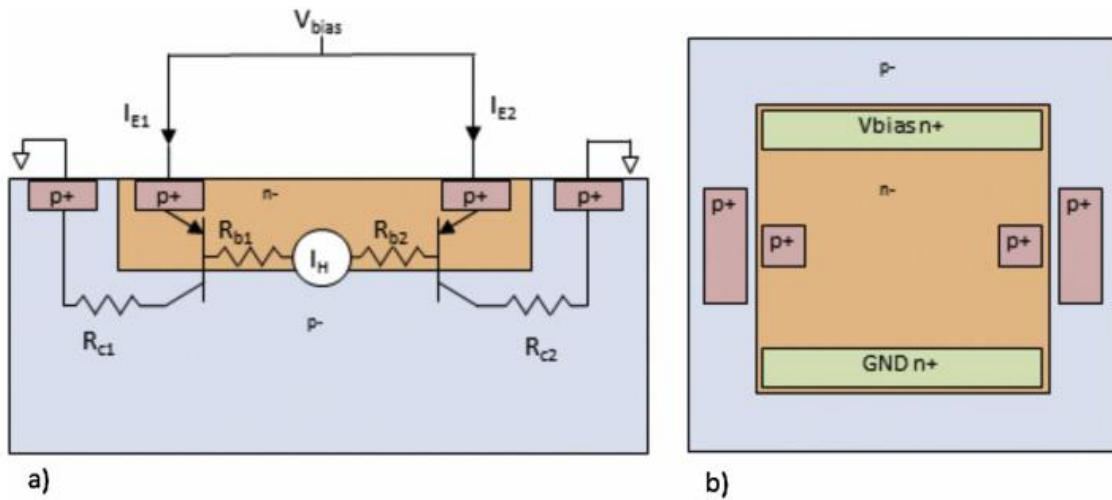
7.1.4 Hallova sonda v CMOS technologii

Jak vytvořit Hallovu sondu v CMOS technologii nejjednodušším způsobem popisuje následující odstavec. Obrázek 12 znázorňuje příčný řez a pohled shora na CMOS Hallův senzor. V příčném řezu je i znázorněno funkční zapojení. Jedná se o dva vertikální PNP bipolární tranzistory, jenž mají společný kolektor. Je třeba si uvědomit, že proud substrátu bude protékat přes rezistory R_{C1} a R_{C2} a v důsledku napětí generovaných v substrátu by zde mohl vznikat jev zvaný lat-up¹. Proto musí být p+ substrát, na který jsou přivedeny kontakty, dostatečně široký a umístěn co nejbližší k p+ emitoru v n- jámě. Toto je vidět na obrázku při pohledu shora na strukturu. Je možné,

¹Lat-up – jev jenž, může vzniknout ve struktuře CMOS, kde jsou tranzistory s kanálem P i N blízko sebe, za určitých okolností se tato struktura může chovat jako tyristor. Přivedeme-li na vývody obvodu CMOS napětí přesahující rozsah vymezený napájecími přívody, může dojít k sepnutí této parazitní tyristorové struktury, takže obvodem začne protékat velký proud vedoucí k jeho přehřátí a obvykle i ke zničení.

aby předpětí Hallovy sondy bylo takové, že se tranzistory ocitnou v aktivní oblasti, kde mají vlastní proudový zisk a tím i signál zesilují.[8]

Důležitý poznatek je, potřeba přesného předpětí, ale tento zdroj je již vyřešen v ICs. Ovšem je potřeba ICs se sondu napájet a tím i přibude v návrhu konstrukce napájecího zdroje.



Obr. č. 16: a) řez strukturo CMOS a principiální zapojení b) pohled shora na CMOS strukturu [8]

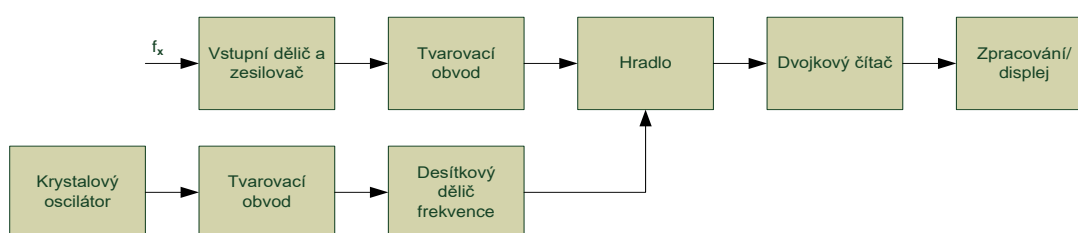
8 Měření kmitočtu

Měření kmitočtu u motorických je důležité např. z důvodu synchronizace na síť, při nesprávném měření může dojít k fatálním následkům. Proto je nutné si o měření kmitočtu něco říci. Kmitočet je jednou z charakteristických veličin periodicky proměnných napětí a proudů a je definován počtem period sledované veličiny za sekundu. Spolu s efektivní hodnotou napětí je základním parametrem střídavého elektrického signálu. Pro rozvodné sítě ve světě i u nás je normalizovaná kmitočet 50 Hz, v některých státech (USA, Japonsko) se používá kmitočet 60 Hz.[11] Kmitočet se dá měřit několika různými způsoby, například:

- Vibračními kmitočtoměry
- Ručičkovými kmitočtoměry
- Číslicovou metodou

8.1 Přímé číslicové měření kmitočtu

Pro měření kmitočtu ve výsledné konstrukci se kmitočet jako i ostatní veličiny měří číslicově, proto několik slov o tom, jak je toto měření koncipováno. Blokové schéma jednoduchého přístroje pro přímé měření kmitočtu je na obr. 17. Konstrukce se skládá z dvojkového čítače a řady pomocných obvodů - vstupního děliče a zesilovače, což je blok, který upravuje velikost přivedeného signálu na úroveň, kterou přístroj zpracovává. Tvarovací obvody slouží k úpravě měřených a pomocných veličin na obdélníkový průběh. Hlavní hradlo slouží jako elektronický spínač, který je spínán na určitou dobu. Pro nastavení doby sepnutí hradla a tím i doby přivedení impulzů na čítač slouží spodní větev obvodu. Kmitočet se měří přímou metodou. Čítač čítá po určitou dobu (od 1 μ s do 10 s v dekadických stupnicích) obdélníkové impulzy, jejichž kmitočet je shodný s kmitočtem přivedeného signálu. Po ukončení načítání se buď-to zobrazí, nebo dále zpracovává hodnota kmitočtů měřeného signálu. Podrobnější popis měření frekvence je možno najít v literatuře Elektrotechnická měření [11].



Obr. č. 17 :Schéma přístroje pro přímé měření kmitočtu

9 Měření fázového posunu

Měření fázového posuvu je důležité z důvodu maximalizace účinnosti dodávané energie. Pokud kogenerační jednotka bude konstruována se synchronním motorem a bude pracovat na ostrovní provoz, je zapotřebí měřit fázový posun a reagovat na něj, aby bylo plně využito jejího potenciálu. V případě že se na síti nachází zařízení jako motor, například výtahy, jsou zde proudové rázy a spotřeba jalové složky viz kapitola 4.1. Proto je nutné, aby kogenerační jednotka bylo schopna reagovat v reálném čase.

Fázový posun vyjadřuje časový rozdíl dvou sinusových průběhů stejného kmitočtu. V silnoproudé elektrotechnice nás obvykle zajímá fázový posun mezi proudem a napětím. Zde se vyjadřuje fázový posun pomocí svého kosinu, a tuto veličinu nazýváme *účinník*. Účinník může být podle polohy fázoru proudu vůči fázoru napětí buď kapacitního, nebo induktivního charakteru. Předbíhá-li proud napětí, hovoříme o kapacitním účinníku, je-li proud za napětím zpožděn, má zátěž induktivní charakter i účinník.

Většina silnoproudých zařízení (zejména těch, která jsou vybaveny motory či transformátory) má účinník induktivní charakter, pouze např. u rozlehlých kabelových sítí dominuje kapacita kabelů, jejich proud tedy předbíhá napětí, což je kapacitní účinník sítě. V jednofázových sítích se velikost účinníku snadno zjistí nepřímo při měření výkonu podílem naměřeného výkonu a elektivní hodnot napětí a proudu.

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} \quad [13]$$

Znalost hodnoty účinníku je velmi důležitá v silnoproudé elektrotechnice, zejména tam, kde se jedná o provozy s velkým počtem indukčních motorů, které účinník sítě značně snižuje a způsobují tak její zatížení jalovou složkou proudu.

Je-li účinník sítě $\cos \phi = 1$, protéká sítí pouze činný proud, který způsobuje činný výkon, který můžeme využít k přeměně např. na mechanickou práci. Jalová složka proudu je nulová. Jalový proud žádnou práci nekoná, pouze síť zatěžuje. Proto je nutné všechny provozy se zařízeními, která mají velkou indukčnost, vybavit kapacitními bateriemi, které provádějí svým kapacitním proudem tzv. kompenzaci účinníku na hodnotu blízkou $\cos \phi = 1$. V praxi se hodnota $\cos \phi = 0,95$. Další možností kompenzace je využití synchronního generátoru a vybudit ho, tak aby měl kapacitní charakter.

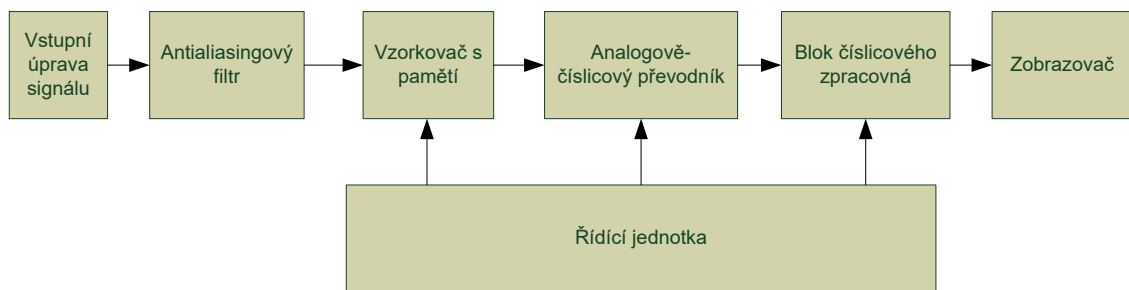
Podrobnější popis fázového posuvu a jeho měření je možno najít v literatuře Elektrotechnická měření [11].

10 Číslicové zpracování měřeného signálu

Jak jsem výše naznačil, měřené veličiny budou zpracovávány v digitální podobě. Jak toto zpracování probíhá a jaké jsou jeho úskalí, rozebereme v následující kapitole.

V dnešní době se až na výjimky používají převážně přístroje s číslicovým zpracováním. Jádrem celého zpracování je analogově–číslcový převodník. Digitalizace spočívá ve vzorkování v čase, kvantování v úrovni a kódování. Důsledek digitalizace signálu spojitého v čase je vznik periodického frekvenčního spektra signálu. S tím to souvisí i vznik tzv. kvantizačního šumu nebo kvantizační chyby.[12]

Obecně se dá popsat měřicí přístroj využívající číslicové zpracování signálu následujícím schématem.



Obr. č. 18: Obecné blokové schéma měřicího přístroje využívajícího číslicové zpracování signálu

Blok vstupní úpravy signálu upravuje úroveň signálu na hodnotu zpracovatelnou dalšími obvody. Může se jednat například o frekvenčně kompenzovaný vstupní dělič v kaskádě se zesilovačem. Antialiasingový filtr je dolnofrekvenční propust, který propouští frekvence měřeného signálu od nulové frekvence po f_h , která je zde menší nebo rovna polovině vzorkovací frekvence f_s . Vzorkovač s pamětí je obvod, který odebírá z analogového signálu vzorky v okamžicích definovaných vzorkovacími impulsy. Vzorky mohou nabývat libovolných hodnot v měřicím rozsahu přístroje, přičemž výstupní napětí vzorkovače je udržováno konstantní a rovné hodnotě vzorku až do odebrání vzorku následujícího. V analogově–číslcovém převodníku jsou hodnoty vzorků převedeny na čísla neboli kvanta a jsou kódovány (čísla jsou vyjádřena konečným počtem číslic, takže jich je v měřicím rozsahu konečný počet). Blok číslicového zpracování může být tvořen mikrokontrolérem nebo signálovým procesorem. Zde jsou hodnoty vyhodnocovány upravovány pro další zpracování a případně ukládány. Někdy je zapotřebí zpracovaný signál převést zpět do analogové

podoby. K tokovému to úkonu je potřeba využít číslicově–analogového převodníku a rekonstrukčního filtru. Z DAC převodníku je výstup schodovitý a rekonstrukční filtr (dolnoproustný filtr, většinou stejný jako antialiasingový filtr) tyto schody vyhladí. [12]

Podle typu měřicího přístroje můžou být kladeny nároky na analogově–číslcový blok. Musí se volit kompromis mezi rychlostí a přesností. Nejpřesnější převodníky bývají nejpomalejší a nejrychlejší mají malou rozlišitelnost. [12]

10.1 Vzorkování signálu

Ze signálu, který je měřen se v pravidelných intervalech T_s odebírají vzorky, čili hodnoty signálu v okamžicích $n \cdot T_s$, kde n je celé kladné číslo. Navzorkované hodnoty se následně převedou na čísla, uloží do paměti a jsou určeny k číslicovému zpracování nebo zobrazení. Původní analogový signál lze z dat získat, pokud byla splněna tzv. vzorkovací věta. Je-li vzorkován frekvenčně omezený signál s horní mezní frekvencí f_M v ekvidistantních okamžicích s periodou

$$T_s = \frac{1}{f_s}, \quad [14]$$

pak můžeme původní signál získat zpět bez ztráty informace, je-li splněna podmínka $f_s \geq 2 \cdot f_M$. V praxi jsou měřené signály frekvenčně neomezené, proto se na vstupu používá dolnofrekvenční propust. Frekvenční spektrum vzorkovaného signálu se totiž periodicky opakuje s frekvencí f_s . Při nesplnění se opakující se části překryjí, původní spektrum v intervalu $0 \div \frac{f_s}{2}$ se opakující se části překryjí, původní spektrum se zdeformuje a není možno z něho získat původní signál. Tato chyba se nazývá aliasing. [12]

10.2 Analogově – číslicové převodníky

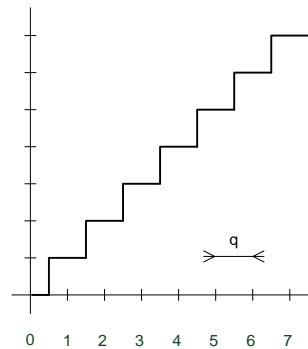
V obvodech, které jsou použity v zapojení jsou použity analogově–číslcové převodníky pro převod měřeného signálu do digitální podoby, jejich vlastnosti si proberme následovně.

ADC je obvod, jenž převádí napětí, které je přiváděno na jeho vstup na odpovídající číslo. Toto číslo je vyjádřené nejčastěji ve dvojkové číselné soustavě. Při vzniku číslicových měřicích přístrojů byly analogově–číslcové převodníky využívány zejména jako základní blok číslicových voltmetrů. V tom to použití není hlavní rychlost převodu

ale přesnost. Každý ADC obsahuje zdroj referenčního stejnosměrného napětí U_r a dvojkové číslo B na jeho výstupu pro n -bitový ADC zpracovávající napětí jedné polaridy, vyjádřit výrazem:

$$B \doteq \left(\frac{U_1}{U_r}\right) \cdot 2^n \quad [15]$$

Kde U_1 je vstupní napětí, které se může měnit v rozsahu 0 až U_{\max} . Výstupní kód z analogově-číslcového převodníku může nabýt pouze konečného počtu hodnot, odpovídajících ve většině případů rovnoměrně rozloženým úrovním přes celé pásmo vstupního napětí ADC. Vzdálenost sousedních napětových úrovní q je tzv. kvantovací krok ADC, odpovídají tzv. nejméně významnému bitu LSB. Převodní charakteristika ADC je tedy schodovitá funkce.[12 Pro 3-bitový ADC je znázorněna na obr. 19.



Obr. č. 19: Převodní charakteristika tříbitového analogově-číslcového převodníku

10.3 Sigma-delta ADC

Sigma-delta ADC jsou použity v obvodech, jež jsou na vyvíjené měřící desce. Jedná se o klíčový obvod, který jako první přichází do styku s analogovými průběhy a převádí je na číslo v digitální podobě. Jak tento převodník funguje a jaké jsou jeho vlastnosti uvádím následovně. Jedná se o jeden z novějších konstrukcí. Umožňuje dosáhnout velmi vysoké linearity a odpovídajícího rozlišení. Jsou určeny zejména pro zpracování pomalejších signálů v pásmu desítek Hz až desítek kHz. Je možné je použít i v přesných číslcových voltmetrech. Vynikajícího rozlišení $\Sigma - \Delta$ ADC je dosaženo zapojením složeného z tzv. sigma-delta modulátoru a číslcového filtru. Využívá se několika algoritmů číslcového zpracování signálu. Sigma-delta modulátor provádí rychlé vzorkování signálu, signál je vzorkován frekvencí f_s K -krát přesahující frekvenci požadovanou vzorkovací větou. K je tzv. koeficient převzorkování, $K \gg 1$. $\Sigma - \Delta$ modulátor se skládá z analogového filtru s frekvenčním přenosem $H(f)$

v nejjednodušším případě – modulátor 1. Řádu – integrátoru), napěťového komparátoru, tzv. D-klopného obvodu překlápěného signálem $u_H(t)$ o frekvenci f_s a záporné zpětné vazby, ve které je pouze přepínač.

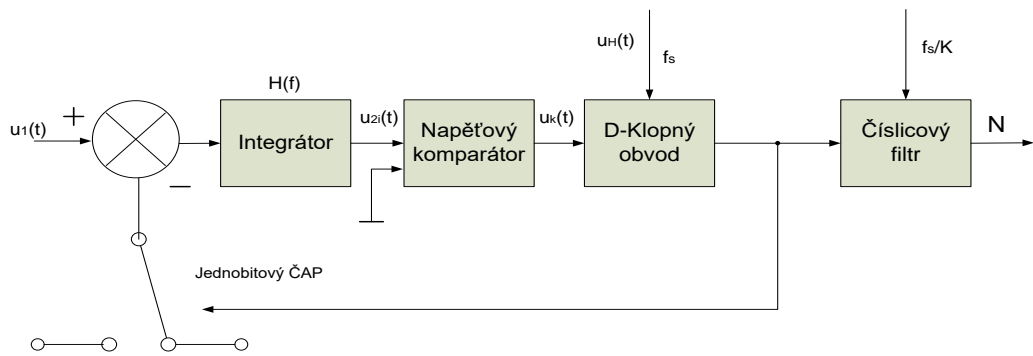
Zjednodušeně lze vysvětlit princip tohoto typu ADC pomocí časových průběhů napětí modulátoru. Označení odpovídá obr. 20., frekvence pulsů $u_H(t)$ je f_s . Výstup číslicového filtru je dán vztahem:

$$N \doteq \left(c \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 + T_2} \right), [16]$$

Kde c je konstanta závislá na napětí U_R a koeficientu převzorkování K (Ve skutečnosti je činnost složitější). Vyráběné ADC používají v modulátoru místo integrátoru analogové filtry vyššího řádu. Číslicový filtr má charakter dolnofrekvenční propusti, který průměruje výstupní sériovou posloupnost bitů z modulátoru a současně provádí tzv. decimaci vzorkovacího signálu, čili vybírá z výstupního signálu pouze každý K -tý vzorek. Frekvence jeho výstupního signálu je tedy $\frac{f_s}{K}$ a ta musí vyhovovat vzorkovací větě aplikované na vstupní signál převodníku. Výsledný efekt činnosti číslicového filtru je odfiltrování frekvenčního složek signálu nad $\frac{f_s}{2}$. U n -bitového ADC jsou výstupem číslicového filtru n -bitová slova N , která je možno převést do paralelního tvaru a dál číslicově zpracovávat. AČP také často obsahují kalibrační obvodům samočinně kompenzující změny nuly a zesílení.

$\Sigma - \Delta$ ADC představují alternativu kvalitních integračních převodníků pro měření stejnosměrných napětí. Při použití $\Sigma - \Delta$ ADC se předpokládá použití samostatného převodníku na každá kanál. Podrobnější o ADC a digitalizace je možno najít v literatuře Elektrická měření: přístroje a metody [12].

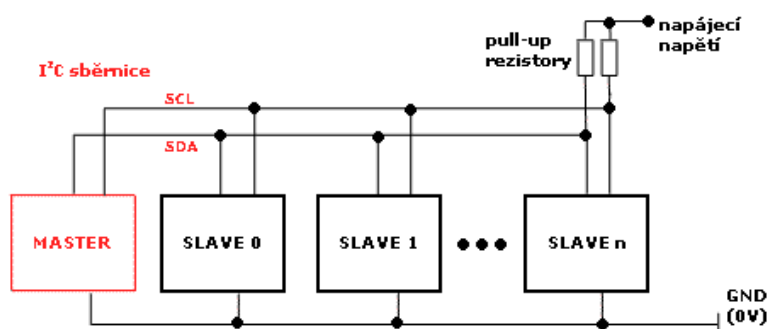
- Klady – Jsou malé, levnější a při $f_s = 10$ Hz mohou účinně potlačovat sériové rušení síťové frekvence
- Zápory – Velké zpoždění reakce výstupu na změny vstupu (10 ms) a s tím související nevhodnost tohoto AČP pro vícekanalová měření při přepínání kanálů multiplexorem.



Obr. č. 20: Základní blokové schéma AČP se sigma-delta modulací

11 Sběrnice I²C

Komunikace mezi procesorem a měřicí modulem probíhá pomocí sběrnice I²C. Název I²C pochází z IIC bus. Jak je již z názvu patrné, jedná se o interní datovou sběrnici sloužící pro komunikaci a přenos dat mezi jednotlivými integrovanými obvody většinou v rámci jednoho zařízení. Vyvinuta byla formou Philips (dnes NXP) v roce 1982. Od té doby prošla několika vylepšeními. Tuto sběrnici podporuje většina zařízení od všech výrobců. Jedná se především o mikrokontroléry, sérové paměti, inteligentní LCD, audio a video obvody, ADC a DAC převodníky další typy obvodů. Její předností je, že obousměrný přenos probíhá pouze po dvou vodičích - data SDA (seriál data) a hodiny SCL (seriál clock). To především u mikrokontrolérů výrazně optimalizuje nároky na počet vstupně-výstupních pinů a celkově zjednodušuje výsledné zapojení. Na jednu sběrnici může být připojeno více integrovaných zařízení. Základní verze adresování je 7 bitová, rozšířená verze je 10 bitová. Základní verze nám umožňuje připojit 127 zařízení, rozšířená potom 1023, přičemž má každý svoji adresu. [13]



Obr. č. 21: Možné propojení jednotlivých obvodů [13]

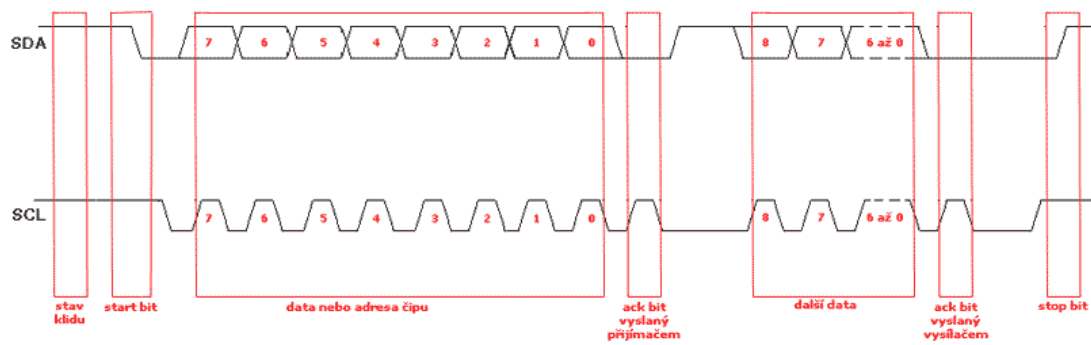
V praxi bývá toto číslo menší, jelikož jejich adresu nelze určit všemi 7 (10) bity ale třeba jen třemi. Někdy nelze určit vůbec a je dána na pevně pro daný typ čipu. Z toho plyne, že takových- to typů nemůže být na sběrnici více jak jedno. Přenosová rychlost sběrnice je pro většinu aplikací dostatečná i v základní verzi, kde je tato frekvence 100 kHz. Ve vylepšených verzích může hodnota frekvence nabývat hodnot 400 kHz nebo 1 MHz. Tuto možnost mají jen některé obvody. Rychlost přenosu musí být pochopitelně přizpůsobena nejpomalejšímu obvodu na sběrnici. Oba vodiče musí být implicitně v logické jedničce, a to je zajištěno pull-up rezistory. Jejich odpory mají hodnotu v řádech jednotek kiloohmů. Čím je vyšší komunikační frekvence, tím musí být nižší hodnoty těchto odporů. Pro 100 kHz postačuje 4700 Ω [13]

11.1 Přenos dat po sběrnici I²C

Jelikož se jedná o MASTER-SLAVE komunikace, musí být jeden obvod definován jako master, většinou se jedná o mikrokontrolér. Ostatní obvody jsou v slave. Tato komunikace umožňuje i tzv. multi-master, kde je více obvodů jako master.

Master při jakémkoli přenosu generuje hodinový signál na vodiči SCL. V případě, kdy jeden čip vysílá, přijímají všechny ostatní a pouze podle adresy určují, zda jsou data určena jim. Obvod, který chce vyslat/přijmout data musí nejprve definovat adresu čipu, s kterým chce komunikovat a zda půjde o příjem nebo vysílání, tj. čtení či zápis. Toto určuje R/W bit, který je součástí adresy. Přenos probíhá pomocí kombinování následujících celků:

- **Stav klidu** - Je zajištěn logickými jedničkami na obou vodičích, master tedy negeneruje hodinový signál a neprobíhá žádný přenos. Logické jedničky jsou na obou vodičích zajištěny pull-up rezistory (rezistory mezi vodičem a napájecím napětím), takže klidový stav nastane i pokud jsou výstupy obvodu master ve stavu vysoké impedance, tj. odpojeny
- **Start bit** - Zahajuje přenos nebo jeho další část. Je generován tak, že se změní úroveň SDA z + na 0 zatím co je SCL v logické 1.
- **Stop bit** - Ukončuje přenos. Je generován podobně jako start bit. Logická úroveň SDA se změní z 0 na 1 zatím co SCL v logické 1. Stop bit může být generován pouze po “nepotvrzeném přenosu“, tedy pouze po přijetí ACK v logické 1.
- **Přenos dat** – Data jsou přenášena po 1B tedy 8 po sobě jdoucích bitů od nejvyššího po nejnižší. Při přenosu dat se může logická úroveň na SDA měnit pouze, pokud je SCL v logické 0. Při každém pulzu na SCL je přenesen jeden bit.
- **Potvrzující ACK bit** - Tento bit slouží k potvrzení správného přijetí dat. ACK bit se odesílá stejným způsobem jako by se odesílal devátý bit dat, ale s tím rozdílem, že ho generuje obvod, který přijímal a nikoli ten co data odesílal. Pokud přenos proběhl v pořádku, tak odešle logickou 0. Logická 0 potvrzujícího bitu znamená rovněž to, že je přijímač připraven na příjem dalšího byte, který následuje okamžitě po něm při dalším pulzu na SCL. Pokud přenos selhal, odešle logickou 1. Nebo pokud má dojít k ukončení přenosu, tak “neodešle nic“. Pull-up rezistor zajistí, že bude na SDA logická 1 a ACK bit (v logické 0) odešle vysílač. [13]



Obr. č. 22: Časový průběh logických úrovní na vodičích SDA a SCL [13]

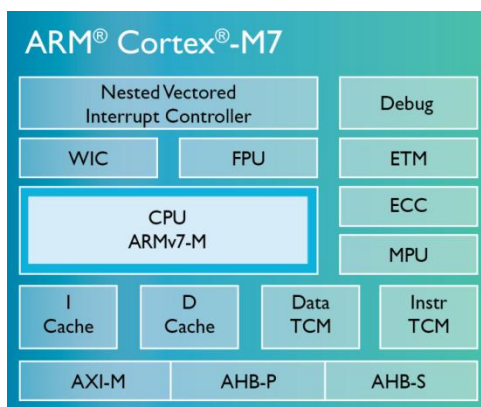
12 Mikrokontrolér STM32F746

Mikrokontrolér, jenž je použit v práci, je STM32F32F746. Jedná se o mikrokontrolér od firmy STMicroelectronics. Je to 32-bitový mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex – 7, jenž je založen na architektuře ARMv7. Obsahuje jednotku FPU, adaptivní real-time akcelerátor a paměti L1-cache s 4 KB datovou cache paměti a 4 KB instrukční cache paměti. Dále je tu podpora externí flash paměti. Frekvence jádra je na 216 MHz s výpočetním výkonem 462 DMPIS. Dále je tu podpora LCD a to jak paralelní interface, tak podpora TFT. Disponuje low-power modem, RTC, 12-bitovými D/A a A/D převodníky, 18 časovači, některé jsou 16-bitové, některé 32 bitové a 16 kanálovým DMA řadičem. Podporované sběrnice jsou: USART, I²C, SPI, CANs, HDMI, SPDIFRX, USB, Ethernet, atd. Podrobné blokové schéma viz příloha D. [16]

12.1 Architektura ARMv7

Tato architektura se rozděluje do různých úrovní - profilů:

- **Profil A (ARMv7-A)** – je určen pro komplexní aplikace a operační systémy, jakou je například Linux nebo Windows Embedded, které potřebují výkonný procesor, podporu virtuální paměti jednotkou správy paměti a případně hardwarovou podporu aplikací napsaných v programovacím jazyku Java.
- **Profil R (ARMv7-R)** – určen především pro real-time systémy, které potřebují vysoký výpočetní výkon a krátkou dobu reakce.
- **Profil M** - tento profil je rozdělen na dva, jeden ARMv7-M, do kterého patří jádro M3 a ARMv7E-M a druhý, do kterého spadá Jádro M4 a M7. Obě jádra jsou určena pro mikrokontroléry, kde je potřebný dostatečný výkon procesoru, rychlá odezva na přerušení, ale hlavním kritériem je nízká cena a spotřeba energie.[14]



Obr. č.23: Uspořádání jádra M7 [15]

Mezi základní vlastnosti procesoru Cortex-M7 patří:

- Harvardská architektura, která umožňuje čtení instrukce a čtení/uložení dat
- Instrukční sada Thumb-2
- 6-stupňový superscalar zřetězením instrukcí s predikcí
- Volba plavoucí desetinné čárky s jednotkovou přesností eventuálně s dvojitou přesností.
- Zvětšena datová sběrnice z 32 bitů na 64 bitů
- Násobení dvou 32 bitových hodnot s výsledkem 64-bitovým
- 32b hardwarové dělení
- DSP rozšíření a SIMD aritmetika [15]

13 Návrh

Jak bylo výše zmíněno, kogenerační jednotka dodává energii ve formě tepla a elektrické energie. Tyto dvě energie jsou se sebou spjaté, a to z toho důvodu, že teplo vzniká jako odpadní energie při zahřívání a spalování (vznětové, zážehové turbínové motory a další točivé stroje). Důležitým prvkem pro řízení je snímání elektrických veličin distribuční sítě a generátoru. Aby byl zaručen bezproblémový chod, je nutné, aby řízení, a tím pádem i snímání elektrických veličin, byly bezchybné a robustní. Pro měření napětí a proudů jsem již zmiňoval různé měřicí konstrukce a zapojení, ale ty se hodí především pro laboratorní měření. Co se týče komplexního měření, je zapotřebí využít digitalizace změřených veličin, a s nimi dál pracovat. Zařízení pracuje se signálem o frekvenci 50 Hz a může na události tohoto signálu i reagovat.

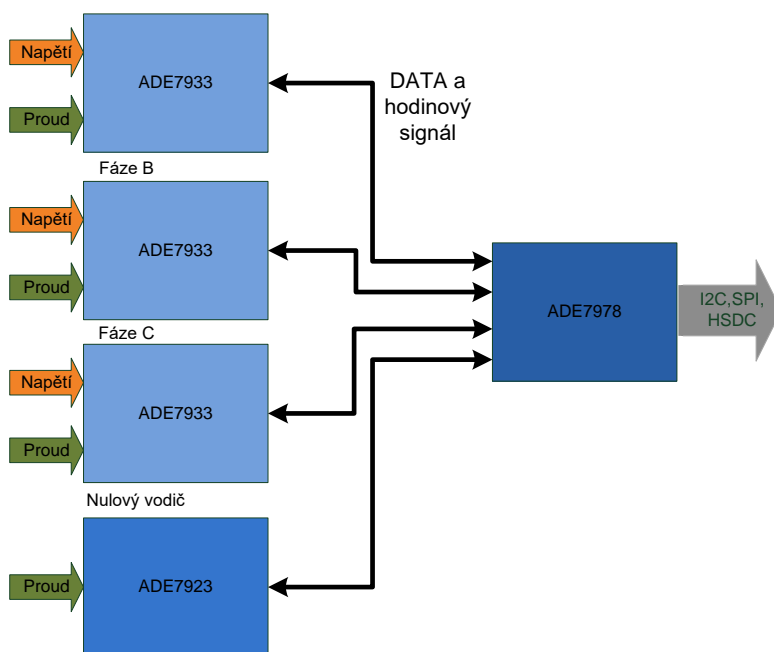
13.1 Měření napětí a proudů

Při realizaci jsem si musel uvědomit, že měřené veličiny nebudou v jednotkách či desítkách voltů, ale ve stovkách voltů, přesněji 230 V mezi fázovým a nulovým vodičem a 400 V mezi dvěma fázemi. Co se týče proudu, tak ten se může pohybovat od jednotek A až po desítky. V první řadě je nutné, aby se analogové zpracování provádělo v co nejméně krocích (upravení, rozsahu, filtrace, atd.). V první úvaze byl použit analogově-číslicový převodník, ale tyto převodníky tvoří převážně polovodič a jejich vstupní napětí v dnešní době nesnese více jak jednotky voltů. Jak bylo výše zmíněno, dají se pro zvýšení rozsahu použít předřadníky pro měření napětí a bočníky pro měření proudu. Toto zapojení by nejspíše fungovalo, jak pro měření napětí, tak pro měření proudů s tím, že by se využilo snímacího odporu a měřil by se úbytek napětí na snímacím odporu. Další potíž nastává v galvanickém oddělení, aby se při přepětí nedostal výboj až do vyhodnocovacího obvodu, tedy procesoru a dalších částí. Proto je nutné, aby bylo snímání veličin z generátoru a sítě od dalších vyhodnocovacích obvodů opticky odděleno. Pokud bychom tedy chtěli takto snímat napětí a proud na trojfázové síti, bylo by zapotřebí šesti výše zmíněných zapojení, a to neuvažuji o snímání fázi proti fázi z důvodu fázování na síť. Takže to znamená celkem devět takovýchto zapojení. Z finančního a konstrukčního hlediska by takováto konstrukce byla finančně dražší a konstrukčně by zabírala dost místa. Co se týče zpracování jednotlivých průběhů, by bylo jistě náročné z pohledu přesné synchronizace měřených dat. Pro takové řešení by

se asi nejlépe hodil nějaký signálový procesor, jenž by se musel samozřejmě naprogramovat pro danou aplikaci.

13.2 Návrh s ADE79xx

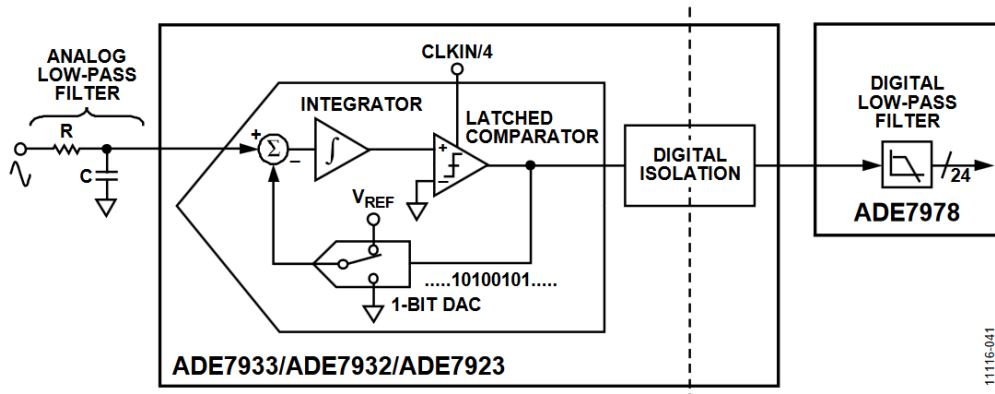
Po zvážení prvotního návrhu jsem se začal poohlížet po komplexnějším zapojení. Po podrobném prostudování, co je na trhu dostupné, jsem se rozhodl pro obvod od firmy Analog Devices. V jejich portfoliu jsou obvody pro měření jednofázového i třífázového napětí. Obvody se liší hodnotami, které dokážou změřit a zda je obvod opticky oddělen. Pro mou aplikaci se nejlépe hodí zapojení tří obvodů. Jsou to obvody ADE7933, ADE7923 a ADE7978. Důvodem byla jednoduchost a jednoznačnost zapojení obvodu a především optické oddělení částí, kde by se mohlo vyskytnout nízké napětí. Tato kombinace tří obvodů je určena pro měření trojfázové soustavy, přičemž obvod ADE7933 a ADE7923 obsahuje měřící zapojení, které je schopno měřit střídavé veličiny jako proud a napětí. Veličiny jsou snímány v čase a z jejich hodnot (proudu a napětí) lze dopočítat veličiny jako výkon, vzájemnou fázi, účinník atd. Dalo by se říci, že tyto dva obvody jsou měřící sondy pro obvod ADE7978, jenž slouží jako výpočetní jednotka. Pomocí vlastní sběrnice jsou obvody ADE7933 a ADE7923 připojeny na tento obvod. Změřená data jsou posílána po sběrnici do výpočetní jednotky a zde se ze změřených průběhů dopočítávají všechny veličiny. Vypočtené hodnoty jsou uloženy do příslušných registrů.



Obr. č. 24: Blokové schéma zapojení obvodu řady ADE79xx

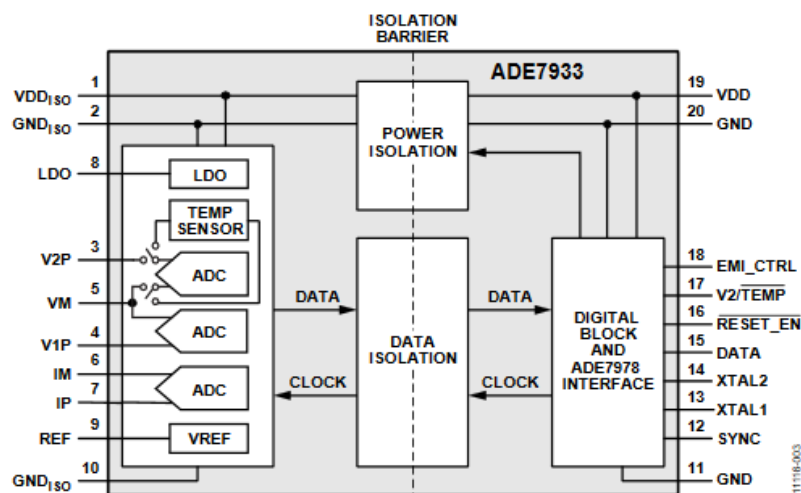
13.2.1 Obvod ADE7933

Tento obvod je určen pro měření fázového napětí a proudu. Na jeho vstup jsou přivedeny hodnoty měřeného napětí a proudu. Průběhy jsou vzorkovány v sigma-delta ADC, jejich následná digitální podoba je přesunuta přes optické oddělení do digitálního bloku.



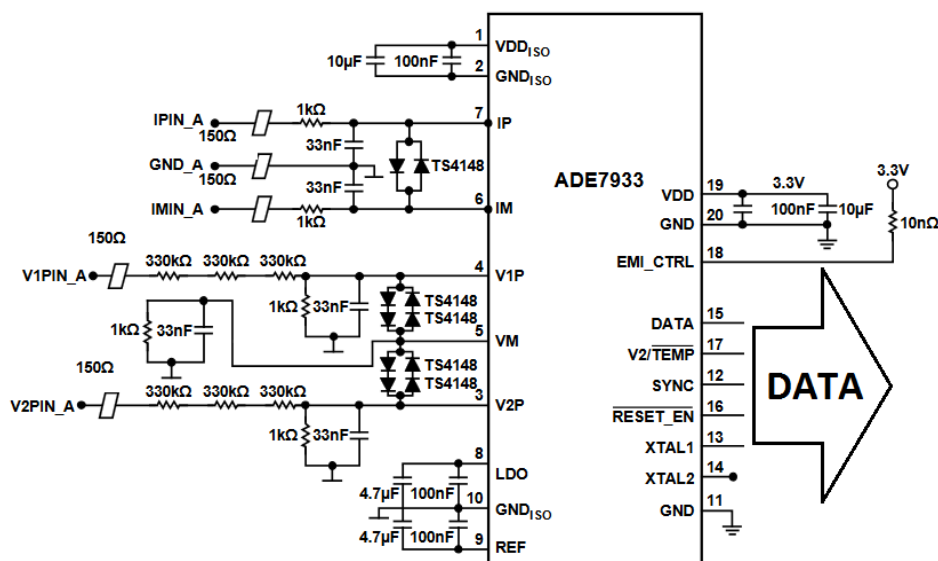
Obr. č. 25: blokové upřádkání Σ - Δ ADC převodníku v obvodu ADE7933 [17]

Proto, aby tento převodník fungoval, je zapotřebí hodinového signálu, jenž je posílán z ADE7978. Další potřebné obvody jako Voltová reference či digitální LDO jsou již součástí toho integrovaného obvodu. Za zmínku stojí i teplotní senzor umístěný v pouzdře ADE7933, ten je zde umístěn z důvodu teplotní kompenzace při ADC převodu. Podrobnější informace o teplotní závislosti lze nalézt v dokumentaci [17] na stránce 52 obrázek 57. Digitální blok má za funkci zabezpečovat komunikaci s ADE7978 a slouží jako mezipaměť, také pro svou funkci potřebuje hodinový kmitočet získávaný z AD27978.



Obr. č. 26: Blokové zapojení ADE7933 [17]

Obvod je napájen 3,3 V ze zdroje přes piny 19 a 20, z těchto pinů je napájena digitální část. Analogová část je napojená přes interní izolovaný zdroj. Tento izolovaný zdroj je napájen též z pinů 19 a 20. Na piny označeny jako VDD_{ISO} a GND_{ISO} je připojen pouze vazební a vyhlazovací kondenzátor. Z toho plyne, že izolovaná část nepotřebuje už žádný jiný externí zdroj. Vstup V2P a V1P jsou vstupy pro měření napětí, přičemž VM je vztažný vodič pro obě veličiny. Tento vstup se ve většině případů spojuje s GND_{ISO} .



Obr. č. 27: Zapojení ADE7933 [17]

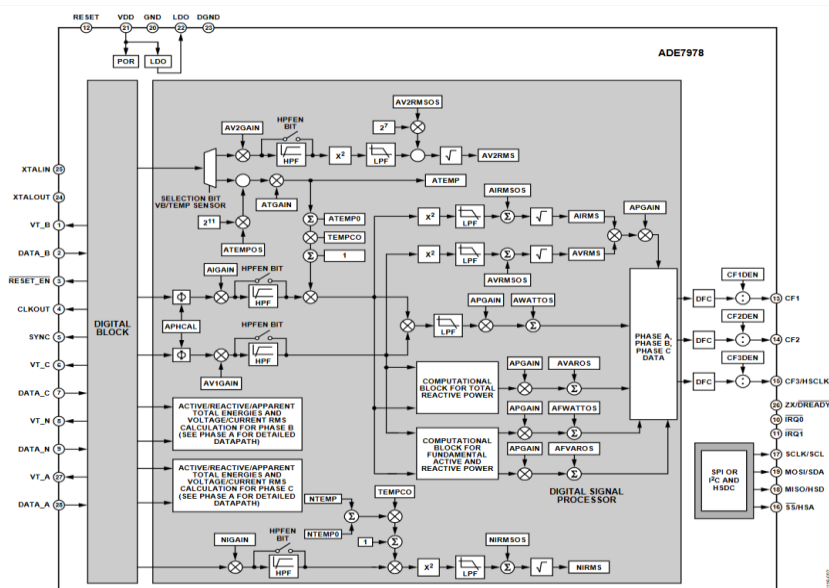
Na vstupy V1P a V2P je možno přivést napětí o maximální hodnotě ± 500 mV, proto je nutné je zabezpečit, aby se vyšší napětí, než je deklarované výrobcem, na tyto vstupy nedostalo. Mám na mysli napětí provozní, které se může na vstupech objevit za běžných podmínek. Tato podmínka se dá zabezpečit odporovým děličem 1/1000, který je rozdělen na tři jednotlivé sekce po hodnotě 330 k Ω z toho důvodu, aby se při poruše na vstupech ADC neobjevilo plné síťové napětí. Pokud nastal stav, že se jeden z rezistorů vyzkratuje, je v zapojení ještě jeden ochranný prvek. Jsou to diody zapojené antisériově na zem. Přičemž jsou dvě diody v sérii, to nám zaručí, že sepnou až při 1,4 V, což je skoro trojnásobek, než je maximální změřitelná hodnota ADC převodníku. Antisériově zapojení se užívá kvůli tomu, že se jedná o harmonický signál. Feritové korálky na vstupu slouží k odfiltrování vyšších frekvencí. Proto, aby zapojení mohlo být použito jak pro měření fáze proti nule, tak pro fázi proti fázi, je nutno, aby GND_{ISO} , bylo

připojeno na fázi (fázi generátoru). Poté se na pin V1P připojí nulový vodič a na V2P jiný fázový vodič, v mém případě fázový vodič ze sítě.

Tento obvod je konstruován především pro měření pomocí bočnicku. Proudový vstup IM je stavěn pro připojení jednoho konce bočnicku, který je spojen s GND_{ISO} . Vstup IP je připojen na druhý konec bočnicku a měří vzniklý úbytek na bočnicku vlivem protékajícího proudu. Na proudový vstup IP je možno připojit maximálně napětí $\pm 31,25$ mV v případě, že vstup IM je připojen na GND_{ISO} . Pokud IM není připojen na GND_{ISO} , může se na něj připojit napětí o maximální velikosti ± 25 mV. Z předešlého textu vyplývá, že zásadní podmínkou je, aby rozdíl mezi vstupem IP a IM nebyl větší než $\pm 31,25$ mV. Toto zapojení je pro jednu fázi, tudíž potřebuji do mého zapojení tři ADE7933.

13.2.2 Obvod ADE7978

Integrovaný obvod ADE7978 sbírá naměřené průběhy od jednotlivých ADE7933 a jak bylo zmíněno v kapitole 12.2.1, také poskytuje hodinový signál. Získané údaje se v tomto obvodu dále zpracovávají a vypočítávají se zde hodnoty pro třífázovou soustavu. Jedná se například o účinník, výkon, fáze jednotlivých napětí atd. Vypočtená data jsou uložena do vnitřní paměti, data mohou být 8b, 16b, 24b a 32b. Uložené průběhy a hodnoty lze vyčítat následujícími způsoby, buď to pomocí sběrnice I²C, nebo SPI, či dokonce HSPD. Tyto tři různé komunikace mají sdílené piny a pomocí hardwarové konfigurace se nastavuje ten, který chceme použít. ADE7978 má vstupy pro vyčítání ze tří fází a jednoho nulového vodiče.

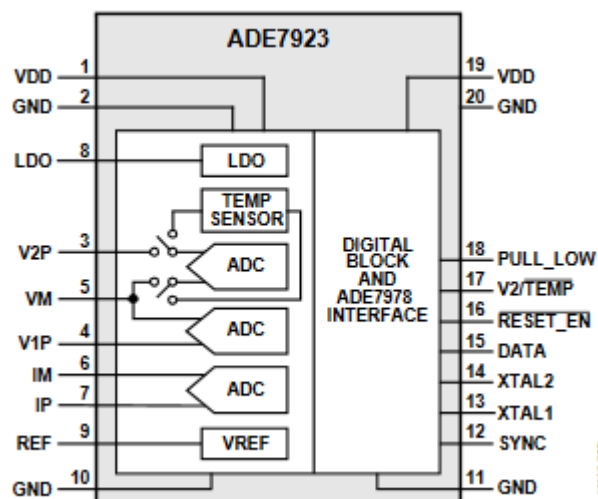


Obr. č. 28: Vnitřní blokové uspořádání ADE7978 [17]

Inicializaci tohoto obvodu, následné nastavení potřebných registrů, co na jaké adrese je a způsobu vyčítání si ukážeme v kapitole 16.2 a 16.3, kde si probereme také program.

13.2.3 Obvod ADE7923

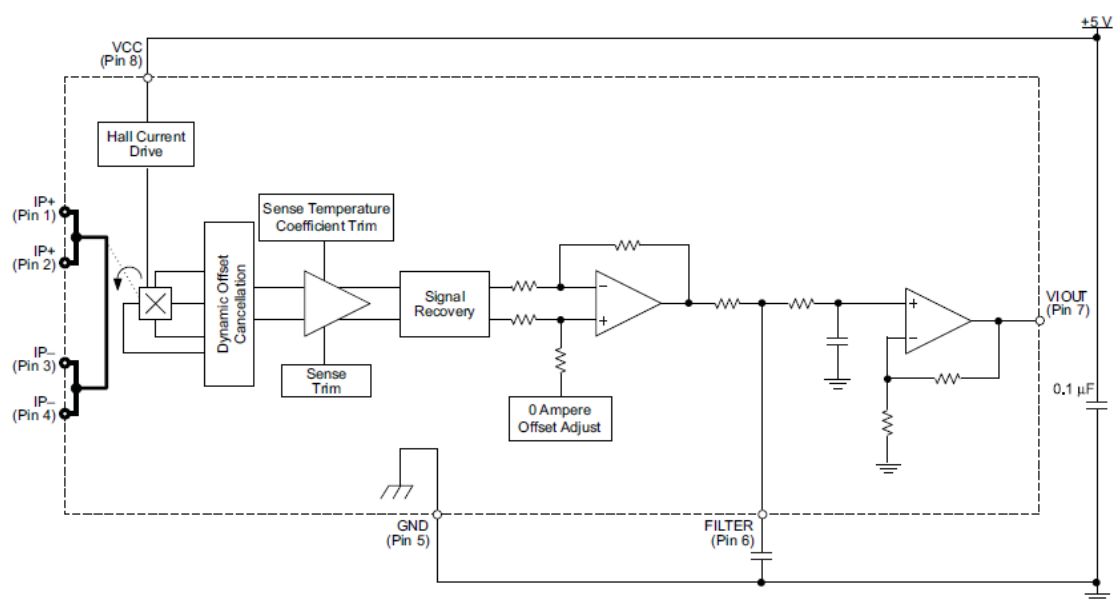
Obvod ADE7923 je poslední ze třetice obvodů pro měření parametrů střídavé sítě. Tento integrovaný obvod je určen pouze pro měření nulového vodiče a to pouze proudu protékajícího nulovým vodičem. Z toho důvodu není potřeba vnitřního optického oddělení. Doporučené zapojení od výrobce je stejné jako u obvodu ADE7933 s tím rozdílem, že nejsou použity napěťové vstupy, pouze proudový.



Obr. č. 29: Vnitřní obvodové zapojení ADE7923 [17]

14 Měření proudu Hallovou sondou

Měření proudu Hallovou sondou jsem si vybral z finančního hlediska. Výše zmiňovaný obvod je primárně konstruován na bočník, ale cena jednoho bočníku s parametry, jež by splňovaly maximální napětí pro vstupy na měření proudu obvodu ADE7933, je okolo 400 Kč. Proto jsem se rozhodl měření proudu zrealizovat pomocí Hallovy sondy. Po prostudování, co výrobci nabízejí, jsem vybral pro mou aplikaci integrovaný obvod ACS713 od firmy Allegro MicroSystem. Tímto senzorem lze měřit jak střídavý, tak stejnosměrný proud. Je zde integrována Hallova CMOS sonda společně s vodičem, kterým protéká proud a tím ji ovlivňuje. Dále je zde zdroj pro předpětí a vyhodnocovací logika. Výstup tohoto obvodu je lineární analogový signál v rozmezí cca 0, až 5 V, kde záleží na napájecím napětí. Odpor snímacího vodiče (v ICs je to vodivá měděná cesta), v tomto zařízení dosahuje $100 \mu\Omega$. Díky tak malému odporu může tímto vodičem protékat až 200 A, aniž by se obvod zničil.[9]

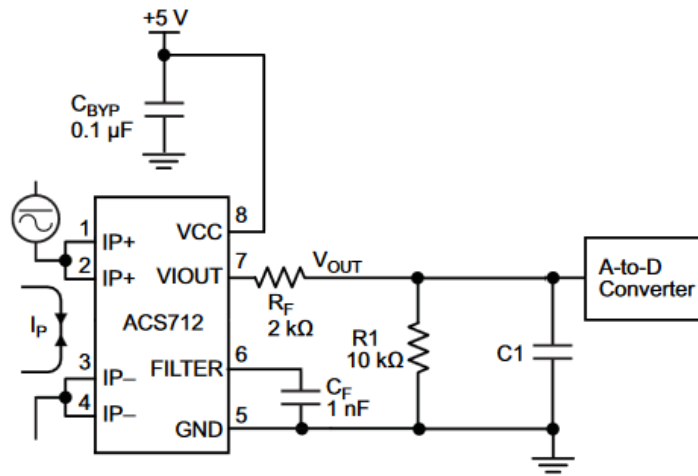


Obr. č. 30: Vnitřní blokové uspořádání ACS712[9]

14.1 Zapojení ACS712

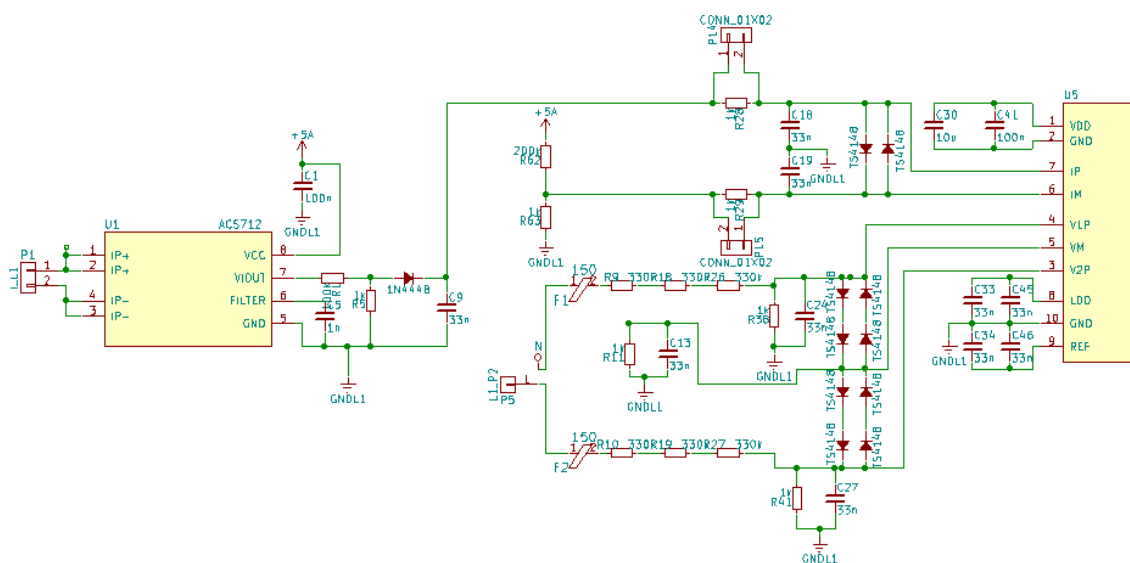
Při zapojení integrovaného obvodu jsem se řídil pokyny výrobce. Obvod je napájen 5 V a výstupní napětí se pohybuje v rozmezí 0 – 5 V. Přičemž jsem použil typ, který umí měřit proud oběma směry. V tomto případě, pokud obvodem protéká nulový proud, je na výstupu obvodu 2,5 V. Při návrhu zapojení jsem musel počítat s tím, že vstup na

ADE7933 pro měření proudu, je omezen na $\pm 31,25$ mV. Proto bylo nutné za výstup sondy umístit dělič napětí.



Obr. č. 31: Zapojení ADC712 s děličem napětí [9]

Další otázka týkající se vztažného napětí byla potřeba vyřešit z důvodu napájení ASC712. Jedná se o tento problém: Obvod ADE7933, má jako svou GND_{ISO} připojenou fázi, tudíž vztažný vodič je fázový nikoli nulový. Toto zapojení by se mohlo každému elektrotechnikovi zdát zvláštní a nesmyslné, ale není tomu tak. Především se musíme podívat na to, že se jedná o střídavá napětí a konstrukčně je toto zapojení velkým přínosem. Pokud tedy vezmeme v potaz, že se jako vztažné napětí bere to fázové, tak na jeden napěťový vstup V1P můžeme připojit nulový vodič, tím změříme napětí proti nulovému vodiči. Na druhý vstup V2P, na který se dá připojit fázový vodič jiné soustavy, můžeme připojit fázový vodič sítě, do které se budeme připojovat a tím změřit napětí fáze proti fázi.



Obr. č. 33: Schéma zapojení ACS712 a odporových děličů pro ADE7933

Na jednom obvodu jsme schopni měřit dvě napětí, která jsou pro konstruovanou aplikaci důležitá. Z hlediska měření napětí je tato skutečnost s fázovým vodičem jako virtuální zemí vyhovující, ale jak jsem se výše zmínil, nastal zde problém s napájením obvodu pro snímání proudu. Napájecí napětí musí být vztaženo ke stejnému bodu, jinak by se místo požadovaného napětí $\pm 31,25$ mV mohlo objevit plné síťové napětí. To by se mohlo stát, kdybych navrhl napájecí zdroj pro ACS712, jenž by jako vztažný vodič měl nulový vodič. Abych předešel dalšímu problému s rozdílným napětím, rozhodl jsem se ACS712 napájet přímo z použité fáze a nulového vodiče, jenž je zapojen do příslušného ADE7933. Na zapojení kapacitního předřadníku jsem narazil v aplikačním dokumentu od firmy Analog Devices, kde je jejich obvod z podobné řady použit jako jednofázový wattmetr. Jedná se o sériové zapojení kondenzátoru a odporu, která má za

úkol snížit napětí. Následuje Zenerova dioda, která napětí stabilizuje na 15 V. Průběh je jednocestně usměrněn a vyhlazen. Referenční napětí pro napájení sondy poskytuje stabilizátor napětí LM78L05.

Výpočet obvodových prvků:

Předřadný kondenzátor, na kterém je potřeba snížit většinu napětí:

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_C}, [17]$$

přičemž I je maximální odebíraný proud, U_C napětí na kondenzátoru. To se dá spočítat jako:

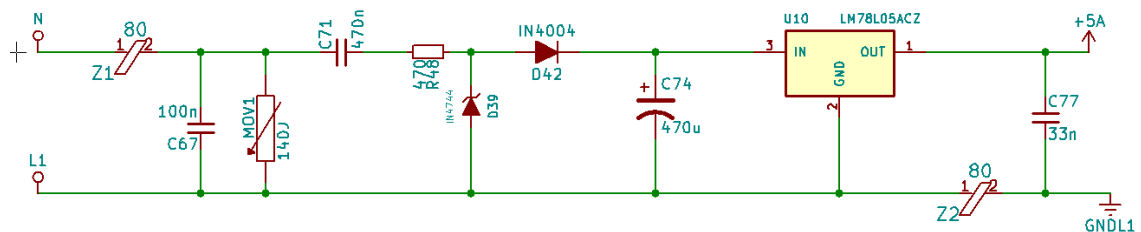
$$U_{\text{žadané}} = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \rightarrow U_C = \sqrt{U_{\text{žadané}}^2 - U_R^2} [18]$$

U_R získám z rovnice:

$$U_R = R_R \cdot I [19]$$

Pokud budeme uvažovat o maximálně odebíraném proudu 40 mA a hodnotu R_R zvolíme 470Ω , tak při $U_C \approx 310$ V nám vztah udává hodnotu $C \approx 410$ nF.

Ze zdroje na obr. č. 34 se napájí ACS712 a také odporový dělič, který je veden na vstup IM. [17]



Obr. č. 34: Schéma, napájecího zdroje pro ACS712

Celý tento měřicí modul je připojen pomocí sběrnice I²C k STM32 F746 Discovery kitu. Z tohoto kitu jsou také napájeny všechny ADE7933, ADE7978 a ADE7923 z 3,3 V regulátoru, který se právě nachází na již zmíněném kitu. ACS712 snímající proud protékající nulovým vodičem je připojen na 5V regulátor, který se též nachází na Discovery kitu.

15.1 Vyhodnocovací mikrokontrolér

Jako hlavní vyhodnocovací mikrokontrolér jsem zvolil STM32 F746 od firmy STmicroelectronic, který se nachází na vývojovém kitu Discovery. Kit jsem použil

z důvodu jednoduchosti a dostupnosti. Navíc obsahuje všechny periferie včetně dotykového LCD panelu. Jelikož se u konstruovaného zařízení jedná o první prototyp, je vhodné v první fázi návrhu minimalizovat náklady na výrobu např. DPS. Pro návrháře je dostupná široká podpora nejen od výrobce kitu, ale také od ostatních firem zabývajících se embedded softwarem.



Obr. č. 35: STM32F7 Discovery

Kit obsahuje barevný TFT displej s rozlišením 480x272 a kapacitní dotykovou plochou. Displej bude využíván jako grafický obslužný interface, který uživateli zobrazuje potřebné hodnoty a pomocí něj lze eventuálně i měnit parametry provozu zařízení. Snahou při návrhu bylo, aby ovládaní a zobrazení bylo jednoduché a jednoznačné.

16 Program

Při psaní programu je možno volit podporu knihoven od výrobce, případně vše navrhnout od základů znovu. Vzhledem ke zkušenostem návrháře s operačním systémem reálného času (RTOS) byl právě tento využit při finálním návrhu softwarového vybavení produktu.

16.1 RTOS

RTOS se od běžných operačních systémů liší v mnoha věcech od běžných OS jako např. Windows. Poskytuje možnost reagovat na časově kritické události, kde jednotlivým úlohám přiděluje prioritu a kontroluje čas, po který se úloha vykonává. Při překročení definované doby se vykonávání úlohy přeruší. Tímto se eliminuje jev zamrzání aplikací. Zavádí do operací determinismus, tzn., že kromě správného provedení operace je důležitý také čas, za jaký se provede. Každá aplikace má v tomto systému svůj vymezený čas, pokud ten překročí, může to mít následky. Záleží na tom v jaké aplikaci se RTOS využívá.

Například, pokud se v pračce začne o něco později napouštět voda, má to menší následek, než když se výtah rozjede s otevřenými dveřmi, když lidé vystupují. Tento operační systém funguje tak, že požadavky na to, aby se určité operace stihly, nezaručí naprosto dokonale, ale snaží se tomuto stavu co nejvíce přiblížit. Podle toho můžeme RTOS dělit na dva typy.

16.1.1 Hard RTOS

Jedná se o tzv. tvrdý real time operační systém. Požadavek na stanovení času reakce je absolutní. Jsou kladeny tyto nároky:

- Preemptivní plánovač
- Velký počet nastavitelných prioritních vláken
- Přesné hodiny reálného času

Zde může nastat katastrofální situace při nedodržení časových limitů.

16.1.2 Soft RTOS

U soft RTOS nejsou tolik kladeny nároky na dodržení časovým limitů a použití je ve spotřební elektronice.

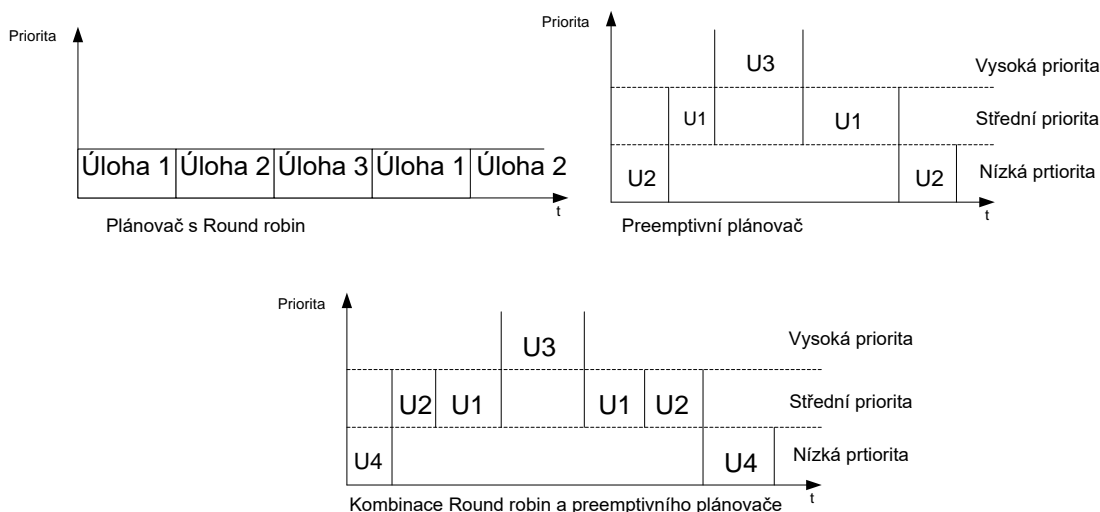
16.1.3 Plánovač

Jelikož se v embedded systémech používá většinou jeden mikrokontrolér, který má jedno jádro, může v jeden okamžik běžet jedna úloha. Proto je nutný plánovač, který zajišťuje, aby běžela vždy ta správná. Jeho úkolem je přepínání úloh a ukládání jejich dat tak, aby mohly v případě, že na ně opět přijde řada, začít vykonávat svou funkci. Plánovací procesy mohou být následující:

- Round Robin – každé úloze je přidělen časový úsek, kdy se vykonává. Ve většině případů je nastaven pro všechny stejně. Některé RTOS umožňují při vytvoření úlohy zadat její časový úsek. Tento proces běží stále v kruhu.
- Preemptivní - namísto přiděleného času je úloze přidělena priorita. Tu obdrží při svém vytvoření. Pokud se při běhu jedné úlohy vyskytne úloha s vyšší prioritou, plánovač přeruší vykonávanou aktivitu a uloží data do paměti. Následně začne vykonávat úlohu s prioritou vyšší. Pokud není tato úloha přerušena úlohou s vyšší prioritou, dokončí se, uloží se data a následuje návrat k dříve přerušené prioritě.
- Kombinovaný – kombinace dvou předešlých metod. Úlohy se stejnou prioritou se na rozdíl od čistě preemptivního způsobu vykonávají střídavě v rámci časových úseků

RTOS nabízí režim semafor, který slouží k synchronizaci mezi úlohami nebo přerušením a hlídáním přístupu ke sdíleným zdrojům. Mohou být tři typy semaforu:

- Binární - nabývá dvou stavů, pokud úloha není dostupná, čeká buď vymezený čas, nebo až do té doby, než bude opět semafor dostupný. Uvolnit ho může jakákoliv úloha.
- Čítací- nabývá více hodnot, nedostupný pouze při 0. Použití například pro akce, které úloha provede. Vždy při zabrání zdroje úlohou se semafor sníží o 1.
- Mutex- jedná se o binární semafor s tím, že uvolnit semafor může pouze úloha, která ho získala.



Obr. č. 36: Grafické znázornění priorit

16.2 Inicializace ADE7978

Komunikace s obvodem ADE7978 je možná třemi způsoby, jak bylo zmíněno v kapitole 12.2.2. Abychom si vybrali tu správnou komunikaci, kterou chceme je zapotřebí po zapnutí obvodu buď hardwarově či softwarově nakonfigurovat sběrnici. Pro režim v SPI je zapotřebí pin SS/HSA třikrát po sobě změnit ze stavu logické 1 do stavu logické 0. V režimu I²C je tento krok jednodušší a stačí na pin SS/HSA přivést logickou 1. Poté následuje úkon tzv. uzamknutí komunikace. To se provede tak, že se pomocí sběrnice do registru CONFIG2 (0xEA00) zapíše na 0 bit logická 1. Po tomto úkonu jsou již jakékoliv aktivity na pinu SS/HSA ignorovány až do následujícího restartu. Takováto prvotní inicializace může nastat cca 100 ms od připojení napájecího napětí. Pokud ovšem chceme nějaké ms ušetřit, je tu pin IRQ1, tento pin indikuje přerušování RSTDONE, přičemž když je v logické hodnotě 0, indikuje připravenost obvodu. Následně se provede výše zmíněný proces na pinu SS/HSA. Nadále je potřeba přečíst registr STAUS (0xE503) a zkontrolovat 15 bit (RSTDONE), zda je nastaven na log. 1 a zapsat do něj log. 1, tím se registr vynuluje. Tím se i pin IRQ1 nastaví na hodnotu log. 1. Výrobce doporučuje, aby se v ostatních registrech STATUS1 a STATUS0 resetovaly všechny bity. Následujícím krokem je inicializace registrů zisku tzv. XIGAIN, ty určují kolikrát se má přenásobit daný průběh, to je z důvodu nastavení převodu proudového snímání. Abychom mohli snímaná data dále zpracovávat, je zapotřebí na ADE7978 zapnout DSP, to se provede zapsáním hodnoty 0x0001 do registru DSP (0xE228). Následuje krok inicializace DSP RAM, ten se provádí trojnásobným zápisem do posledního registru RAM, tj. 0x43BF. Další úkon je nastavení registrů od

adresy 0xE507 po 0xEA04, vyjma registru CFMODE. Tyto registry nastavují požadované vlastnosti ADE7978. Abychom mohli z DSP RAM paměti vyčítat data, je nutno jí odblokovat. To se děje tak, že na adresu 0xE7FE zapíšeme hodnotu 0xAD a poté do registru 0xE7E3 hodnotu 0x80. Tím je RAM odemčena. Abychom jsme si byli jisti, že pracujeme se správnými daty je zapotřebí vymazat hodnoty registru xWATTHR, xVARHR, xFWATTHR, xFAVRHR a xVAHR. Následně se jejich hodnota začne vypočítávat z aktuálně naměřených průběhů. Pokud chceme povolit pulzy CF1,CF2 a CF3, které mohou sloužit jako indikace například 1 kW, je nutno vymazat bity 9, 10 a 11 v registru CFMODE (0xE610). Doporučeným krokem je přečtení všech registrů a zkontrolování, zda jsou nastaveny tak, jak požadujeme. Tímto je inicializace ADE7978 hotova.

16.3 Vyčítání dat z ADE7978

V kapitole 15.3 jsme si probrali, jak inicializovat ADE7978. Po této inicializaci jsme schopni vyčítat užitečná data. Podrobný popis každého registru by neměl smysl a byl by zdlouhavý, proto vyberu jen ty nejpodstatnější. Při nastavování je zapotřebí se prve zaměřit na registry xxGAIN sloužící k zesílení měřené veličiny. Nejedná se v pravém slova smyslu o zesílení, ale přenásobení digitální hodnoty, abychom dostali co největší rozlišení, proto je nutno tyto hodnoty nastavovat dle zapojení návrháře. Dále tu jsou registry s koncovkou xxRMSxx, jenž obsahují průměrnou hodnotu, xxPEAK registry mají v sobě uloženou maximální hodnotu. V aplikaci jsou vyčítány tyto registry: xFIRMS a xFVRMS, každá fáze má svůj příslušný registr. Jedná se o střední hodnoty proudů a napětí. XFWATTHR je registr činného výkonu a xVARHR registr jalového výkonu, xxWV jsou registry, jež obsahují okamžitou hodnotu průběhu.

Aby se s registry dalo pracovat v reálném čase, je zapotřebí je také rychle vyčíst, proto má obvod ADE7978 tzv. BURST READ OPERATION. Tento mód se vztahuje právě na registry s okamžitou hodnotou.

16.3.1 Synchronizace na síť

Jedná se o kritický moment, poté co přijde požadavek, začne se vyčítat pomocí BUSRT módu a hodnoty napětí mezi fází generátoru a fází sítě se porovnávají dokud nejsou ve fázi. V okamžiku, kdy jsou odchylky mezi fázemi v přijatelné hodnotě, tyto meze jsou nastaveny v softwaru na $\pm 7^\circ$, je sepnut pin, jenž by měl pomocí silových externích

prvků připojit generátor na síť. Všechny tyto úkony mají v programu, který běží na výše zmiňované, RTOS, nejvyšší prioritě. Podmínkou pro upnutí na síť je, aby průběhy napětí byly ve fázi a aby obsluha na panelu zadala požadavek přifázovat.

16.4 Grafické prostředí

Operační systém RTOS má mnoho modifikací a nastaveb, jednou nastavbou je takzvaný software TouchGFX. Jedná se o grafické knihovny a operační systém RTOS. Software obsahuje firmware pro ovládání displeje a dotykové plochy. Které procesory a displeje jsou podporovány, lze najít na stránkách výrobce. Použitý STM32 F746 Discovery kit je plně podporován, proto jsem si také vybral tento software.

Ve skutečnosti se jedná pouze o kompilační program. Jedná se o soubory RTOS například vytvořené v IAR Embedded Workbench, kde jsou vytvořeny rutiny pro komunikaci s displejem a dotykovým panelem. Úprava a vytvoření firmwaru na úrovni RTOS se provádí pomocí programů IAR nebo Kiel. Grafické prostředí se vytváří v programu Visual Studio, kde se importují různé widgety, které se implementují do programu.

Tento software má tři stupně licencí:

- Evaluation - tato licence slouží pro seznámení se softwarem a má plně odemčeny všechny funkce, knihovny a příklady. Ovšem je pouze pro nekomerční použití. Jedná se o volnou licenci.
- Product Line Limited – licence, která umožňuje zařízení, na kterých je firmware vyvinutý, pomocí tohoto softwaru, komerčně prodávat. Počet kusů je omezen na 3000 za rok za cenu 3000 \$.
- Product Line Unlimited - U této licence je počet produkováných kusů neomezen a ceny činí 15000 \$.
-

16.5 Grafické uživatelské rozhraní

V kapitole 15.4 jsme nahlédli na program, který ulehčuje práci s grafickým prostředím. Proto jsem se rozhodl v něm naprogramovat grafické uživatelské rozhraní, které bývá jinak složité naprogramovat běžnými metodami bez knihoven a OS.

Základní projekt obsahuje soubor main.cpp, kde jsou nainportovány potřebné knihovny HAL. Každá zobrazená obrazovka má svůj vlastní adresář a kód, pro spojení těchto

jednotlivých oken je tu tzv FrontedApplication, kde jsou napsány globální procedury pro jednotlivá okna. Zde je ukázka kódu, jak taková to procedura může vypadat. Jedná se o přepnutí mezi dvěma okny s plynulým posuvem:

```
void FrontendApplication::gotoLeftScreenFromMainScreen()
{
    transitionCallback = Callback< FrontendApplication >(this,
&FrontendApplication::gotoLeftScreenFromMainScreenImpl);
    pendingScreenTransitionCallback = &transitionCallback;
}
void FrontendApplication::gotoLeftScreenFromMainScreenImpl()
{
    makeTransition<          LeftView,          LeftPresenter,
SlideTransition<WEST>,    Model              >(&currentScreen,
&currentPresenter, frontendHeap, &currentTransition, &model);
}
```

Taková to procedura může být volána odkudkoliv z programu s podmínkou, že v souboru FrontedApplication musí být naimportován její cpp soubor.

Jednotlivá okna mají svůj vlastní kód, jak bylo zmíněno v kapitole 15.5, je potřeba implementovat jednotlivé widgety, jedná se o polotovary podprogramů, jenž se naimportují tam, kde jsou potřeba a pomocí příkazů se nastaví jejich parametry a umístění. V souboru, který má koncovku hpp ,například HlavniStrana.hpp, je zapotřebí nadefinovat a naimportovat widget. To se dělá následovně:

```
#include <touchgfx/widgets/Image.hpp>...
```

```
...
```

```
Image background;
```

Takto se například naimportuje widget obrázku, který jde použít pro pozadí, Ten je ovšem použitelný jen na stránce Hlavní, pokud bychom jej chtěli i do ostatních stránek, je zapotřebí udělat stejný úkon. Další krok je nastavit vlastnosti a potřebné parametry. To již musíme udělat v souboru HlavniStrana.cpp následujícím způsobem.

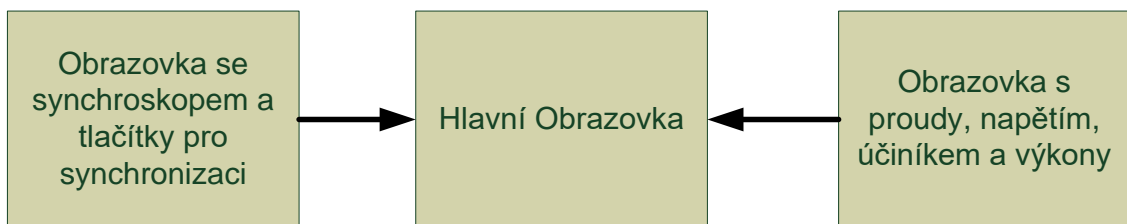
```
background.setImageBitmap(Bitmap(BITMAP_BG_TRANSITION_LEFT_ID));
background.setXY(0, 0);
add(background);
```

Takto nastavíme obrázek na pozadí stránky. Podobně je tomu tak u ostatních widgetů. Takovýmto způsobem dostanu pouze statické prostředí. Aby se data mohla zobrazovat je zapotřebí je po určitém čase obnovovat. K tomu na každé stránce v kódu slouží procedura:

```
void MainView::handleTickEvent()
```

Do této procedury se dají implementovat proměnné, které chceme, aby se po určitém čase obnovovali.

Grafické rozhraní se skládá ze tří obrazovek, každá zobrazuje jiné parametry a lze mezi nimi přepínat: Každá obrazovka má indikaci připojení jednotky na síť. Rozložení obrazovek vypadá následovně:



Obr 37: Uspořádání obrazovek GUI

Hlavní obrazovka udává měřená napětí, proudy a frekvenci v číselné podobě. Hodnota činného výkonu je zde zobrazena jak číselně, tak graficky s vyznačenými mezemi, aby obsluha měla povědomí, o jak vysokou hodnotu se jedná.



Obr 38: Hlavní obrazovka (výstřížek ze simulátoru VisualStudio)

Pravá obrazovka zobrazuje graficky hodnoty napětí a proudů, přičemž jsou zde barevně vyznačeny meze. Dále se tu nachází číselná informace o dodané energii, jalové energii a účinníku.



Obr. č.39: Pravá obrazovka grafického uživatelného rozhraní

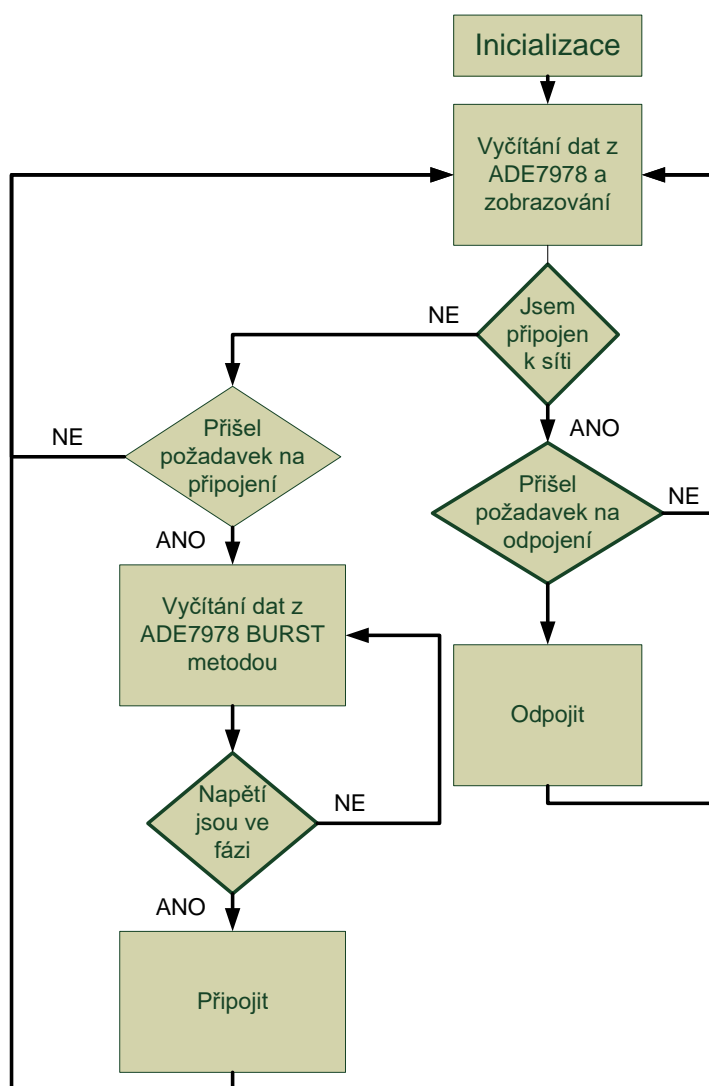
Levá obrazovka poskytuje informaci o stavu synchronizace pomocí grafického sychroskopu, kde je zeleně vyznačena mez pro synchronizaci. Abychom nemuseli přepínat na jiná okna je tu číselná informace o frekvenci a napětí. Důležitou částí jsou tu tlačítka pro synchronizaci a odpojení od sítě. Těmito tlačítky obsluha ovládá chod generátoru.



Obr. č.40: Pravá obrazovka grafického uživatelného rozhraní

16.6 Popis programu při běžném chodu

Program obsažený v mikrokontroléru STM32F746 se za běžných podmínek chová následovně: po inicializaci a nastavení registrů popsanych v kapitole 15.2, jsou vyčítána data z ADE7978. Přičemž se kontroluje podmínka, zda nepřišel povel od obsluh, že má být jednotka se synchronizována a připojena k síti. Pokud tento povel nepřišel, jsou vyčtené hodnoty zobrazeny na grafickém displeji. Pokud tento požadavek na synchronizace je obdržen, procesor soustředí svůj výkon na synchronizaci (díky prioritnímu uspořádání). V okamžiku kdy jsou průběhy napětí totožná dojde k vydání povelu pro připnutí na síť. Po této události, se procesor již zase zabývá monitorováním a zobrazováním. V situaci, kdy obsluha zadá povel pro odpojení se ze sítě, procesor vydá povel, který jednotku odpojí. Pro lepší pochopení obr. č. 41.



Obr. č.41 .Blokové znázornění chodu programu

17 Finanční analýza

Na začátku práce popisovaný produkt od firmy Comap InteliGen NT genset controller – BaseBox, který slouží k řízení generátorů, vyjde na 24 439 Kč. Zobrazovací jednotka o velikosti 5 palců vyjde na 12 850 Kč. Bohužel kvůli nekompletnosti mé práce, nejde plně porovnávat mou práci a InteliGen NT genset controller BaseBox.

17.1 Náklady na desku pro snímání motorových veličin

Navrhovaný PCB má rozměry 149 mm x 227 mm tj. 3,38 dm². Při ceně 726 Kč za 1 dm² vyjde deska na 2445 Kč. Desku jsem nechával dělat u firmy Pragoboard s.r.o. metodou POOL Servis, na substrát ITEQ-158, tloušťky substrátu 1,5 mm a mědi 18 μm a povrchovou úpravou HAL. Všechny součástky byly nakupovány v nejmenším množstevním limitu, který distributor dovoluje, tudíž i jejich cena byla vyšší. Pořizovací náklady na výrobu prototypu jsou mnohonásobně větší, než by výrobek vyšel, kdyby se jednalo o sériovou výrobu.

Dobu kreslení schématu odhaduji na 50 hodin čisté práce. Osazení desky trvalo cca 10 hodin.

17.2 Vyhodnocení finanční analýzy

Jelikož výrobek není úplně kompletní, proto se nedá porovnávat s výrobkem od firmy ComAp. Celková cena materiálu bez práce vychází na 5217 Kč. Viz tabulka č. 1. Dále se musí uvažovat, že cena je o několik procent vyšší, kvůli prototypové výrobě. Nejdražší položkou je samozřejmě PCB, cena tištěného plošného spoje klesá s počtem vyrobených kusů. Pokud bych nechal vyrobit 100 ks desek, jedna deska by u firmy, u které jsem nechával dělat prototyp, vyšla na 320 Kč (+ jednorázových 1750 za masky). Zde je vidět, že cena je cca o 85% nižší než u prototypu. To samé platí o součástkách. Vývojový kit je dotován výrobcem, ale v sériové výrobě by se součástky dostali pod cenu kitu. Pokud zhodnotím verzi s Halloovou sondou, tak se jedná o levnější variantu v nákladech o 600 Kč na kus. Troufám si říct, že v sériové výrobě o velikosti série 100 ks, by se jedna měřící karta dala vyrobit do 1200 Kč. Pokud by prodejní cena kompletního výrobku nepřesáhla 10 000 Kč, mohla by najít uplatnění v malých kogeneračních jednotkách v řádech jednotek kW.

Název	počet ks	cena	cena celkem
PCB	1	2 445,00 Kč	2 445,00 Kč
ADE7879	1	45,60 Kč	45,60 Kč
ADE7933	3	137,04 Kč	411,12 Kč
ADE7923	1	2,76 Kč	2,76 Kč
ACS712/20	4	99,34 Kč	397,36 Kč
Krystal 16 MHz	1	38,72 Kč	38,72 Kč
Svorky 2x1	6	8,47 Kč	50,82 Kč
Svorky 4x1	1	24,20 Kč	24,20 Kč
Elektrolytický SMD kondenzátor	3	10,16 Kč	30,49 Kč
polypropylénový; 470nF; 630VDC	3	27,23 Kč	81,68 Kč
Stabilizátor LM78L05	3	4,50 Kč	13,50 Kč
Varistor 150J	3	15,00 Kč	45,00 Kč
Ostatní materiál (kondenzátory, odpory, diody)	164	0,50 Kč	82,00 Kč
STM32 F746 Discovery	1	1 549,00 Kč	1 549,00 Kč
		Celkem	5 217,25 Kč

Tabulka. 1: Finanční analýza

18 Závěr

Ovládací modul pro kogenerační jednotku je ve formě prototypu. Základní požadavky zadání jsou splněny, ale jedná se o teprve první část vývoje. V průběhu návrhu jsem se setkával s mnoha problémy a to především s bezpečností. Kvůli tomu, že jsou snímány průběhy o hodnotě 230 V. Tyto problémy se mi nakonec podařilo vyřešit díky zvoleným obvodům ADE79xx. Další problém nastal poté, co jsem se rozhodl měřit proud Hallovou sondou, a to s jejím napájením, jak popisuji ve své práci. Zařízení je bezpečné a konstruované tak, že pokud dojde k poruše na straně nízkého napětí, toto napětí se nedostane do části kde je 3,3 V. Jelikož jsem se rozhodl pro měření proudu Hallovou sondou, abych zkonstruoval levnější variantu bez bočníku, a neuvědomil si problematiku snímání proudů s bočníkem, nemůže mnou navržený modul snímat účinník. To z toho důvodu, že Hallova sonda dává pouze informaci o střední hodnotě nikoli o okamžité hodnotě proudu, jak je tomu u metody s bočníkem. Proto je vhodný pouze pro generátory asynchronní. Problematiku ohledně řízení motoru, který točí generátorem, jsem již nestihl realizovat z důvodu náročnosti návrhu měřicího modulu pro 230 V ve spojení s mikroprocesorovou jednotkou. Měření jsem bohužel nemohl ověřit v praxi, protože kogenerační jednotka, na které jsem měl provádět měření, přešla pod jinou společnost a přístup k jednotce mi nebyl umožněn. V tuto chvíli je měřicí karta vyrobena v jednom prototypovém kusu a pomocí pinů se lze na její datové vstupy připojit procesorem, v mém případě STM32F746 Discovery kitem. Funkčnost mé jednotky by se dala v tuto chvíli specifikovat jako monitorovací, proto aby byla řídicí je nutno přehodnotit měření proudů pomocí Hallovy sondy, případně modifikovat zapojení. Další úpravou by bylo rozšíření hardwaru pro řízení motorové jednotky.

Vytvořený firmware společně s grafickým uživatelským prostředím je ve fázi vývoje tudíž ve chvílích, které jsou nestandardní, může dojít k nedeterminovanému chování. Grafické prostředí je snadno ovladatelné a uživatel v něm vidí všechny potřebné hodnoty.

Do budoucna bych rád vyřešil snímání okamžité hodnoty proudu a rozšířil o řízení motoru. Další vývoj bych udělal ohledně webové správy s dálkovým přístupem pomocí cloud webové stránky, rozšířením vstupů a výstupů pro ovládání a snímání bezpečnostních prvků a především zdokonalením firmwaru, aby modul byl připraven na nestandardní situace.

19 Zdroje

- [1]- <http://www.ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml>
- [2] - <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace>
- [3]- http://www.mpoefekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [4]Dvorský Emil, Hejtmánková Pavla: Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie Technická literatura BEN, Praha 2005, ISBN: 80-7300-118-7
- [5] - UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [6] <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/Asynchronni%20stroje-FAST.pdf>
- [7] DUŠEK, J. Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2008.
- [8] D.S. Mellet, M. du Plessis, A novel CMOS Hall effect sensor, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 211, 1 May 2014, Pages 60-66, ISSN 0924-4247, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.02.026>.(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424714000909>)
- [9] Technický přehled z <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs.aspx>
- [10]Fázování synchronního generátoru k síti z https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi3_4yt8c_MAhXLBZoKHYeiB
- [11] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9
- [12] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01717-6.
- [13] Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. *HW.CZ* [online]. 2000 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sberrnice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [14] ARM Processor Architecture [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.arm.com/products/processors/instruction-set-architectures/>

- [15] *Cortex-A7 Processor* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z:
<http://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a7.php>
- [16] *STM32F746* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z:
http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f7-series/stm32f7x6/stm32f746ng.html
- [17] *Datasheet ADE7978, ADE7933 , ADE7923* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z:
http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7978_7933_7932_7923.pdf

20 Seznam obrázku

- Obrázek č. 1: Blokové znázornění kogenerační jednotky [1]
- Obrázek č. 2: Rozdělení tepla přivedeného v palivu (na výrobu elektřiny, tepla a tepelné ztráty) v jednotlivých typech kombinované výroby elektřiny a tepla a porovnání s oddělenou výrobou tepla. [1]
- Obrázek č. 3: Základní zapojení protitlaké turbíny (vlevo) a kondenzační parní turbíny s odběrem páry (vpravo) [3]
- Obrázek č. 4: Schéma uspořádání spalovací turbíny základní (vlevo) kogenerační (vpravo) [3]
- Obrázek č. 5: Základní zapojení motorů pro kogeneraci
- Obrázek č. 6: Schéma kogenerace s palivovým článkem [1]
- Obrázek č. 7: Schéma kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem [4]
- Obrázek č. 8: Pokrytí roční spotřeby tepla třemi kogeneračními jednotkami a špičkovacím kotlem [1]
- Obrázek č. 9: InteliGenNTC Base box (vlevo) a InteliVision 5 (vpravo)
- Obrázek č. 10: Momentová charakteristika asynchronního stroje [5]
- Obrázek č. 11: Regulační charakteristika synchronního stroje (křivky P jsou char. kompenzátoru) [5]
- Obrázek č. 12: Průběhy napětí obou soustav a jejich vzájemná časová poloha [10]
- Obrázek č. 13: Skutečné provedení bočníku
- Obrázek č. 14: Mechanické provedení bočníku pro velké proudy [11]
- Obrázek č. 15: Zapojení měřicího transformátoru pro měření proudu [11]
- Obrázek č. 16: a) řez strukturo CMOS a principiální zapojení b) pohled shora na CMOS strukturu [8]
- Obrázek č. 17: Schéma přístroje pro přímé měření kmitočtu
- Obrázek č. 18: Obecné blokové schéma měřicího přístroje využívajícího číslicové zpracování signálu
- Obrázek č. 19: Převodní charakteristika tříbitového analogově-číslicového převodníku
- Obrázek č. 20: Základní blokové schéma AČP se sigma-delta modulací
- Obrázek č. 21: Možné propojení jednotlivých obvodů [13]
- Obrázek č. 22: Časový průběh logických úrovní na vodičích SDA a SCL [13]
- Obrázek č. 23: Uspořádání jádra M7 [15]
- Obrázek č. 24: Blokové schéma zapojení obvodu řady ADE79xx

Obrázek č. 25: blokové upořádání Σ - Δ ADC převodníku v obvodu ADE7933 [17]
Obrázek č. 26: Blokové zapojení ADE7933 [17]
Obrázek č. 27: Zapojení ADE7933 [17]
Obrázek č. 28: Vnitřní blokové uspořádání ADE7978 [17]
Obrázek č. 29: Vnitřní obvodové zapojení ADE7923 [17]
Obrázek č. 30: Vnitřní blokové uspořádání ACS712[9]
Obrázek č. 31: Zapojení ADC712 s děličem napětí [9]
Obrázek č. 32: Průběhy na pseudodeferenciálních vstupech[17]
Obrázek č. 33: Schéma zapojení ACS712 a odporových děličů pro ADE7933
Obrázek č. 34: Schéma, napájecího zdroje pro ACS712
Obrázek č. 35: STM32F7 Discovery
Obrázek č. 36: Grafické znázornění priorit
Obrázek č. 37: Uspořádání obrazovek GUI
Obrázek č. 38: Hlavní obrazovka (výstřižek ze simulátoru VisualStudio)
Obrázek č. 39: Pravá obrazovka grafického uživatelného rozhraní
Obrázek č. 40: Pravá obrazovka grafického uživatelného rozhraní
Obrázek č. 41: Blokové znázornění chodu programu
Obrázek č. 42: Schéma zapojení ACS712 a ADE7933 pro fáze A a B
Obrázek č. 43: Schéma zapojení ACS712, ADE7933 a ADE7923 pro fázi C a nulový vodič N
Obrázek č. 44: Schéma zapojení ADE7933 a napájení pro ACS712
Obrázek č. 45: Návrh desky plošných spojů - vrchní strana
Obrázek č. 46: Návrh desky plošných spojů – spodní strana
Obrázek č. 47: Osazovací výkres - vrchní strana

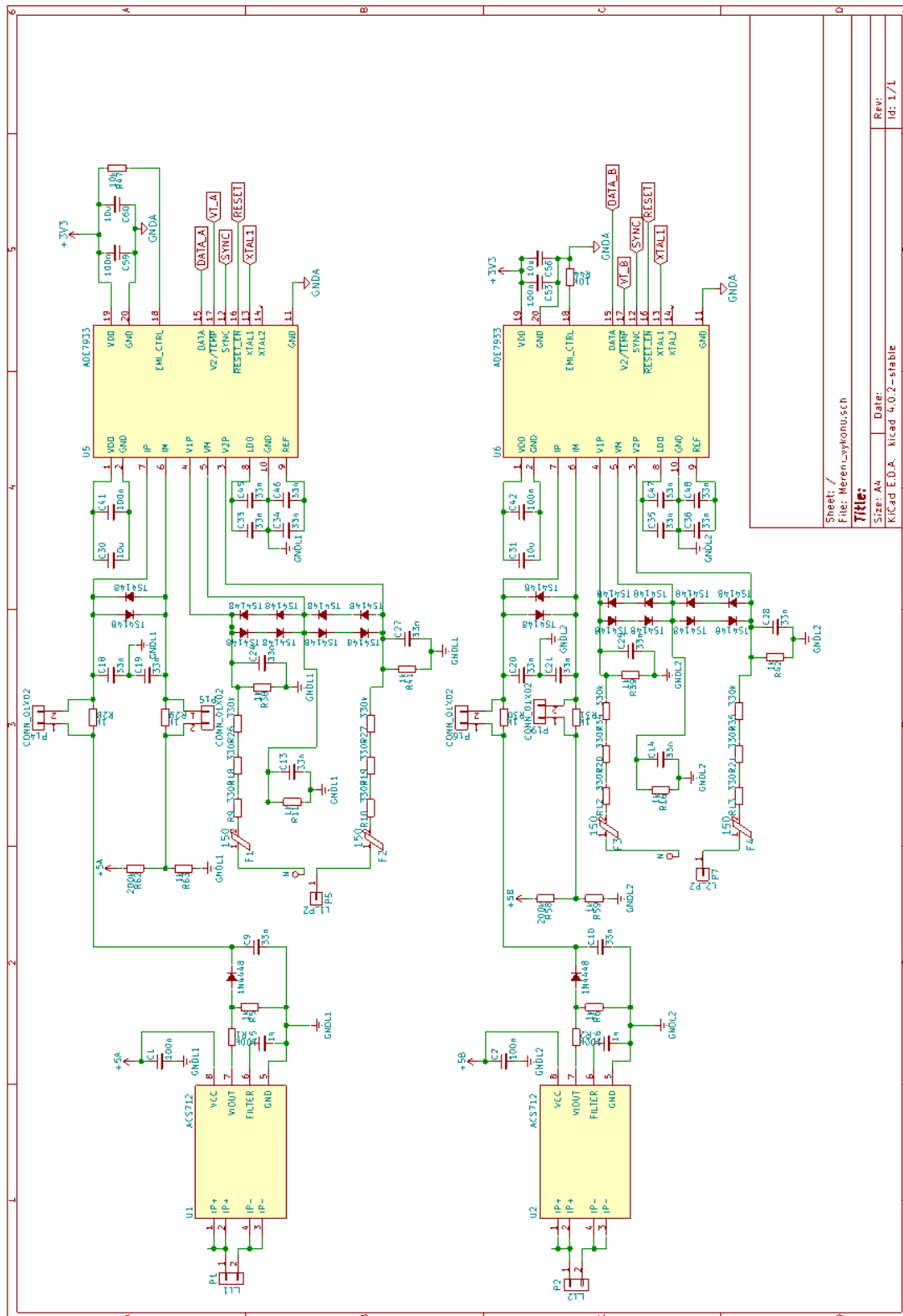
Obrázek č. 48: Úplné vnitřní blokové uspořádání STM32F746
Obrázek č. 49: Pohled na prototyp měřicí karty
Obrázek č. 50: Pohled na finální prototyp

21 Seznam Tabulek

Tabulka. 1: Finanční analýza

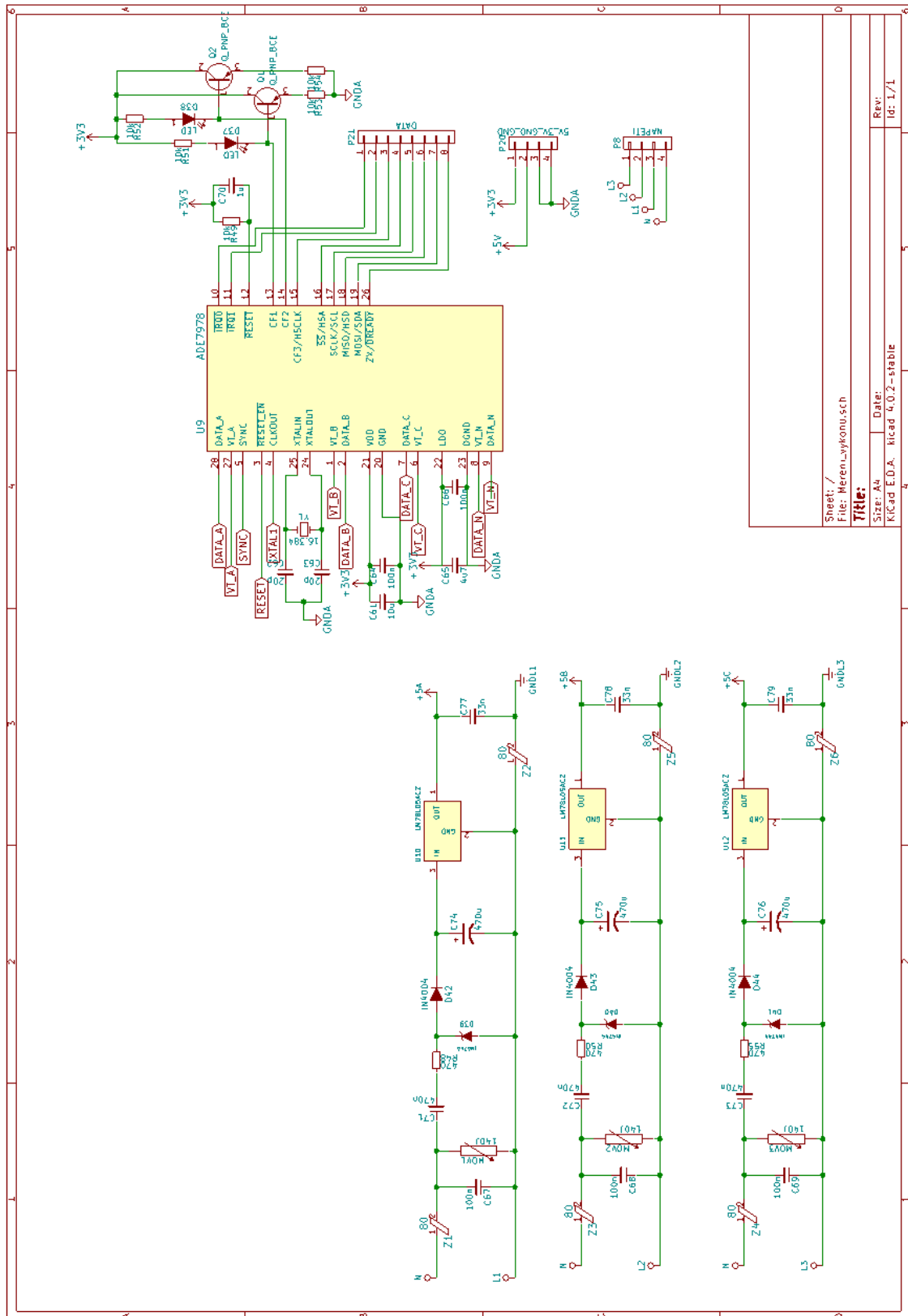
22 Přílohy

22.1 Příloha A – Schéma zapojení



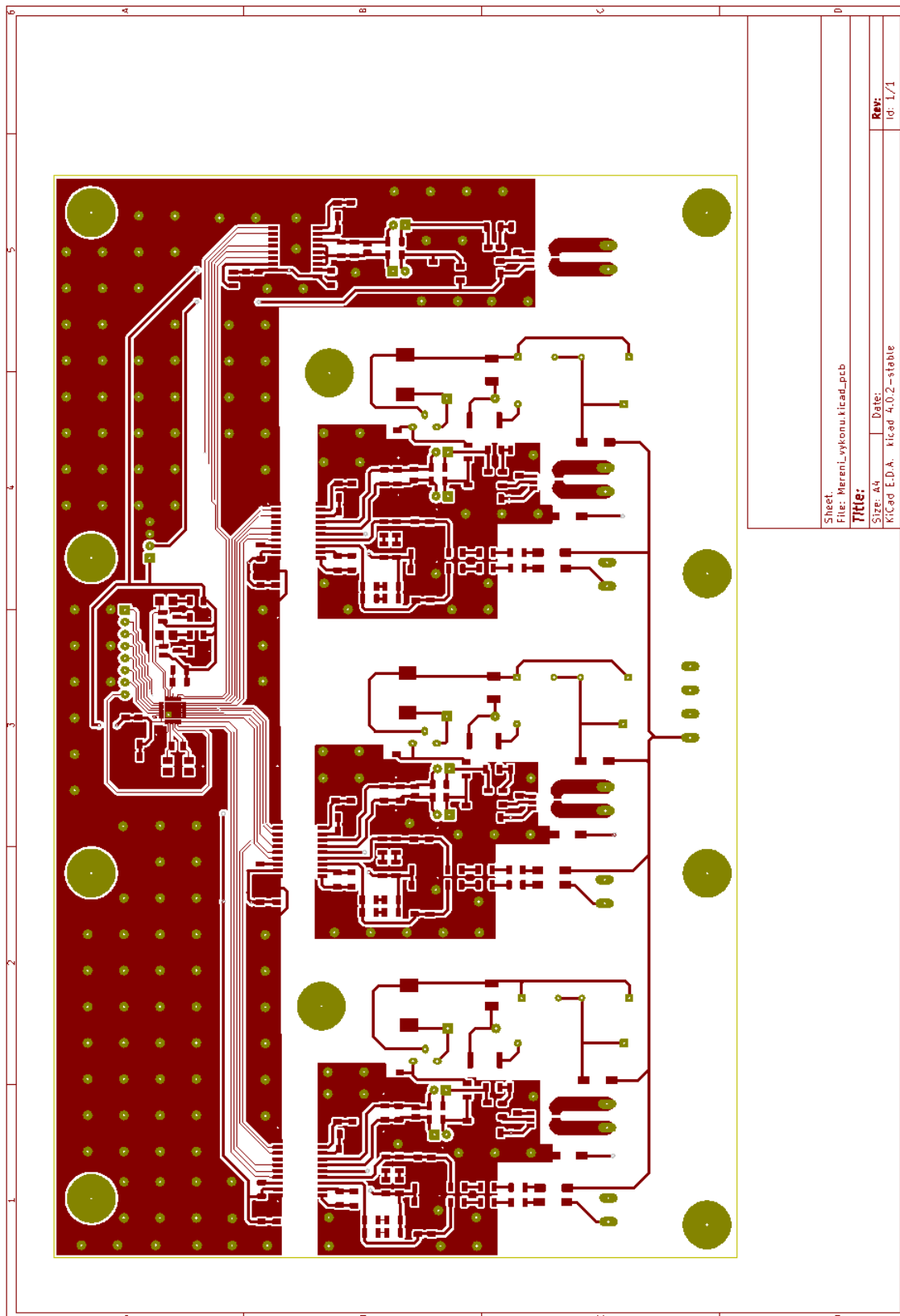
Sheet: /	File: Mereni_vykonsuch
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad 4.0.2-stable	REV: 1/1

Obr. č. 42: Schéma zapojení ACS712 a ADE7933 pro fáze A a B

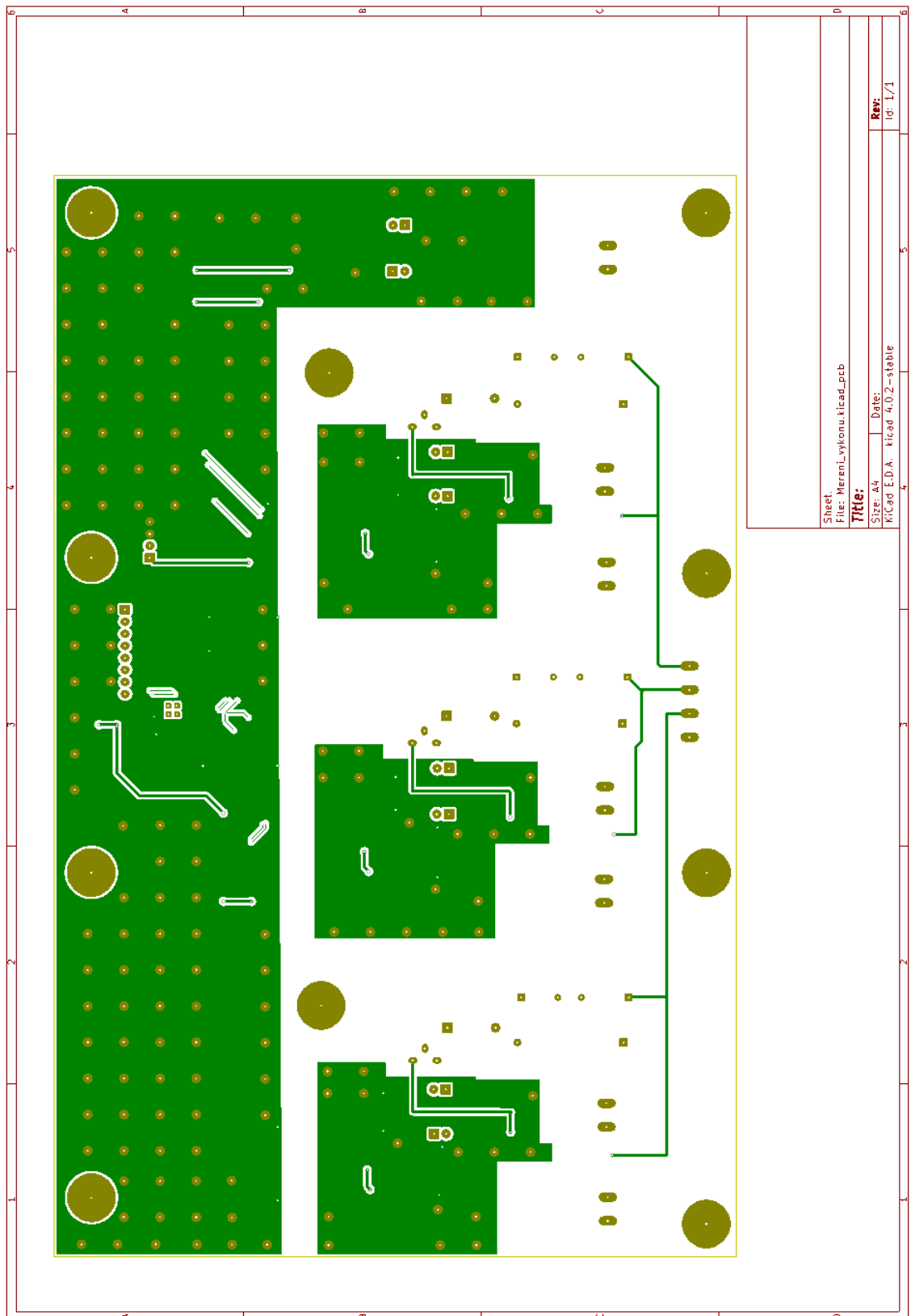


Obr. č. 44: Schéma zapojení ADE7933 a napájení pro ACS712

22.2 Příloha B – Motivy desky plošných spojů

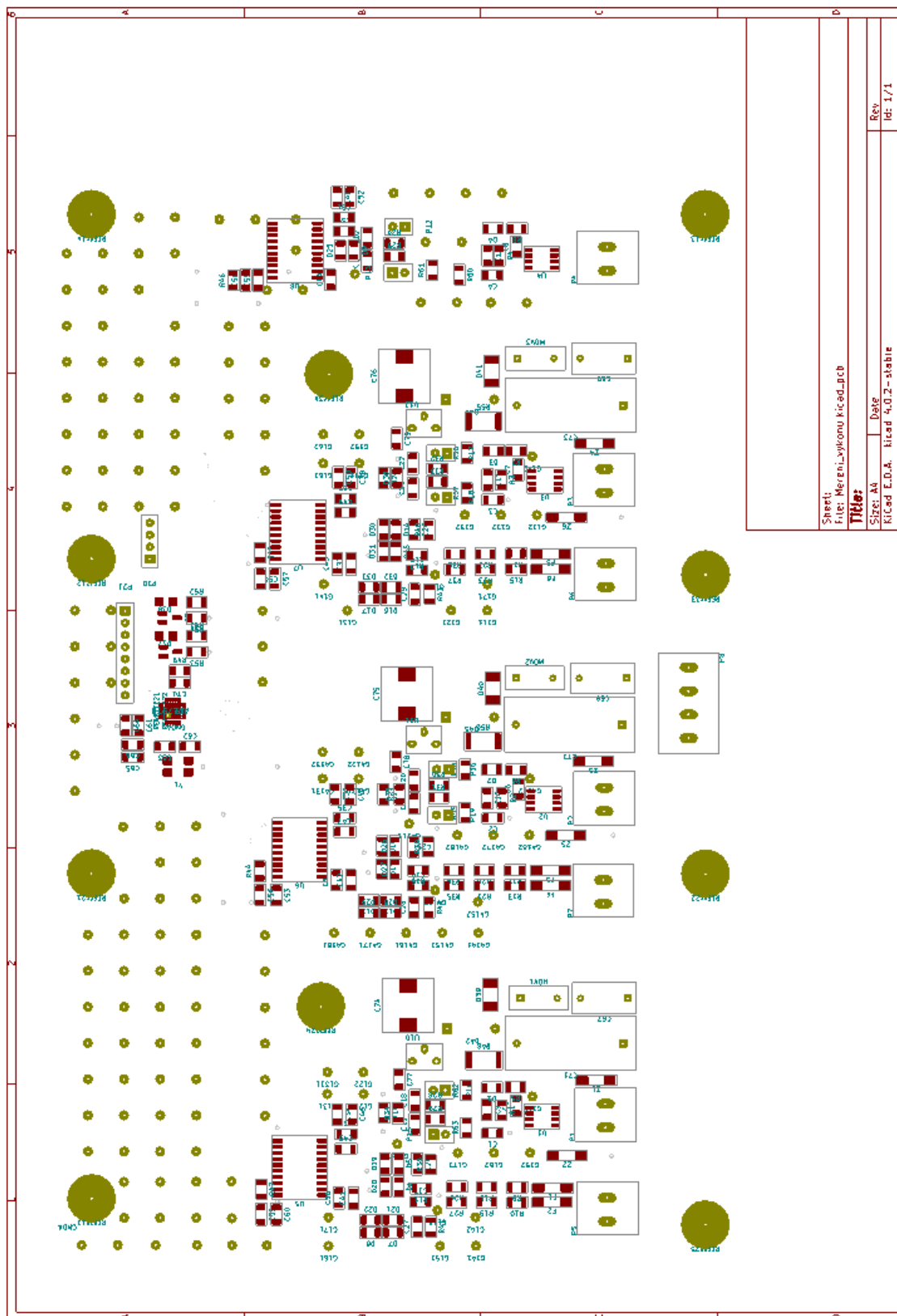


Obr. č. 45: Návrh desky plošných spojů - vrchní strana



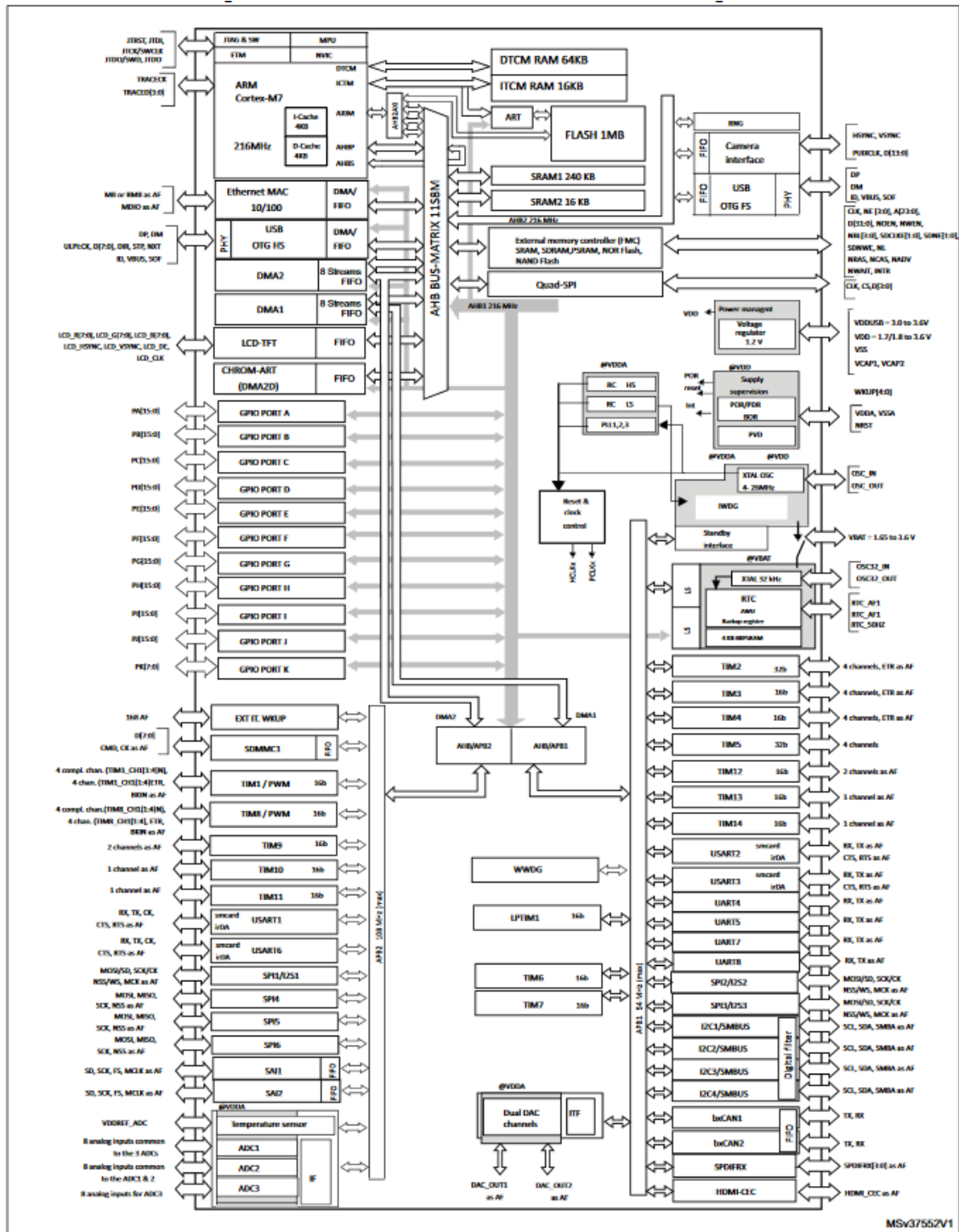
Obr. č. 46: Návrh desky plošných spojů – spodní strana

22.3 Příloha C – Osazovací plán



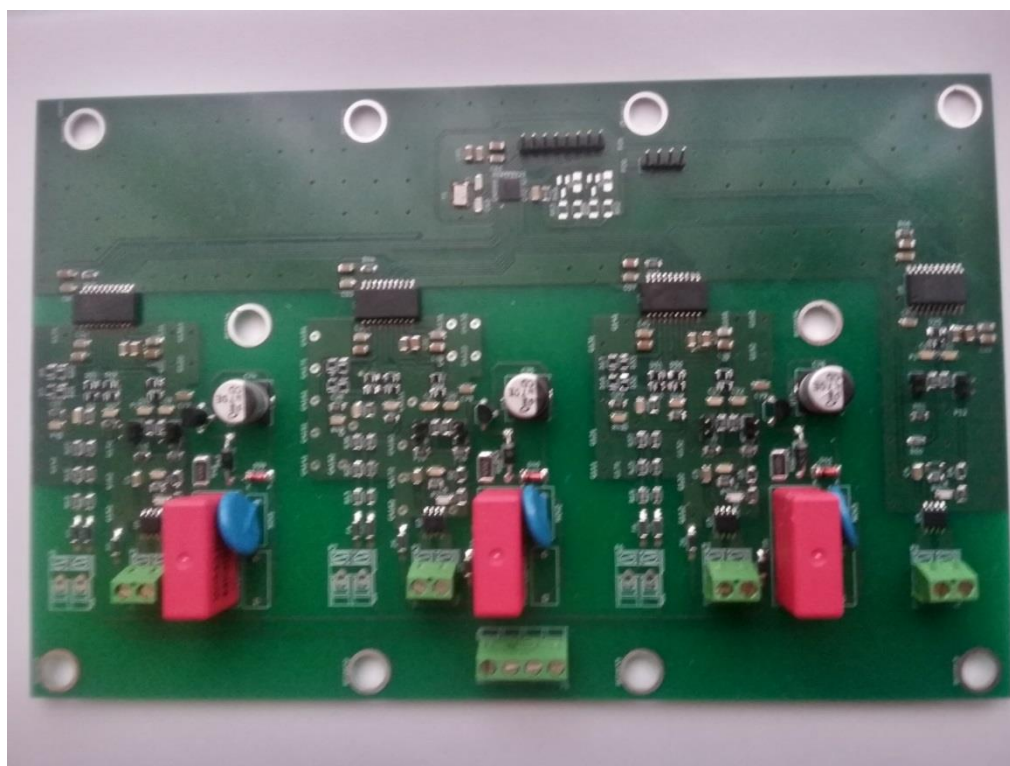
Obr. č. 47: Osazovací výkres - vrchní strana

22.4 Příloha D – Úplné vnitřní blokové uspořádání STM32F746



Obr. č. 48: Úplné vnitřní blokové uspořádání STM32F746

22.5 Příloha E – Fotodokumentace prototypu



Obr. č. 49: Pohled na prototyp měřicí karty



Obr. č. 50: Pohled na finální prototyp