

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Smart metering: Cesta od mechanického elektroměru k chytrým sítím

Učební texty k semináři

Autoři:

Ing. Radomír Kozub (Freescale Semiconductor, Rožnov p. R.)

Datum:

14. 12. 2012

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah.....	1
1. úvod do chytrých sítí, automatic meter reading	3
1.1. Základní vlastnosti statických elektroměrů	3
1.2. Základní požadavky na statické měřiče elektrické energie vyžadované normou EN50470-3	4
1.3. Snímače proudu ve statických měřičích elektrické energie	5
1.3.1. Bočníky	5
1.3.2. Proudová trafa.....	7
1.3.3. Rogovského cívky.....	8
1.4. Dynamické rozsahy měřičů elektrické energie	9
1.4.1. Proudové rozsahy	9
1.4.2. Napěťové rozsahy	10
1.5. Topologie jedno a vícefázových přístrojů	10
1.5.1. Jednofázový měřič s bočníkem	10
1.5.2. Jednofázový měřič s bočníkem a proudovým transformátorem .	11
1.5.3. Jednofázový měřič s bočníkem a dvěmi proudovými transformátory	12
1.5.4. Třífázové měřiče proudu.....	12
1.6. Moderní MCU pro konstrukci elektroměrů	13
1.6.1. CPU.....	15
1.6.2. Analogový front end Sigma Delta převodník.....	16
1.6.3. Real Time Clock + tampers.....	21
1.6.4. Displej – LCD controller.....	22
2. Smart grid.....	23
2.1. Požadavky na moderní PLC komunikace	24
2.2. Použitelná frekvenční pásma	24

2.3.	Otevřené protokoly a modulace	25
2.3.1.	PLAN, PLAN+ a S-FSK.....	25
2.3.1.	PRIME, G3, FlexOFDM.....	27
2.4.	Zabezpečení	28

1. ÚVOD DO CHYTRÝCH SÍTÍ, AUTOMATIC METER READING

Rozvoj procesorové techniky přináší revoluci ve využívání elektronického měření spotřeby elektrické energie, odečtu, fakturace a tarifkace.

Zvyšující se ceny energií přináší zároveň zvýšení počtu pokusů o krádeže energií, a tomu se dodavatelé elektrické energie pokoušejí co nejúčinněji bránit. Přispět k tomu má i systém automatického odečtu spotřeby elektrické energií (Automatic Meter Reading - AMR), zaznamenávání profilů spotřeby a jejich statistickému vyhodnocení spolu s automatickým hlášením pokusů o ovlivnění měřících přístrojů. Toto vede ke snaze o vybudování komunikační sítě umožňující komunikaci každého elektroměru s datovým centrem dodavatele energií.

Jakmile je tato infrastruktura jednou vybudována, nabízí se její mnohem širší využití. S prudkým rozvojem zelených energií je stále více aktuální balancování sítí. Zde se nabízí řízení velkých zátěží jako vytápění a chlazení spolu s možnými marketingovými nástroji jako nových způsobů tarifkace. Konektivitu je rovněž možno předprodat pro dodavatele vody či plynu.

V následujících kapitolách se budeme zabývat dvěma stavebními kameny-konstrukcí elektronických statických elektroměrů a power line modemů (PLC)

1.1. Základní vlastnosti statických elektroměrů

Elektromechanické elektroměry se dnes nahrazují statickými elektronickými elektroměry. Ty mají mnoho výhod proti svým předchůdcům. Především mají mnohem vyšší přesnost a dynamický rozsah. Dnešní statické elektroměry dosahují přesnosti 0,5% v dynamickém rozsahu 1:1000. Rovněž jsou konstrukčně jednodušší a neobsahují mechanické prvky a proto je nazýváme přístroje statické.



- Přístroje mohou bez dalších nákladů poskytovat mnohem více měřených údajů jako napětí, proud, frekvenci nebo přepínat profily.
- Měření reaktivní energie je pouze otázka implementace vhodných výpočetních algoritmů, nevyžaduje žádný další hardware.
- Snadná je rovněž implementace ukládání profilů, měření a ukládání čtvrt hodinových maxim a podobně.
- Přístroje bývají vybaveny rozhraním pro odečet počítadel energií IrDA nebo pro AMR.
- Pokud jsou přístroje vybaveny hodinami reálného času, umožňují tarifkaci dle předem nastavených časových pásem.
- Přístroje také umožňují pokročilou detekci pokusů o ovlivnění měření, případně zásahů do přístrojů.

1.2. Základní požadavky na statické měřiče elektrické energie vyžadované normou EN50470-3

Norma popisuje základní parametry, které musí měřicí přístroje splňovat jako přesnosti měření, dynamické rozsahy, ovlivňující faktory a jejich vliv na přesnost měření.

Norma standardizuje měřená napětí a proudy:

- Napětí 120-230-277-400-480 (V)
- Nominální proudy 5-10-15-20-30-40-50 (A)
- Maximální proudy v násobcích proudu nominálního
- Požadované přesnosti měření aktivní energie **P [W]** pro činnou a také reaktivní zátěž.
- Měření se provádí pro indukivní $PF = 0,5$ a kapacitní zátěže $PF = -0,8$

Norma dále uvádí celou řadu faktorů ovlivňujících přesnost měření:

- Frekvence sítě
- Harmonické složky v napěťových a proudových obvodech
- Teplota okolí

1.3. Snímače proudu ve statických měřících elektrické energie

1.3.1. Bočníky

Nejjednodušší a zároveň nejpřesnější proudový senzor je snímací odpor – bočník - shunt rezistor. Norma EN 50470 definuje maximální výkonové ztráty na rezistoru na 2W pro Class A, B respektive 3W pro Class C. Toto nám omezuje maximální ohmickou hodnotu shunt rezistoru a zároveň napětí generované procházejícím proudem. V praxi se však maximální ohmické hodnoty nevyužívají kvůli ohřevu měřících částí přístroje .

Typické hodnoty shunt rezistoru pro proudové rozsahy 5(60)A jsou 170uOhm až 250uOhm. Odpovídající generované napětí je nízké viz. tabulka a vyžaduje jeho zesílení před tím, než je přivedeno na AD převodník přístroje.

Výhody:

- Levné, dobrá linearita

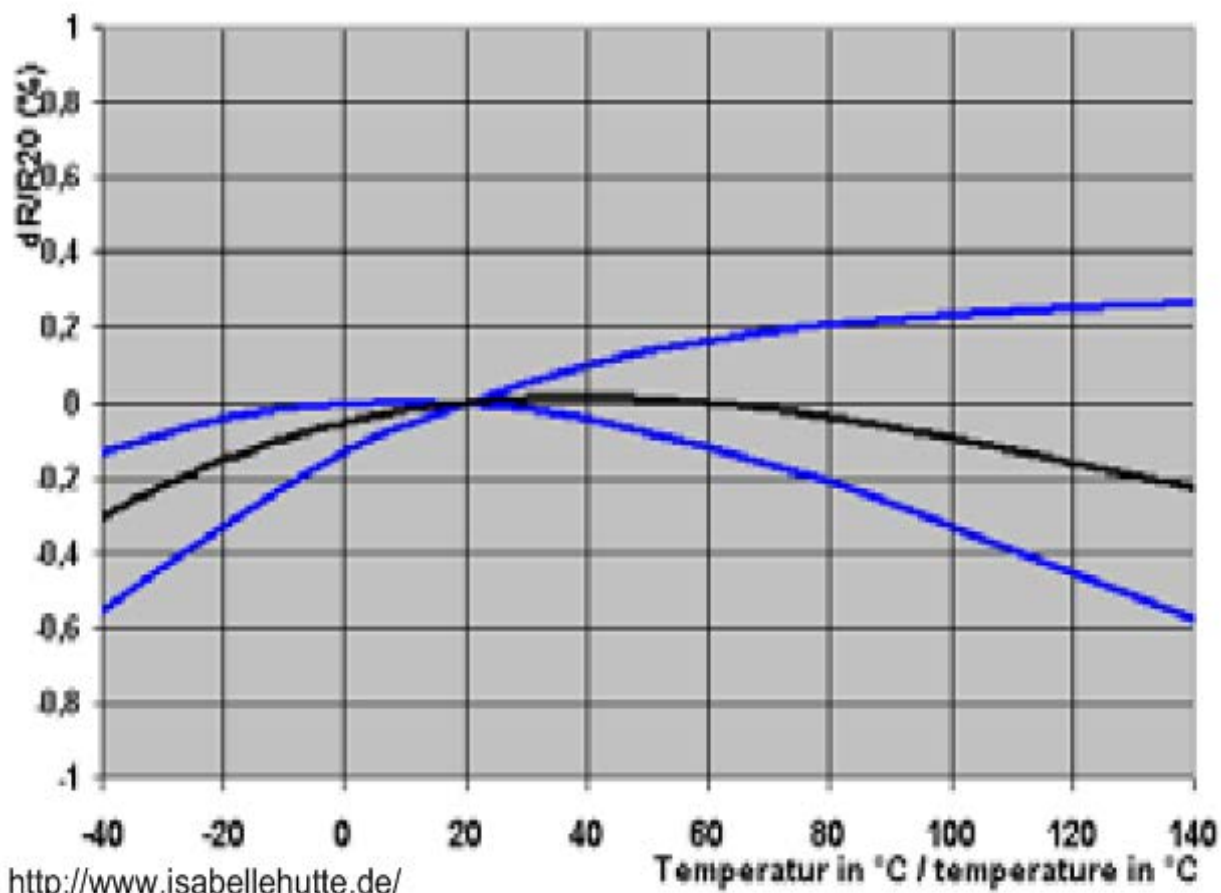


- Jednoduchý design
- Odolné proti magnetickému poli

Nevýhody

- Vlastní ohřev při vyšších proudech
- Neposkytuje galvanickou izolaci tudíž není vhodný pro vícefázové přístroje
- Induktivní složka impedance ovlivňuje měření reaktivní energie

ISENSE(A)	RSENSE(Ω)	USENSE(V)
0.02	250 Ω_{μ} / 170 Ω_{μ}	5 μ V / 3.4 μ V
0.15		37.5 μ V / 25.5 μ V
60*		15mV / 10.2mV



1.3.2. Proudová trať

Zásadní výhodou proudových transformátorů je, že poskytují galvanickou izolaci proudové cesty a tudíž jsou vhodná pro vícefázové elektroměry. Rovněž výstupní napětí, které je stanoveno zatěžovacím odporem (burden resistor) je dostatečně vysoké, aby nebylo nutné je dále zesilovat. Pro jednofázová měření nejsou používána pro svoji velikost, cenu a nízkou odolnost proti přesycení jádra vnějším magnetickým polem.

ISENSE(A)	Ratio	USENSE(VP-P)
0.02	1:2500 Rb=12.5Ω	282.8uV
0.15		2.1mV
60		0.848V

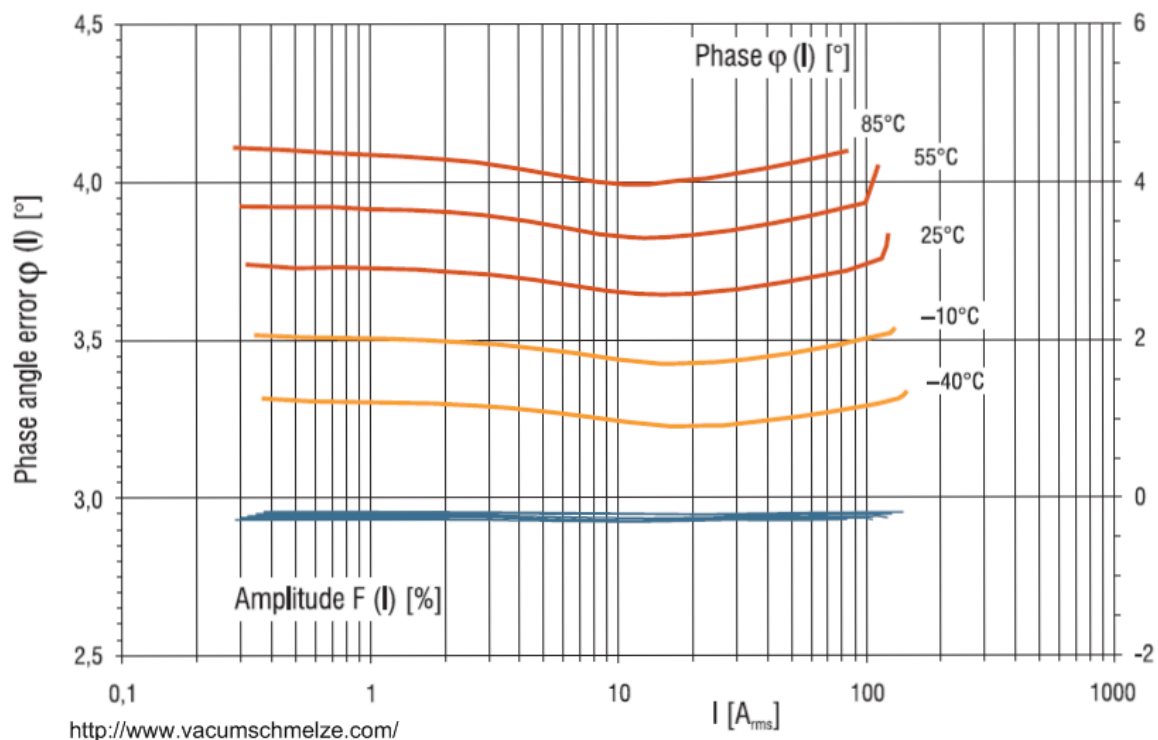
Výhody proudových traf

- Poskytují galvanickou izolaci
- Snesou vysoké nadproudy
- Malý teplotní drift
- Vhodná velikost výstupního napětí



Nevýhody

- Veliké fázové chyby 0,1° až 7°
- Fázové chyby jsou funkcí teploty a proudu
- Velké a drahé
- Železné jádro saturuje při DC proudech nebo při ovlivňování měření magnetickým polem



1.3.3. Rogovského cívky

V současné době ne příliš často využívány, jelikož má signál nízké napětové úrovně a je derivovaný, což přináší další náklady na integrátory a s tím spojené problémy při výpočtech reaktivních energií. Přitom byl donedávna podobně drahý jako proudová trať. Dnes se objevují designy Rogovských cívek na plošných spojích a výkonná jádra dnešních procesorů snadno umožní integraci signálu, proto se s nimi budeme pravděpodobně potkávat stále častěji.

Výhody:

- Poskytuje elektrickou izolaci
- Odolnost proti vysokým nadproudům
- Malý teplotní drift
- Lineární fázová odezva
- Nemá jádro, tudíž nesaturuje DC proudy nebo vnějším magnetickým polem



Nevýhody:

- nutný integrátor na vstupu
- malá odolnost proti rušení – nutné robustní stínění

ISENSE(A)	Fr($\Omega\mu$ /Hz)	USENSE(VP-P)
0.02	8.33 (PA3202NL)	23.56uV
0.15		176.71uV
60		70.7mV

1.4. Dynamické rozsahy měřičů elektrické energie

1.4.1. Proudové rozsahy

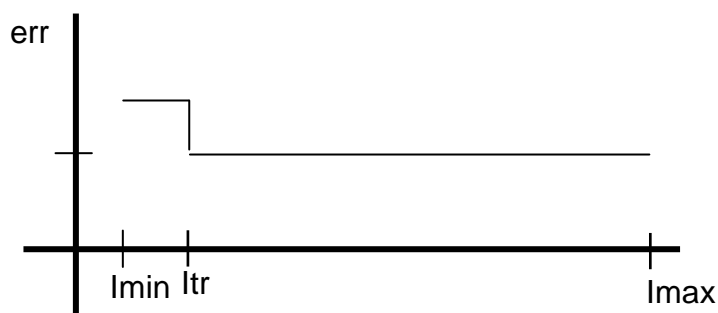
Norma EN 50470 definuje proudové rozsahy dle následující tabulky. Definovaná přesnost nezahrnuje přídatné povolené chyby přístroje pro ovlivňující faktory

Class	Ireference [A]	I _{maximum} [A]	I _{transition} al [A] I _{tr} = I _{ref} /10	I _{minimum} [A] I _{min} =0.5*I _{tr}	Accuracy [%] <I _{min} ; I _{tr} >	Accuracy [%] <I _{tr} ; I _{max} >
A	5	100	0,5	0,25	2,5	2
B	5	100	0,5	0,25	1,5	1
C	5	100	0,5	0,15	1	0,5

Pro přístroj 5(100)A to znamená, že nominální proud I_n 5A je ten, při kterém bude přístroj provozován nejčastěji.

Maximální proud I_{max} je nejvyšší proud, při kterém přístroj měří s přesností požadovanou jeho třídou.

Startovací proud I_{start} je proud při jehož průtoku přístrojem musí dojít k registraci výkonu do půl hodiny. Žádná vyšší přesnost není žádána.



Norma rovněž uvádí, že opakovatelnost měření musí vykazovat chyby 1/10 třídy přesnosti. Norma již neuvádí dobu měření. V praxi jsou ale požadavky výrobců přístrojů mnohem přísnější, neboť požadují dobu měření co nejkratší, aby nebyla cena ověřování přístrojů příliš vysoká.

1.4.2. *Napětové rozsahy*

Pro měření napětí jsou požadavky na dynamický rozsah měření daleko mírnější, protože se nepředpokládá funkčnost elektroměru při napětí nižším, než je polovina napětí nominálního – 230V a tedy požadovaný dynamický rozsah je 1:2.

Pro měřiče nízkého napětí se typicky se využívají odporové děliče. Zde je nutné využívat vhodné komponenty – nejlépe rezistory větších (rozměrnějších) technologií s vyšším dovoleným napětím a s větší odolností proti přetížení. Důležitý je taky teplotní koeficient rezistoru. Vhodné jsou například metal film rezistory.

Pro vysoká napětí se využívají napětové transformátory.

1.5. Topologie jedno a vícefázových přístrojů

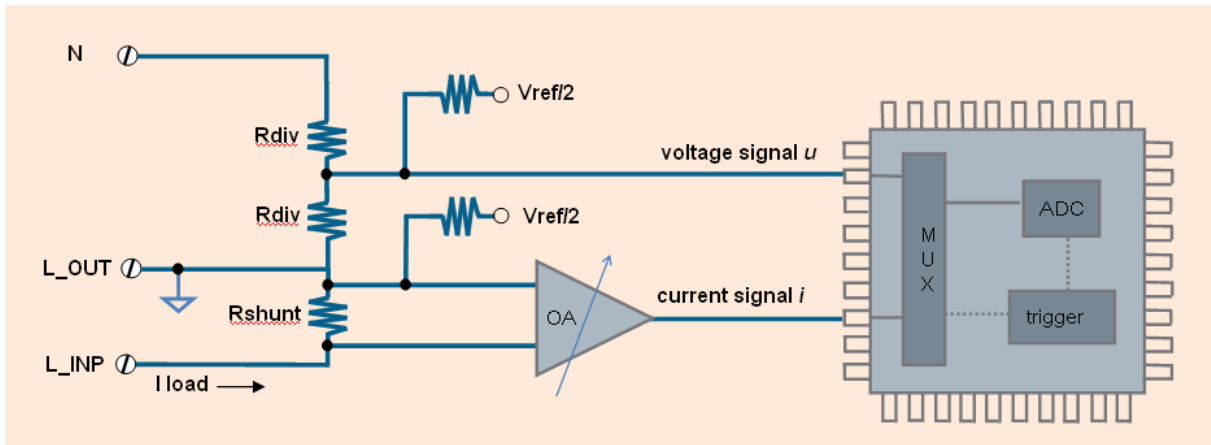
V následujících kapitolách se budeme zabývat možnými topologiemi přístrojů navržených výhradně s procesory, bez použití specializovaných ASIC.

1.5.1. *Jednofázový měřič s bočníkem*

Starší typy MCU nedisponovaly ADC převodníky s programovatelnými zesilovači PGA a tudíž vyžadují externí zesílení zhruba 30x jelikož bočníky mají nízké výstupní napětí (cca 15mV pro I_{max}).

Zem přístroje je svázána na fázové napětí a bočník snímá proud procházející fází. To je z důvodu ochrany před krádeží proudu odpojením nulovacího vodiče a svedením proudu do vodiče zemního.

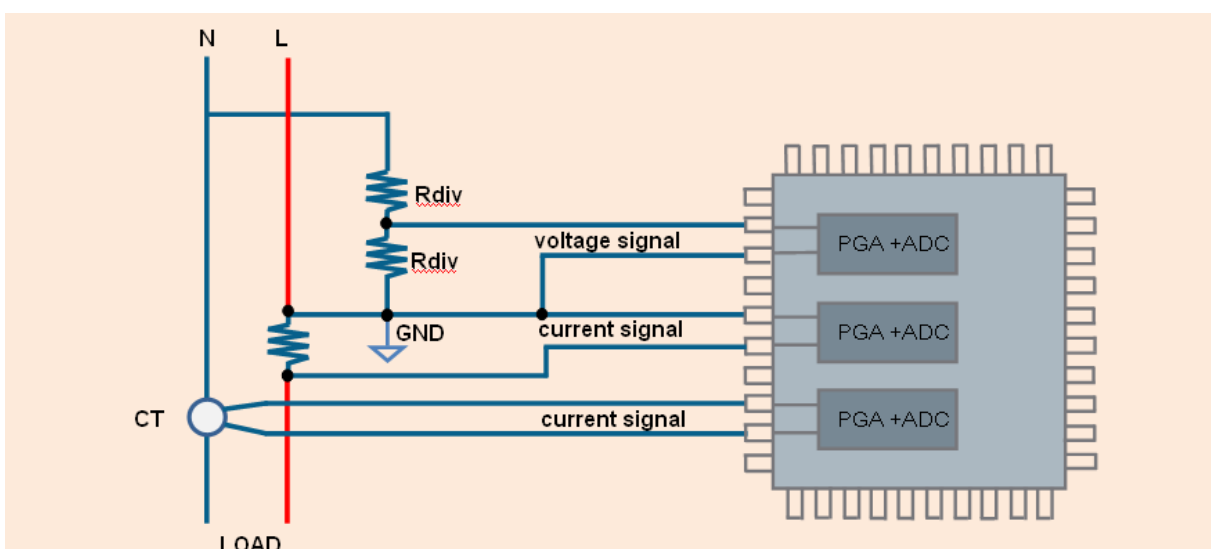
Pokud je ADC převodník vybaven PGA celá konstrukce úpravy signálu je jednodušší. Nemusíme totiž složitě získávat biasovací napětí $V_{ref}/2$ které je náchylné na vnesení přeslechů mezi napětím a proudem.



1.5.2. *Jednofázový měřič s bočníkem a proudovým transformátorem*

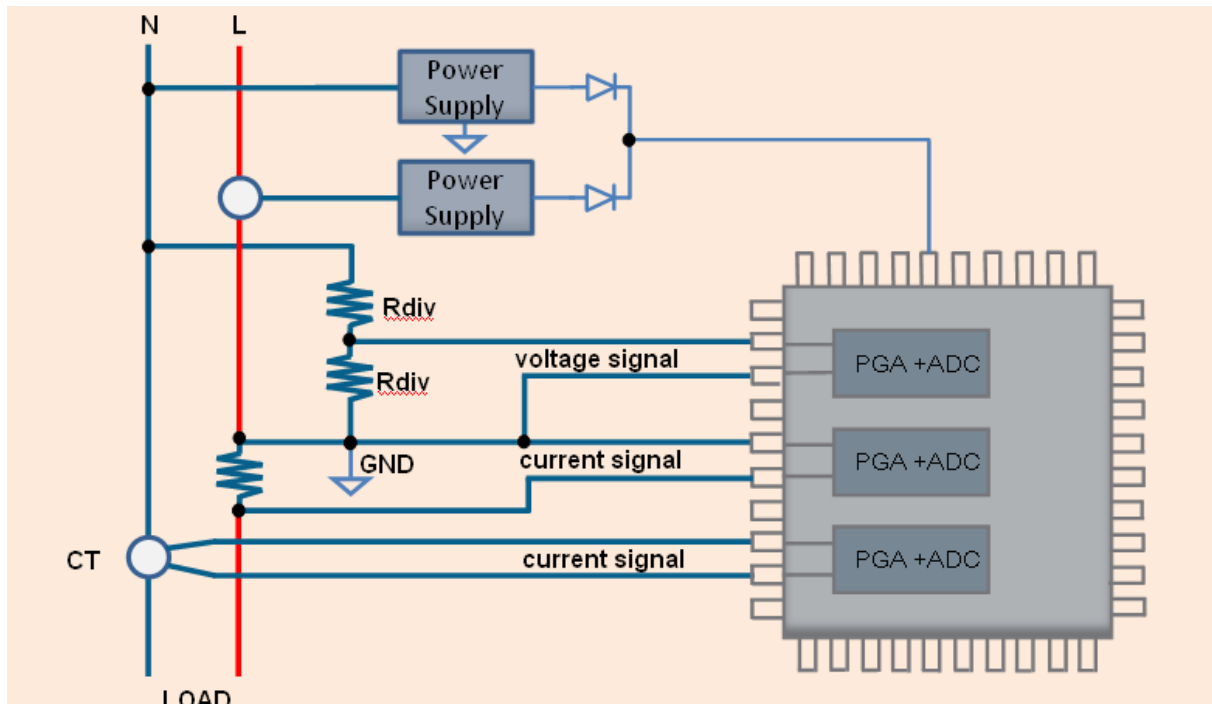
Pokud je vyžadována vyšší ochrana proti krádežím proudu, používá se měření v obou pracovních vodičích – fázovém a nulovacím.

Pro výpočet energie se poté používá vyšší hodnota proudu z obou snímačů.



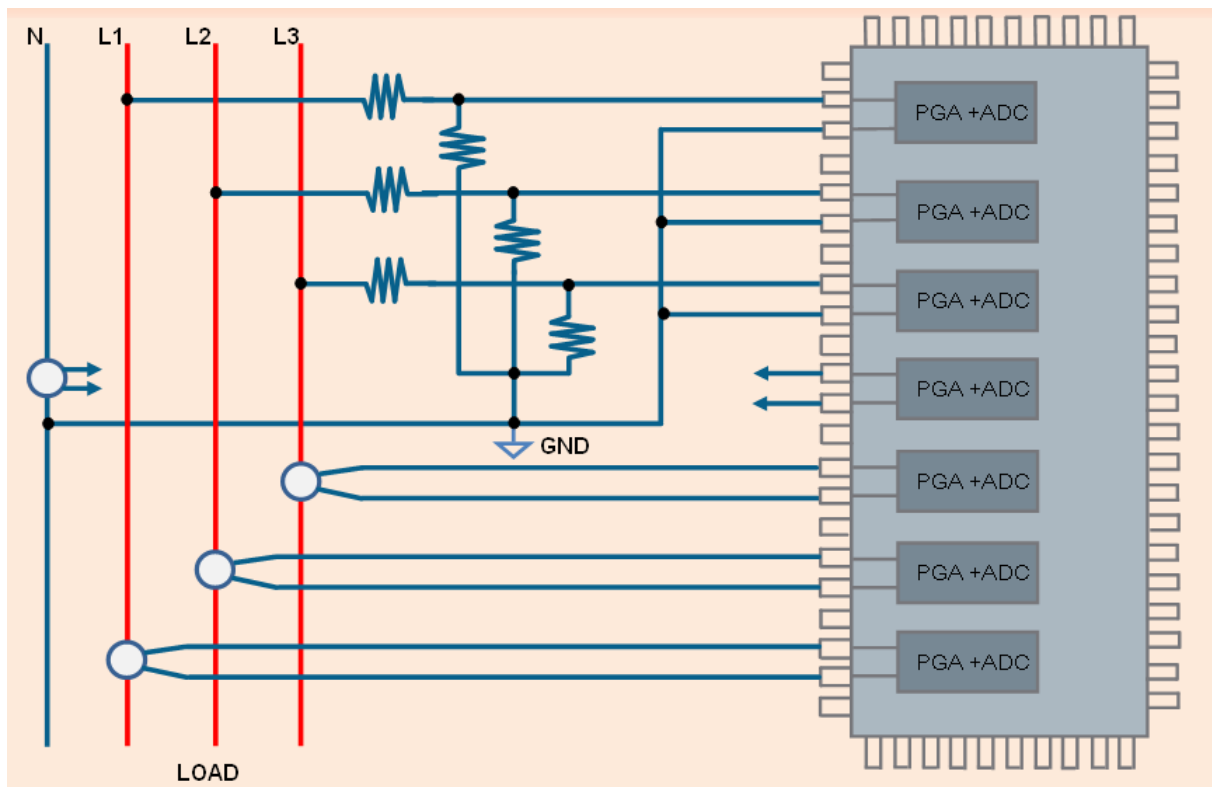
1.5.3. *Jednofázový měřič s bočníkem a dvěma proudovými transformátory*

V zemích, kde jsou krádeže energií častým jevem se využívá jeden proudový transformátor jako zdroj napájecího napětí. Zároveň funguje jako senzor proudu. Tato topologie klade vysoké požadavky na nízkou spotřebu celého přístroje a nízké startovací proudy MCU.



1.5.4. *Třífázové měřiče proudu*

Pro třífázová měření se v drtivé většině používají proudová traťa. Konstrukce s bočníky je taky možná – takzvané satelitní zapojení, ale vyžaduje vysoké galvanické oddělení proudových snímačů (bočník a převodník) a zdrojů, což zvyšuje cenu přístroje. V této topologii je použit nejvyšší počet AD převodníků (sedm ADC + PGA) který je používán v metrologii. Topologií zapojení třífázových měřičů je mnoho, také záleží na konfiguraci sítě, a jestli se používá v síti nulový vodič, nebo ne.



1.6. Moderní MCU pro konstrukci elektroměrů

Jako moderního zástupce MCU vhodného pro měření elektrické energie si uvedeme Freescale KM30 procesor.

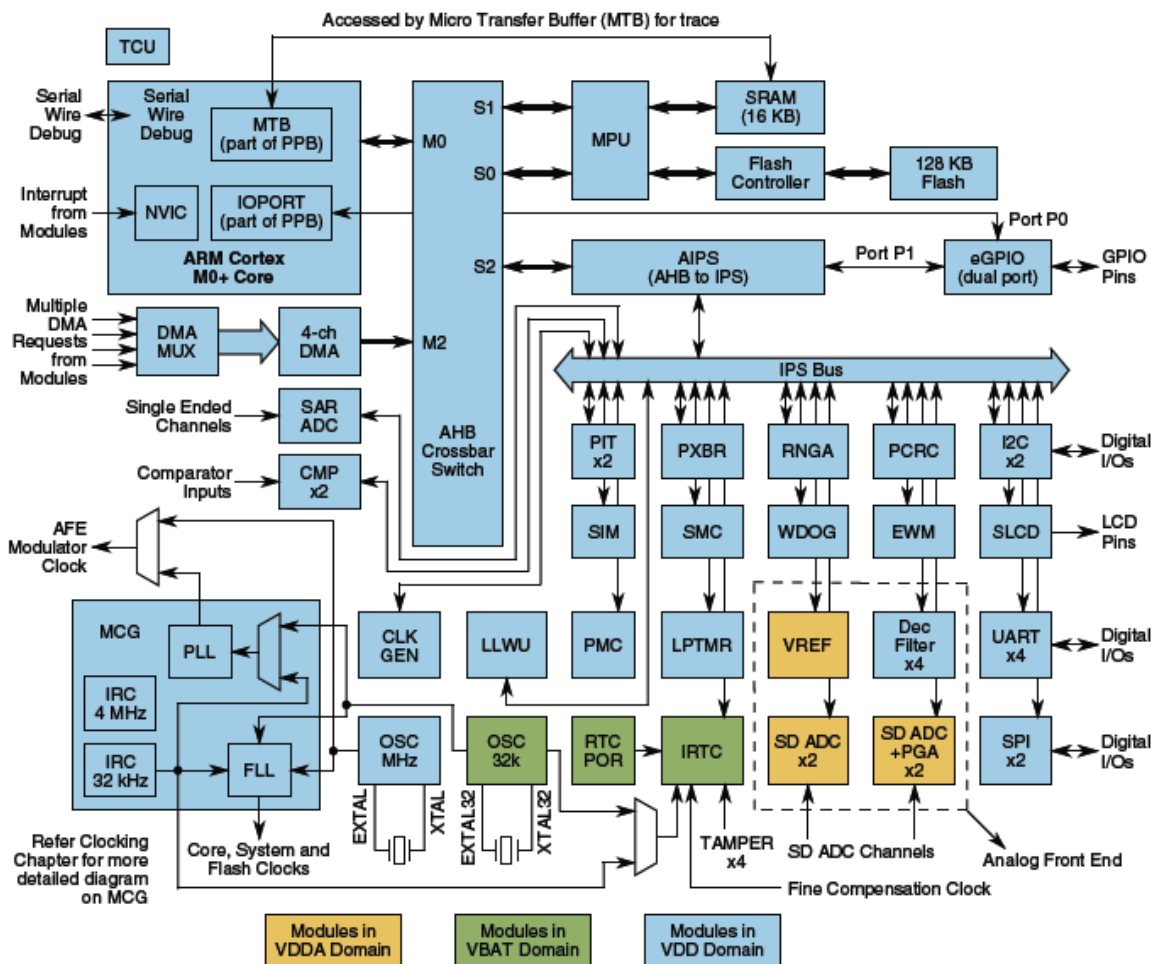
KM30 je založen na 32-bit ARM Cortex M0+ jádru běžícím na 50MHz. Procesor obsahuje řadu periférií, optimalizovaných pro měřiče energie. Jedná se o precizní 24-bitový Sigma Delta převodník s PGA, který má funkci fázové kompenzace, precizní napětovou referenci, blok reálného času či tempory.

Jádro MCU:

- ARM Cortex M0+
- 50MHz hodinová frekvence
- 32-bit THUMB-2 instrukční sada (také násobení 32*32)
- 16kB RAM / 128kB FLASH
- MPU – 8 paměťových regionů

Časová základna

- 32.768Hz krystal oscilátor pro RTC
- 1MHz – 32MHz oscilátor pro bus clock
- interní PLL pro precizní časovou základnu pro SD ADC
- interní FLL pro jádro a periférie



Analog

- 24-bit Sigma Delta 94dB
- PGA 1 až 32x
- 16-bit SAR převodník
- 1,2V napěťová reference
- komparátor a 6-bit DAC

DMA

- 4 kanály nezávisle programovatelné DMA kanály

Systémová integrace

- Crossbar – interně umožňuje propojit signály jednotlivých periférií
- Mnoho STOP, WAIT a LOW POWER modů
- Low Voltage Varning,
- Hardware CRC
- Random numer generátor
- Wtchdog

Komunikace

- UART s podporou IrDA, DMA, 5V toleranc
- SPI s podporou FIFO
- I2C s SMBUS protokolem

Timery

- Real Time Clock + calendaring
- Programmable Interrupt Timer PIT
- Quad Timers
- Sys Tick

1.6.1. CPU

Výpočetní výkon jádra je důležitý při volbě použitých výpočetních algoritmů. Výpočet činné energie obvykle není náročný na výpočetní výkon. Pro každý ADC převod potřebujeme několik násobení pro filtrování offsetu případně harmonických signálů pod antialiasing filtrem.

Pro výpočet jalové energie se už používají složitější filtry (Hilbert) popřípadě metody, které mohou potřebovat až 50 a více násobení na jeden vzorek, podle požadované přesnosti výpočtů.

Zde je již dobrý výpočetní výkon jádra velmi důležitý.

S ohledem na dynamický rozsah měřeného signálu a použití 24-bitového AD převodníku je nejvhodnější použití 32-bitových proměnných a násobení 32×32 do 64bitů. CPU by měl tedy poskytovat modul 32 bitové hardware násobičky. Instrukce MAC zásadně snižuje zatížení jádra.

Důležitým faktorem je taky podpora DMA, která omezí množství obsluhovaných přerušování a AD převodníku.

Granularita výpočtů energie – to je jak často se protečená energie vyhodnocuje, taky ovlivňuje výsledné zatížení CPU, ale bohužel nepříznivě ovlivňuje jitter měřené energie. V algoritmech je dobré zvolit vhodný kompromis – například 5-10ms.

ARM Cortex M0+ je velmi vhodný moderní procesor poskytující dost výkonu pro výpočet činných a jalových energií na jedno až třífázových měřicích.

bus cycles	Cortex ARM M0+	Cortex ARM M4
Active power	220	750
Reactive power	1000	2400

Další důležitá součást jádra procesoru je Memory Protection Unite, která umožňuje oddělení legaly relevant a non relevant kódu, pro snazší oddělení metrologické – tedy certifikované části kódu od kódu uživatelského, který chceme modifikovat bez nutnosti nové typové zkoušky přístroje.

1.6.2. Analogový front end Sigma Delta převodník

Výsledná přesnost zařízení pro měření spotřeby elektrické energie je závislá především na použitých AD převodnicích.

KM30 procesor obsahuje

- 24-bit Sigma Delta převodník
- 1 až 32 PGA s senzitivitou 7uV při GAIN = 1
- sampling rate 3kHz, 6kHz, 12kHz, 24 kHz, 48 kHz, 96kHz
- single / diferenciální měřící mody

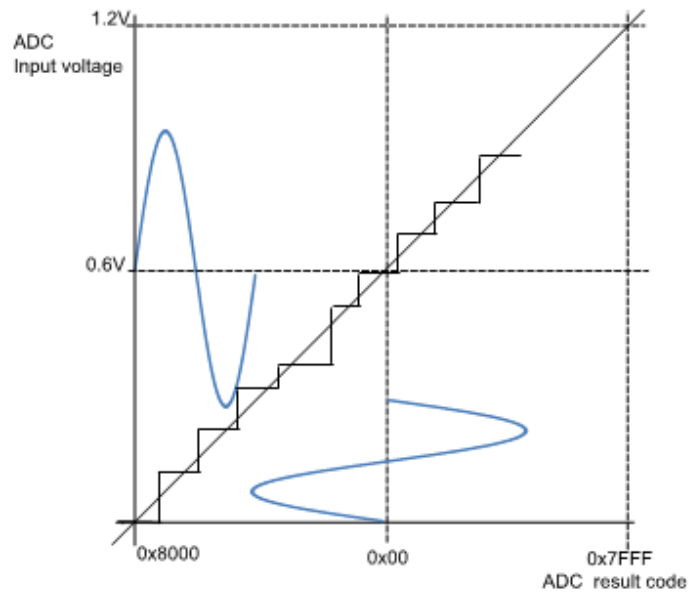
Požadovaná přesnost a samplovací frekvence je určena následujícími požadavky:

Měření proudu je pro svůj dynamický rozsah nejsložitější. Požadovaný dynamický rozsah proudu pro C Class 5(100)A je dán poměrem $I_{max}/I_{min} = 100/0,15 = 1:666$ s chybou 1%.

$$ENOB = \frac{\ln(1/DR * err)}{\ln(2)}$$

$$ENOB = \frac{\ln(1/DR * err)}{\ln(2)} = \frac{\ln(1/666 * .001)}{\ln(2)} \cong 16\text{bit}$$

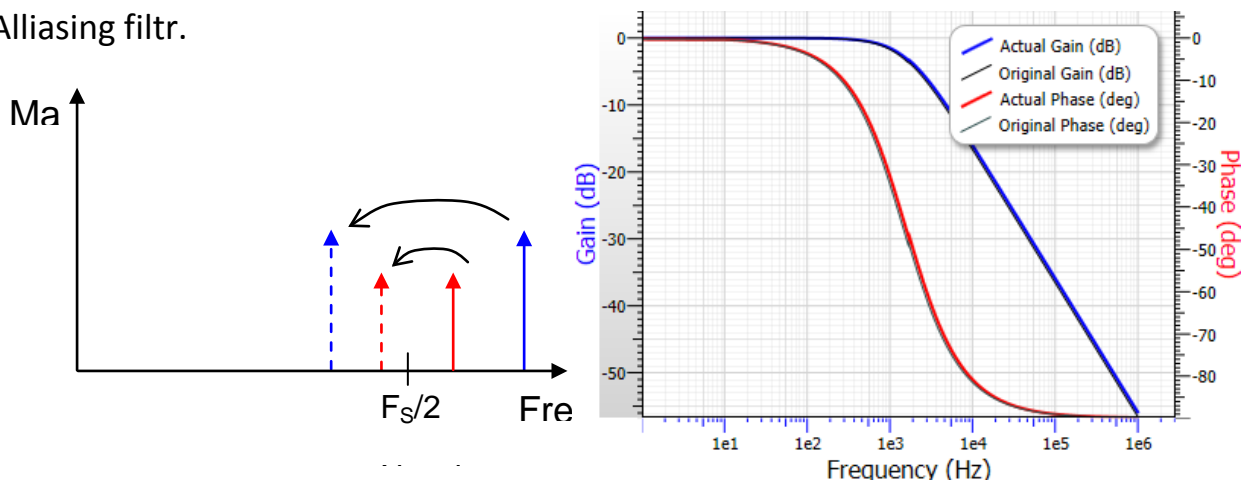
Effective Numer Of Bits ENOB v sobě zahrnuje mnoho vlastností převodníku od linearity, chyby offsetu a zesílení až po vstupní šum. Z hlediska metrologie je pro nás však naprosto zásadní linearita převodníku. Výsledná energie, která se porovnává s normálem, se totiž počítá nejméně zhruba 3 sekundy, tudíž dochází k mnohonásobnému průměrování výsledků AD převodu. Chyba offsetu a zesílení se naproti tomu odstraní pomocí kalibrace přístroje.



Chyby způsobené nelinearitou AD převodu však nejdou odstranit.

Vzorkovací frekvence

Norma EN50470 je poměrně benevolentní k měření harmonických složek, když vyžaduje testování pouze pro 5. harmonickou. Dnešní přístroje využívají vzorkovací frekvenci okolo 1,5-3ksmp/sec, aby bylo vůbec možno vyrobit Anti Aliasing filtr.



Programmable Gain Amplifier

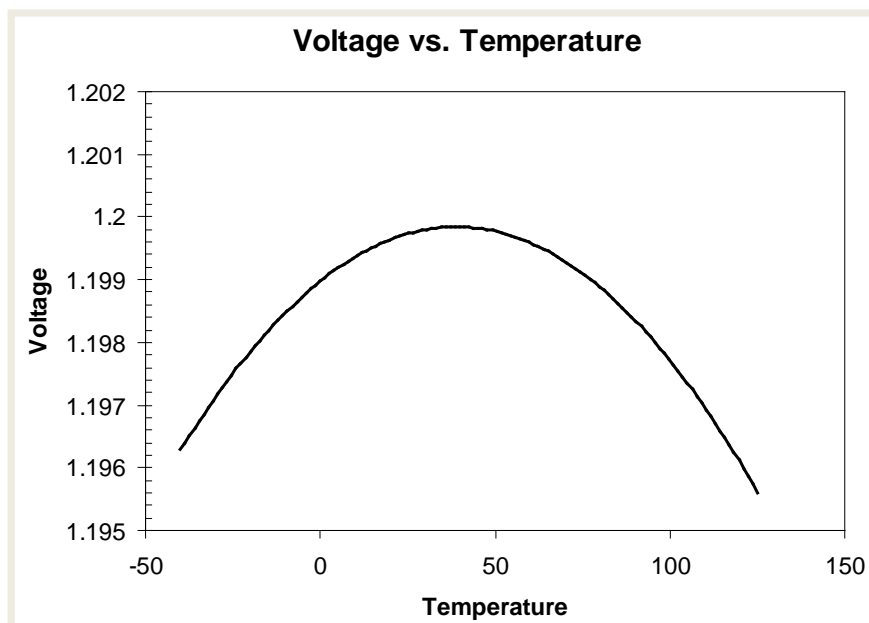
Pro měření proudu na bočnicích je nezbytné zesílení signálu před samotnou konverzí AD převodníkem, nejčastěji se používá zesílení 16 nebo 32 krát.

Napěťová reference

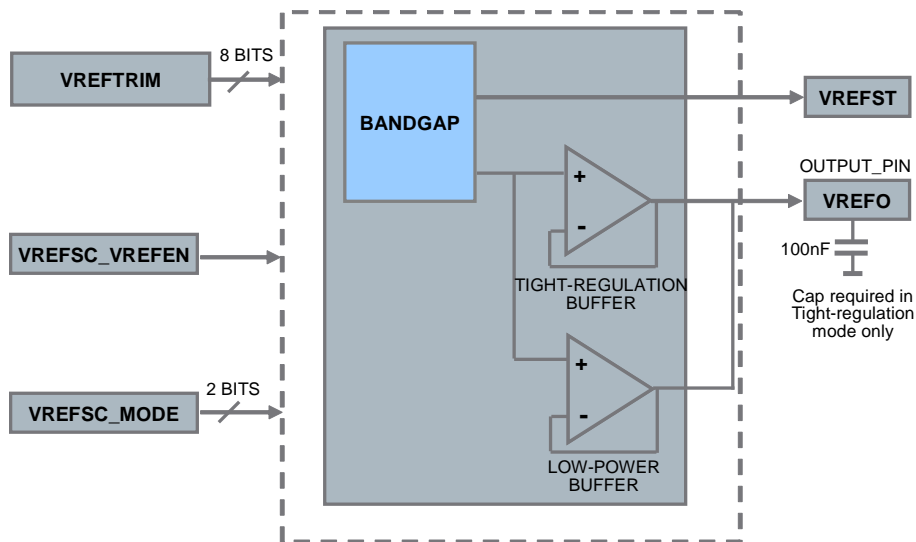
Napěťová reference je další ze zásadních součástí měřícího řetězce. Absolutní hodnota poskytovaného napětí není důležitá, neboť se dá kompenzovat v celkové kalibraci přístroje. Zcela zásadní je však teplotní drift a kolísání s napájecím napětím. Tyto parametry přímo ovlivňují výslednou přesnost měření.

Jako napěťová reference se používá v KM30 teplotně kompenzovaná Band Gap dioda, s 1,2V nominálním napětím.

- 1,2V nominální napětí
- 25ppm/°C teplotní drift
- 60dB potlačení kolísání napájecího napětí



Výhodné je, pokud je referenční napětí poskytováno i pro analogové obvody vně čipu a rovněž $\frac{1}{2} V_{ref}$ pro biasování vnějších obvodů.



Proto jsou na čipu k dispozici buffery pro posílení proudu z reference.

16-bit SAR AD převodníky

KM30 obsahuje 16-bit SAR AD převodníky. Ty neposkytují dostatečnou linearitu potřebnou pro měření proudů, ale s výhodou se dají použít pro měření napětí, které má pouze minimální dynamický rozsah.

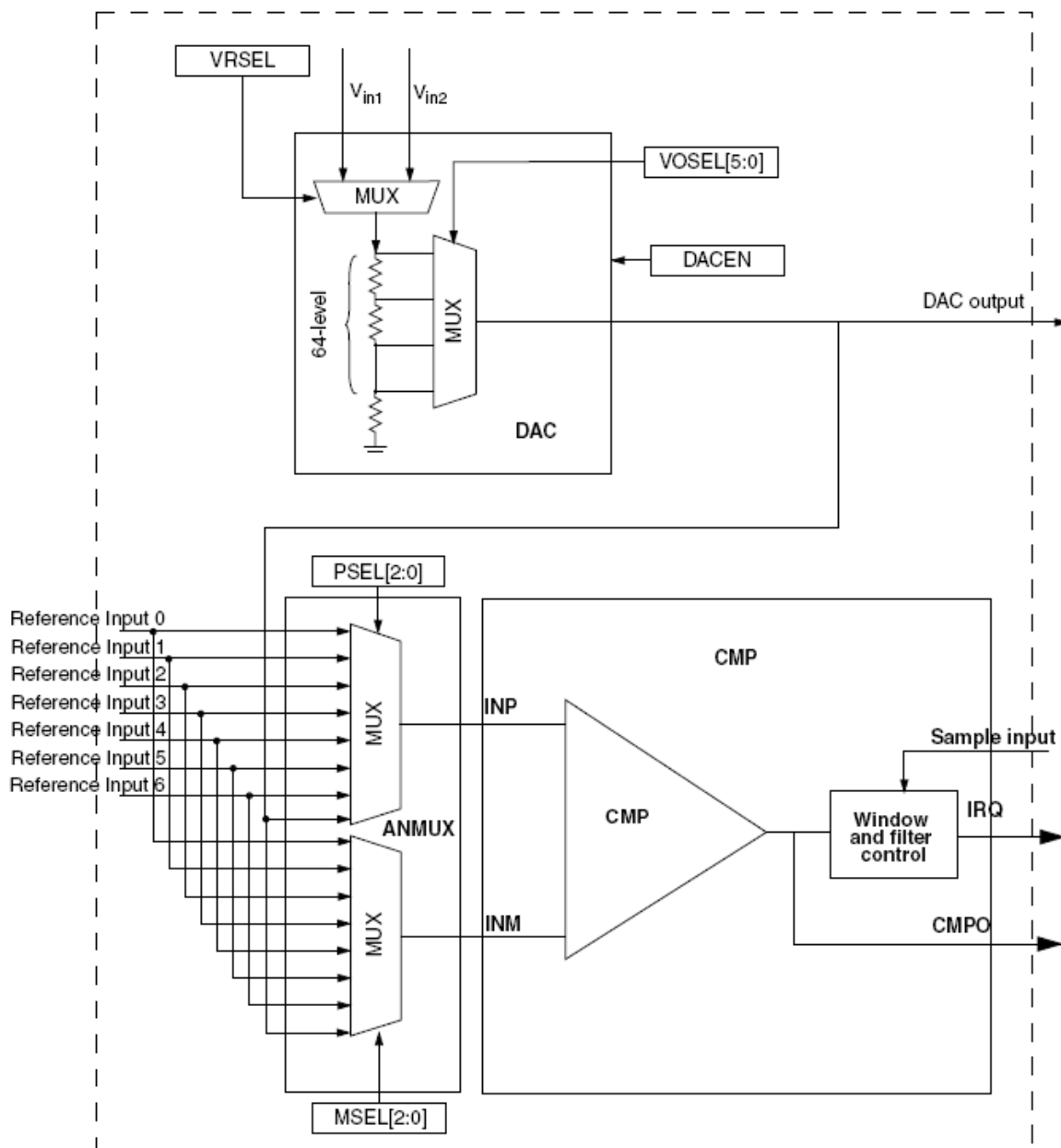
Modul SAR převodníku taky obsahuje teplotní senzor. Znalost teploty je zásadní pro teplotní kompenzace měření, ať už proudových transformátoru, napěťové reference nebo děličů v napěťových cestách.

Komparátor

Některé metody výpočtu elektrické energie se neobejdou bez znalosti síťové frekvence. Například metody založené na Fourierově transformaci vyžadují precizní oknování a tedy precizní hodnoty síťové frekvence.

KM30 poskytuje precizní a pokročilý komparátor:

- Programovatelná kontrola hystereze
- Volitelný rising / falling / both edge output
- Oknování vstupních signálů
- Digitální filtrování výstupního signálu



1.6.3. Real Time Clock + tampers

Pro přístroje, které autonomně přepínají mezi tarify je vyžadován blok s přesnou referencí reálného času. Požadovaná přesnost hodin je 5ppm, což odpovídá chybě 2,6minuty / rok.

Běžné 32.768kHz krystaly mají přesnost 25ppm a proto musí být interní sekundová reference kompenzována. To se provádí buď na úrovni krystalu pomocí zatěžovacích kapacit, nebo digitální kompenzací v RTC modulu.

RTC musí fungovat při výpadku elektrické energie na záložní baterii. Vzhledem k cenám lithiových baterií je velmi důležitá spotřeba modulu, která by neměla přesáhnout 1uA. Na ni musí být systém schopen běžet po dobu 12-ti let.

RTC modul má obvykle implementovanou funkci temper pinů, které jsou připojeny na mikropínače detekující otevření krytu svorkovnice nebo samotného přístroje.

Událost otevření krytu musí být zapsána do non volatile paměti přístroje.

Regulační úřady v některých zemích vyžadují oddělení baterie pro RTC a druhé baterie pro čtení číselníků z displeje při výpadku napájecího napájení. Pro tento případ je vhodné, pokud má RTC modul vlastní napěťovou doménu.

KM30 RTC modul poskytuje

- Kalendář - hodiny, minuty sekundy
- Dny, Měsíce a Roky
- Přesný 1 sec counter s výstupem pro kalibraci + digitální kalibraci
- Programovatelný alarm interrupt
- Temper detection
- Nízkou spotřebu, nezávislou časovou doménu

1.6.4. Displej – LCD controller

Plně konfigurovatelný LCD controller umožňuje flexibilní využití všech pinů MCU. Důležité je, aby umožňoval variabilní nastavení počtu použitých frontplane versus backplane dle použitého LCD displeje.

KM30

- Až 63 front plane
- Až 8 backplane
- Interní nábojové pumpy

2. SMART GRID

Původní myšlenka automatických odečetů počítadel měřičů elektrické energie – Automatic Meter Reading AMR vedla ke snaze o vybudování komunikačních kanálů mezi elektroměry a datovými centry dodavatelů energie. Technologie těchto přenosů je dodnes stále málo známá a standardizovaná. Celá síť je heterogenní, tedy od transformátoru nízkého napětí k elektroměrům – takzvaná poslední míle - se komunikuje po napájecích drátech (Power Line Communication PLC), nebo bezdrátově. V bodu transformátoru bývá umístěn data koncentrátor, který řídí komunikaci k jednotlivým elektroměrům a zajišťuje sběr dat a jejich přeposílání do datových center.

Bezdrátové komunikace se používají nejčastěji v USA (WiMax) a Británii. Další možností je využití GSM, GPRS, tomu se však distributoři snaží často vyhnout, aby vlastnili nezávislou síť a nebyli ratifikováni za přenos dat.

PLC komunikace propagují především dodavatelé elektrické energie z Itálie (Enel), Španělska (Iberdrola) a Francie (EDF).

Historicky nejvyšší nasazení AMR technologie dosáhl Enel s použitím PLC modemů od ST a Echelon. Technologie však není vyzrálá, uvádí se dosažitelnost komunikačních bodů 90%. Také komunikační rychlost FSK technologie je nízká 1200bps.

Mnoho subjektů se pokouší navrhnout vlastní standart pro PLC a prosadit jej – G3, Prime, Open Meter. Zájemem je využití technologií s vyšší komunikační rychlostí než nabízejí jednoduché modulace a většina standardů se opírá o Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) modulaci, které se již používají v rádiové komunikaci GSM, její vlastnosti jsou známé a výpočetní náročnost není vysoká.

Jakmile je vybudována komunikační síť, rozšiřují se možnosti jejího využití. Je možno získat více údajů o chování spotřebitele, jeho profilů spotřeby, ale také pokusů o ovlivňování měřiče a měření nebo také provozování předplacených tarifů. Tyto informace mohou být použity pro lepší balancování přenosové soustavy jednak marketingovými nástroji a pokročilým způsobem tarifkace, ale také automatickým řízením velkých zátěží jako jsou topení, klimatizace a do budoucna taky pravděpodobně dobíjení elektromobilů.

Komunikace se rozšíří směrem od elektroměru ke spotřebičům, které mohou být separátně spínány a měřeny. To nám spolu s informacemi o aktuálním stavu výroby elektrické energie v obnovitelných zdrojích dává lepší možnosti síť regulovat.

Také je možno poskytovat konektivitu ostatním dodavatelům energií nebo vody pro odečet jejich měřičů.

2.1. Požadavky na moderní PLC komunikace

- Datový tok > 32kbps
- Latence zprávy < 100mS v obou směrech
- Nízká spotřeba především v modu příjmu
- Plug and play technologie – discovering
- Možnosti dálkového upgrade firmware
- Pokrytí musí být větší než 95%
- Musí fungovat ve tří-fázových systémech
- Diagnostika, link layer status a QoS
- Bezpečnost

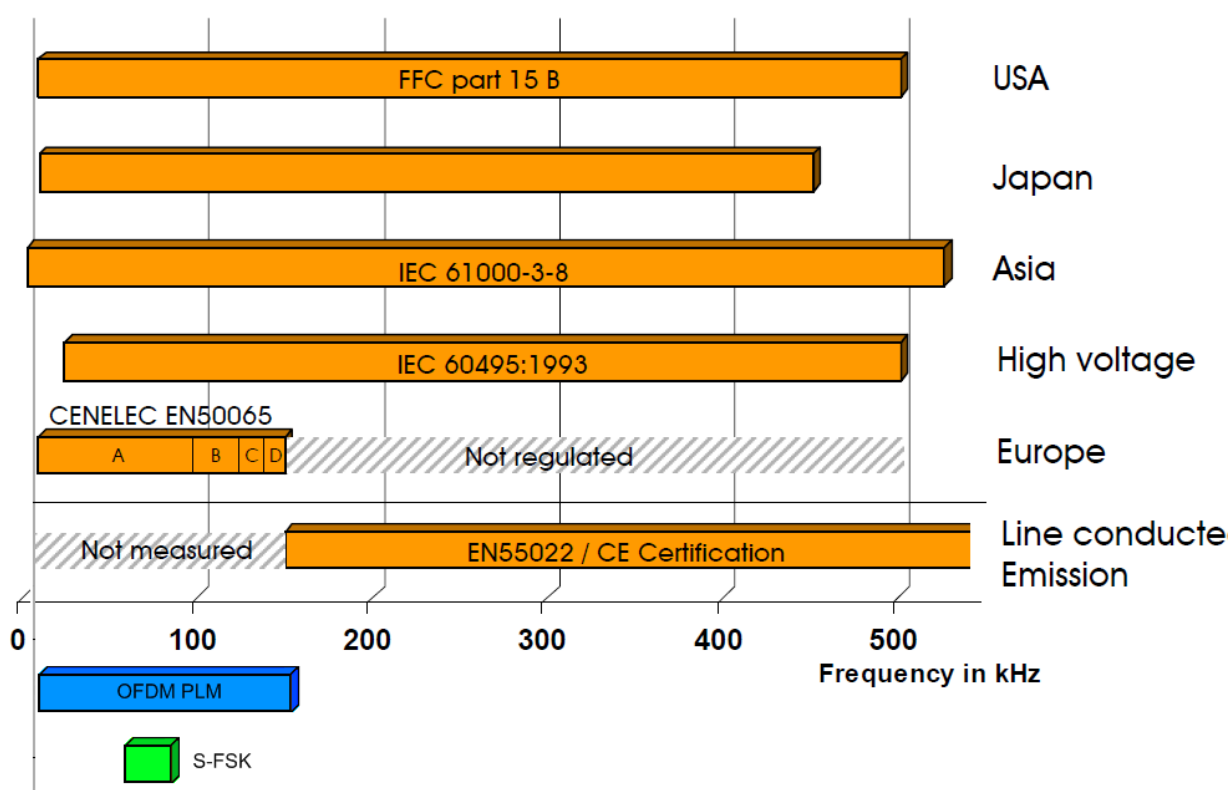
2.2. Použitelná frekvenční pásma

Rozsah frekvenčních pásem použitelných v PLC regulují různé normy v jednotlivých zemích. Zatímco v USA se využívá komunikace v pásmu 100kHz až 500kHz FCC part b, v Evropě reguluje frekvenční pásma norma CENELEC.

Ta vymezuje frekvenční pásmo 9kHz až 150kHz pro PLC komunikace a rozděluje ho na 4 pod-pásma, ve kterých definuje využití a úrovně užitečného signálu a rušení.

- Pásmo A 9-95kHz je rezervováno pro poskytovatele elektrické energie pro komunikaci mezi elektroměrem a koncentrátorem

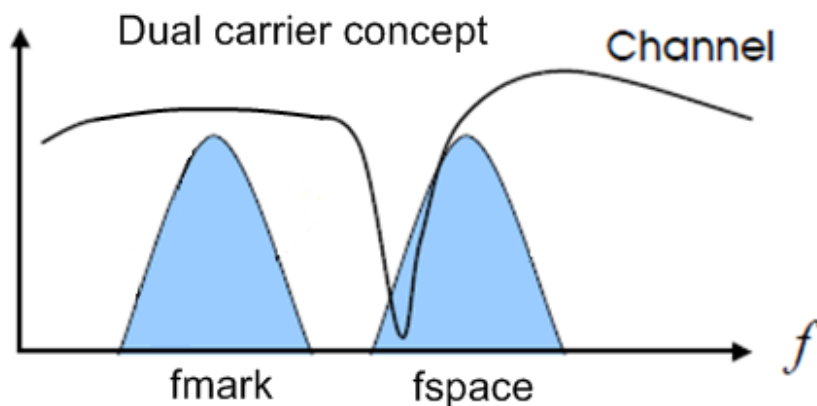
- Pásmo B 95kHz-125kHz je vyhrazeno pro spotřebitele bez řízení přístupu. Je určeno pro komunikace mezi elektroměrem a spotřebiči, směrem do domu
- Pásmo C 125kHz -140kHz je stejné jako pásmo B, ale má stanovenou kontrolu přístupu MAC
- Pásmo D 145kHz – 148.5kHz je vyhrazeno pro spotřebitele pro speciální použití



FSK modulace používá pouze jednu nosnou a je tedy snadno zarušitelná zdrojem rušení s podobnou frekvencí. Proto byla opuštěna a jako následník byl navržen PLM a S-FSK modulace.

Spread - Shift Frekvency Keying S-FSK má rozdíl nosných frekvencí minimálně 10kHz a má tedy zvyšovat odolnost proti zarušení frekvenčně blízkým rušením. Naopak to však přináší problémy při příjmu, jelikož nelze obnovit frekvenci nosné a využít koherentní demodulace. Často je taky jedna z frekvencí natolik

zaručena, že se příjem rozpadá na ASK demulaci jedné nosné. Tento způsob modulace tedy rovněž není příliš robustní.



PLAN navíc nspecifikuje žádné opravné mechanismy Forward Error Correction FEC, nepoužívá scrambling ani interleaving.

PLAN je master-slave orientovaný protokol a neumožňuje slave komunikačnímu bodu – typicky elektroměru – zahájit komunikaci, například pro vyhlášení alarmu při snaze o odpojení přístroje.

Pro lepší dostupnost všech uzlů PLAN zavádí funkce repeateru, kterou plní všechny uzly, které přijmou zprávy, a nejsou uzlem cílovým.

Tyto vlastnosti vylepšuje PLAN+ standard, který definuje funkce „Real Time Alarming“,

Původní PLAN definoval, že každý komunikační uzel, který není příjemce paketu provede „Repeat“, což vedlo k problémům s fázovými synchronizacemi a vedlo občas k úplnému vymazání signálu nebo naopak k jejich zesílení a přeslechům na sítích. PLAN+ definuje „repeater call“ funkci, která určuje, který uzel bude fungovat jako repeater.

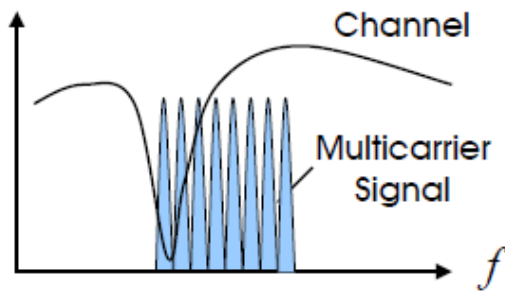
PLAN+ také opravuje některé chyby v registracích nových uzlů.

Výhodou S-FSK je, že neklade vysoké nároky na výpočetní výkon ani složitost hardware modemu.

2.3.1. PRIME, G3, FlexOFDM

PRIME, G3, FlexOFDM protokoly využívají mnohem složitější a pokročilejší OFDM modulaci. Ta rozděluje komunikační frekvenční pásmo do až 96 sub-nosných. Jednotlivé nosné jsou od sebe vzdáleny tak, aby se navzájem nerušily svými harmonickými artefakty.

OFDM je proto mnohem odolnější proti selektivnímu rušení nebo útlumu.



Všechny protokoly definují svá frekvenční pásma a typy modulací jednotlivých nosných dle tabulky níže. Konkrétní počet nosných, typ modulace nebo FEC určují vyšší komunikační vrstvy na základě požadavků na rychlost a spolehlivost komunikace.

Základní rozdíly mezi PRIME a G3 v použitém FEC. Standart G3 používá Reed Solomon kódování paketu a kroučící kódy v ROBO módu. A právě dekódování konvolučních kódů pomocí Viterbi algoritmů je velmi výpočetně náročná operace, většinou vyžadující hw. akcelerátory.

Další důležitou částí pro zvýšení odolnosti proti impulsnímu rušení a selektivnímu útlumu pásma je technika interleaving, která rozprostře související informace v čase a frekvenci a následně mohou být chybějící informace obnoveny pomocí FEC.

Standart G3 také počítá se zpětnou kompatibilitou s S-FSK modemy a proto definuje ve frekvenčním pásmu S-FSK modemu tak zvaný „notch“.

Proto je OFDM komunikace více robustní nicméně rovněž vyžaduje vyšší výpočetní výkon a klade vyšší nároky na použitý hw.

Parameter	PRIME	G3	FlexOFDM
Modulation Size	DBPSK / DQPSK/D8PSK	DBPSK / DQPSK/(D8PSK)	DBPSK/DQPSK/D8PSK/ Coherence Modulation
Forward Error Correction	Rate ½ Convolutional Code	Outer RS + inner rate ½ convolutional code	Outer RS + inner rate ½ convolutional code
Data Rate (Cenelec-A)	21, 42, 64, 84, 64Kbps (PHY rate w/ coding)	20.36,/34.76/(46) Kbps (with coding)	Scalable up to 128Kbps
Band plan	Continuous 42-89 KHz (defined for LV scenario)	36-91 KHz with tone masking for SFSK	Variable: 3KHz in sub-A band, 12KHz in FCC, 24KHz in A, B, C band Wider sub-band in FCC
ROBO Mode	No	Yes	Yes
Link adaptation	Data only	Data + limited band plan	Data + more band plan
Interleaver	Only 1 symbol over frequency (2 msec)	time and frequency interleaving (Up to 175 msec)	>8ms (PRIME+G3 variation)
MAC	PRIME proprietary	802.15.4	PRIME, 802.15.4, IEC64334, other
Convergence Layer	IEC61334-4-32/IPv4	6LoWPAN/IPv6	any
Application	COSEM/DLMS, IP	COSEM/DLMS, IP	COSEM/DLMS, IP

2.4. Zabezpečení

S tím jak rostou požadavky na využití chytrých sítí a jejich možnosti, musí nutně růst i ochrana a zabezpečení sítí. V sítích se využívají otevřené protokoly a vyšší komunikační vrstvy využívají IP pakety. Akční systémy sítí jsou řízeny pomocí software, který je více napadnutelný než původní mechanické zařízení.

Datová úložiště musí být ochráněna proti nedovolené manipulaci s daty a na opačné straně musí být síť odolná proti vystavení falešných dat. Prvky na síti musí být zabezpečeny proti nahrání falešných kódů nebo jeho debugování. To rovněž souvisí s ochranou intelektuálního vlastnictví zařízení.

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a sensorických technologií
CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz