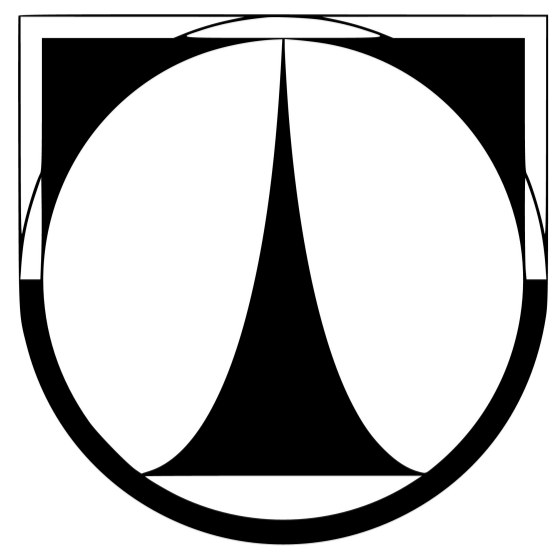


# Vývoj analyzátoru kvality elektrické energie



Bc. Viktor Bubla

Ing. Jan Kraus

Fakulta Mechatroniky

Ústav mechatroniky a technické informatiky



## Abstract

This paper handle software and hardware development of power quality measuring device. Reasons for choosing this subject, motivation and connection with practise is proposed. System of selection of components and circuit solutions are described. Measuring chain from a connection method to sending archives is commented in detail. Also, different ways of configuring and operating methods are documented. In the end, future development and possible improvements are introduced.

## Úvod

Na trhu existuje řada výrobců měřících přístrojů určených k monitorování kvality elektrické energie. Přístroje se dělí do tříd podle přesnosti a veličin, jenž dokáží monitorovat. Mým cílem je realizace analyzátoru v nejvyšší třídě A dle normy EN 50160. Co je pro všechny přístroje této kategorie společné, je jejich vysoká cena.

V mém případě bude použit hotový procesorový embedded modul, zasazený do základní desky, obsahující napájecí zdroj, vstupní měřič, výstupní a komunikační obvody. V přístroji poběží operační systém GNU/Linux, díky čemuž se zásadně zjednoduší a urychlí vývoj firmwaru. Moduly výpočtu analyzovaných dat je možné po úpravách a rozšířeních převzít z existujících přístrojů firmy KMB Systems, s.r.o. Analyzátor by měl být díky tomu cenově dobře konkurenceschopný a již nyní je po něm poptávka.

Mým úkolem je návrh hardwaru a vrstev softwaru nutných pro získávání dat z převodníků, veškeré I/O operace, archivaci dat a ovládání.

## Požadavky na přístroj třídy A

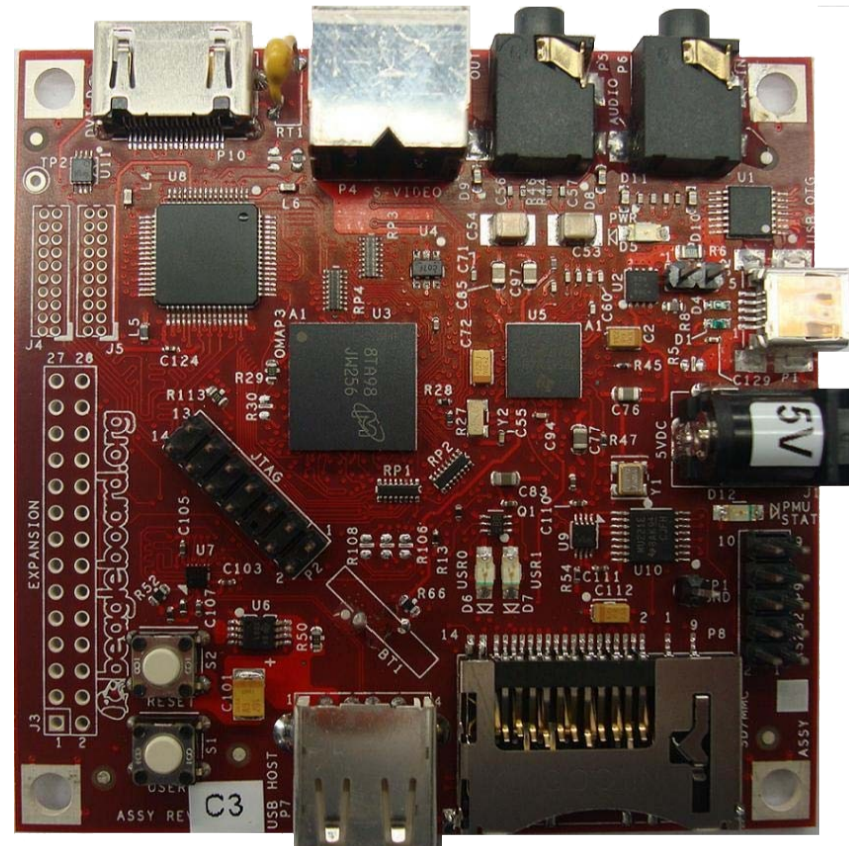
Uvádím některé z parametrů, které jsou na přístroj kladeny. Na jejich základě jsou vyvířena vhodná hardwarová a softwarová řešení.

- RMS, min a max napětí ve 3 fázích a nulovém vodiči a rychlost změn
- RMS, min a max proud 3 fázemi a nulovým vodičem a rychlost změn
- minimální a maximální frekvence a rychlost změny
- minimální a maximální THD a rychlost změny
- 3-fázový aktivní, jalový a zdánlivý výkon
- fázový posun napětí a proudů
- celkový poměr harmonických
- stejnoseměrné hodnoty, základní a vyšší harmonické do 63. řádu
- reverzní napětí
- stejnoseměrné napětí
- homopolární napětí
- faktor rozvážení
- flicker
- efektivní hodnoty s přesností lepší než 0,2 %
- výkony a účinník s přesností lepší než 0,4 %
- analýza vyšších harmonických s přesností lepší než 0,2 %
- záznam událostí překročení limitů nastavených veličin
- záznam průběhů v časech výpadků a poruch s rozlišením nejméně 128 vzorků na periodu
- zpracování překročených limitů podle uživatelem zvolené boolovské logiky
- kontinuální archivace minimálních a průměrných efektivních hodnot za definované intervaly ve vnitřní paměti přístroje po dobu nejméně 7 dní bez ztráty dat
- zálohované napájení pro zabezpečení nejméně jedné hodiny běhu přístroje v případě výpadku napájení

## Prototypový hardware

Vývoj měřícího přístroje třídy A byl započat na platformě „singleboard“ počítače BeagleBoard (BB). Jedná se o levný otevřený, z USB nebo externího zdroje napájený, vývojový přípravek s řadou integrovaných periférií. Srdcem BB je superskalární procesor OMAP3530 s jádrem ARM Cortex-A8 pracujícím na frekvenci 600 MHz s výkonem 1200 MIPS. K dispozici má 256 kB L2 cache a 256 MB LPDDR RAM připojené technologií PoP (package-on-package). Procesor obsahuje OpenGL 2.0 akcelerační schopný výkonu renderování až 10 milionů polygonů za sekundu. GPP sekunduje DSP pracující na frekvenci 430 MHz, umožňující účinnou akceleraci výpočtů MAC a výpočtů v plovoucí řádové čáře. Na DPS najdeme dále 256 MB NAND Flash, řadič DVI-D využívající k připojení monitoru z rozhraními HDMI konektor, OTG micro USB konektor schopný sloužit jako zdroj napájení a zároveň jako virtuální P2P ethernet, USB 2.0 A host konektor, DC napájecí konektor, audio vstup a výstup řešený klasickými 3,5 mm jack konektory, slot pro paměťovou kartu typu SD nebo SDHC, hřebínky pro JTAG, COM port, rozšiřující slot a rozhraní pro přímé připojení LCD displeje, několik informačních LED, jedno v aplikaci volně využitelné tlačítko a samozřejmě tlačítko resetu. Na rozšiřující piny jsou vyvedeny některé periférie procesoru včetně McBSP a množství GPIO. Právě pomocí McBSP jsou připojeny měřiči AD převodníků.

Pro měření napětí a proudů je využit plošný spoj z měřícího přístroje SMP firmy KMB Systems, s.r.o. Osmikanalový šestnáctibitový převodník je připojen k základní desce pouze několika signály rozhraní McBSP. Do cesty je vložen převodník úrovně mezi 1,8 V logikou OMAPu a 3,3 V signály ADC. Převodníky umožňují synchronní samplování všech kanálů a sériové cyklické čtení. Chovají se jako master zařízení a vzorkovací frekvence, podle které se mění i komunikační rychlost, je dána signálem z PLL závěsu procesoru, který sleduje a koriguje výkyvy frekvence v síti.



Obrázek 1. Vývojová deska BeagleBoard s procesorem OMAP3530.

## Použitý software

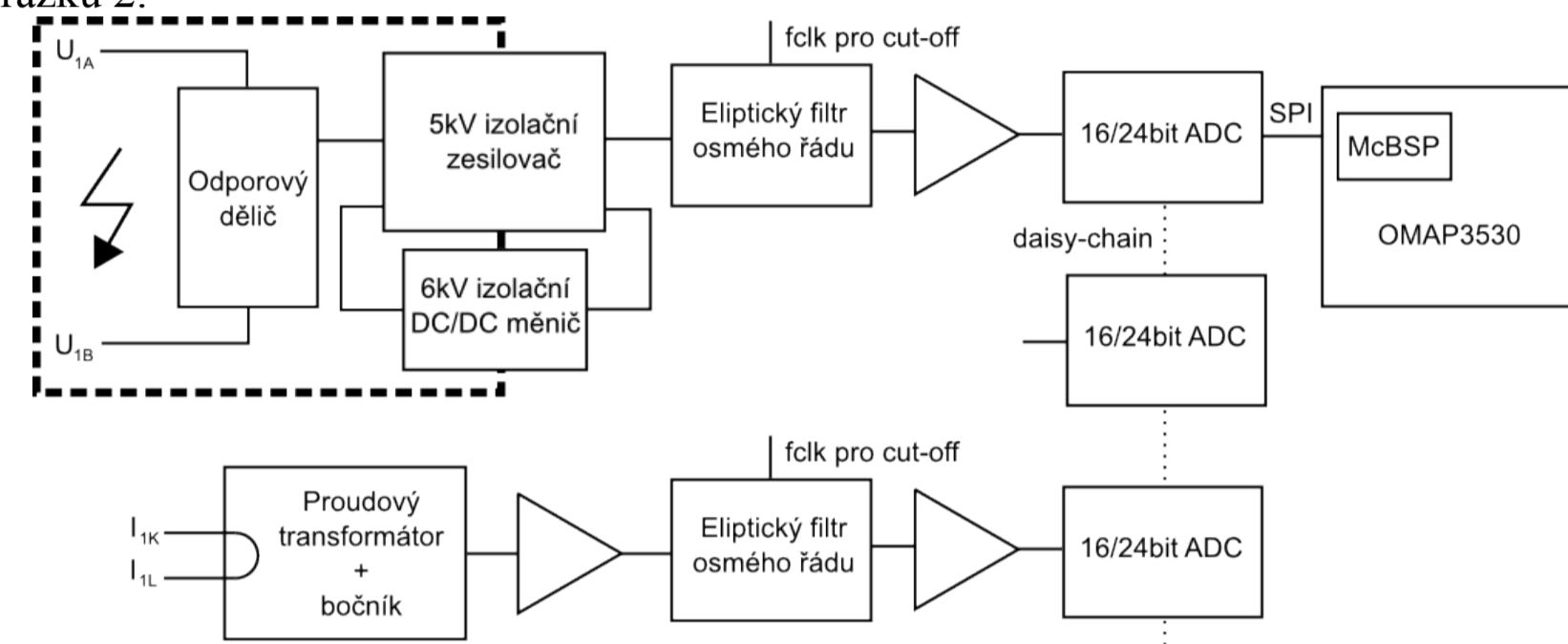
Na SDHC kartu prototypu je nainstalována linuxová distribuce Ubuntu pro ARM s minimalistickým grafickým prostředím fluxbox. Po připojení externího monitoru pomocí DVI, USB hubu, klávesnice a myši je možné s BB pracovat jako s desktopovým počítačem. Pomocí správce balíčků (synaptic, aptitude, apt-get) a repozitářů volného softwaru, udržované firmou Canonical a komunitou vývojářů/uživateli, je možné, za předpokladu připojení k internetu, instalovat téměř jakýkoli software, který je dostupný pro běžnou distribuci, určenou pro platformu x86.

Připojení k síti, potažmo internetu, je možné řešit pomocí emulace ethernetu přes USB OTG, pomocí virtuální sítě přes BT, pomocí WiFi modulu do USB a nakonec, což se dle očekávání ukázalo být nejspolehlivějším řešením, pomocí ethernetového adaptéru do USB. Zde se markantně projevil obrovská výhoda operačních systémů založených na linuxovém jádře, protože veškerá zařízení bez problému pracovala okamžitě po připojení bez nutnosti shánění a instalace ovladačů. Bylo pouze nutné neopomenout potřebné moduly při kompilaci jádra. V případě použití distribučního jádra by odpadla i tato nutnost, avšak pro naše účely by jádro obsahovalo zbytečně mnoho modulů, jenž by se nikdy nevyužily a jednak bylo nutné do kompilace zahrnout zdrojové soubory pro čtení dat z ADC.

Využívá se řada serverových démonů pro přístup přes SSH, VNC, NFS nebo běh známé trojice Apache, MySQL, PHP. Nejdůležitější je však modul umožňující pomocí DMA vyčíst data z AD převodníků a plnit jimi kruhové buffery v paměti. Data jsou dále zpracovávána výpočetním modulem, který zároveň předává naměřené hodnoty k archivaci, odesílání nadřazenému systému nebo k zobrazení.

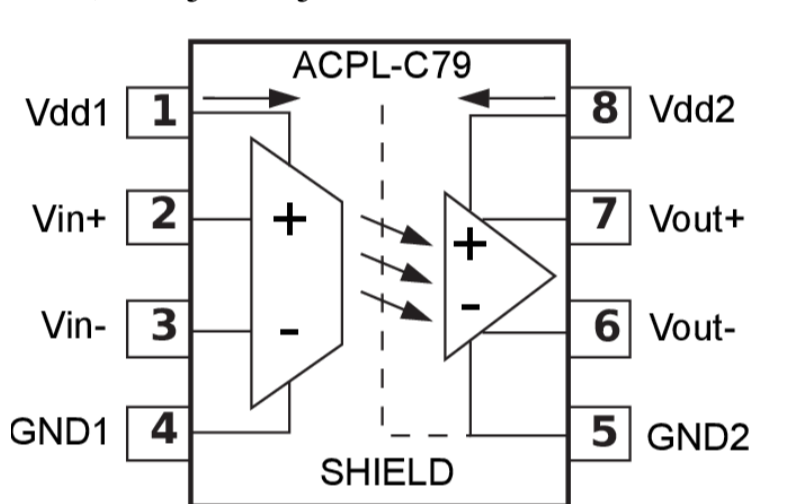
## Měřicí řetězec

Nejkritičtější fyzickou částí analyzátoru kvality elektrické energie jsou vstupní obvody. Musí splňovat několik základních požadavků. Musí izolovat měřené napětí a proudy mezi sebou, vůči nulovému a ochrannému vodiči i vůči digitálním obvodům v přístroji, umožňovat diferenciální měření napětí ve čtyřech na sobě nezávislých kanálech, být maximálně lineární a dlouhodobě stabilní, s minimálním fázovým zpožděním a teplotní závislostí. Na základě požadavků jsem navrhl využít lineární izolační zesilovače, integrované izolující měniče pro napětěvé kanály a precizní proudové transformátory pro kanály proudové. Na místě antialiasing filtru bude použit integrovaný eliptický filtr osmého řádu využívající spínané kondenzátory a umožňující přeladění zlomové frekvence. ADC převodníky budou komunikovat přes SPI v daisy-chain konfiguraci. Blokové schéma je na obrázku 2.



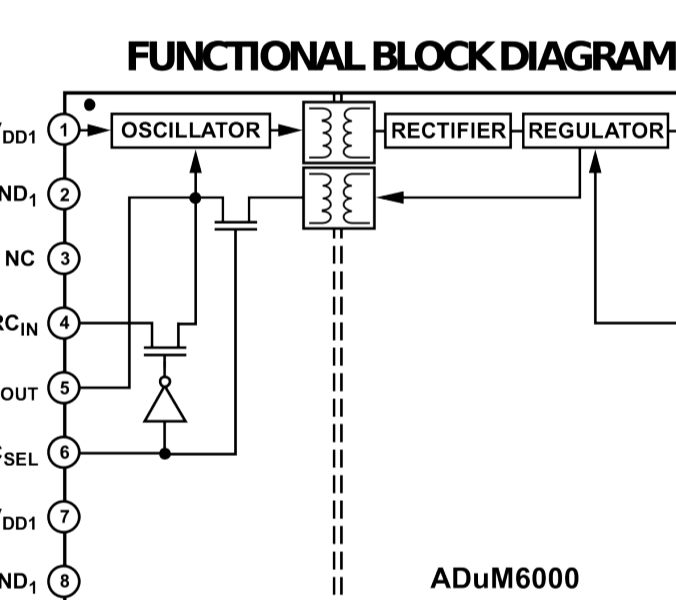
Obrázek 2. Blokové schéma jednoho napětěvého a jednoho proudového vstupního obvodu.

Měřené napětí se přivádí na konektor s roztečí 7,62 mm, což je minimální standardní rozteč splňující požadované izolační vlastnosti pro měření v síti nízkého napětí. Vstupy jsou plně diferenciální. Měřené napětí je děličem, složeným ze šesti přesných SMD rezistorů v pouzdru I206, sníženo tak, aby při 20 % přetížení byl právě plně využit lineární rozsah precizního izolačního zesilovače ACPL-C79, tedy 400 mVpp. Před izolátorem je zapojen jednoduchý integrační členek pro potlačení vlivu vstupního vzorkovacího obvodu se spínanými kondenzátory a antiparalelní kombinace křemíkových diod, sloužících jako ochrana obvodu proti impulzům v síti. Následující obvody jsou vůči přepětí chráněna izolátorem až do napětí 5kVrms, trvajícím jednu minutu.



Obrázek 3. Znázornění funkce izolačního zesilovače ACPL-C79 firmy Avago technologies.

Obvod ACPL-C79 od firmy Avago Technologies, jehož blokové schéma je na obrázku 3, potřebuje ke své činnosti dvě oddělená napájecí napětí. K tomu jsou využity obvody ADuM6000 od firmy Analog Devices. Jedná se o spínané zdroje, integrované do pouzdra SOIC16, využívající technologii iCoupler. Vnitřní zapojení obvodu je na obrázku 4. Ke své činnosti potřebuje pouze vstupní napájecí napětí 5 V, několik blokovacích kondenzátorů a nastavení požadovaného výstupního napětí. Může dodávat až 400 mW do zátěže, kterou vůči oddělené straně izoluje podobně jako ACPL-C79 až do 5 kVrms po dobu jedné minuty.

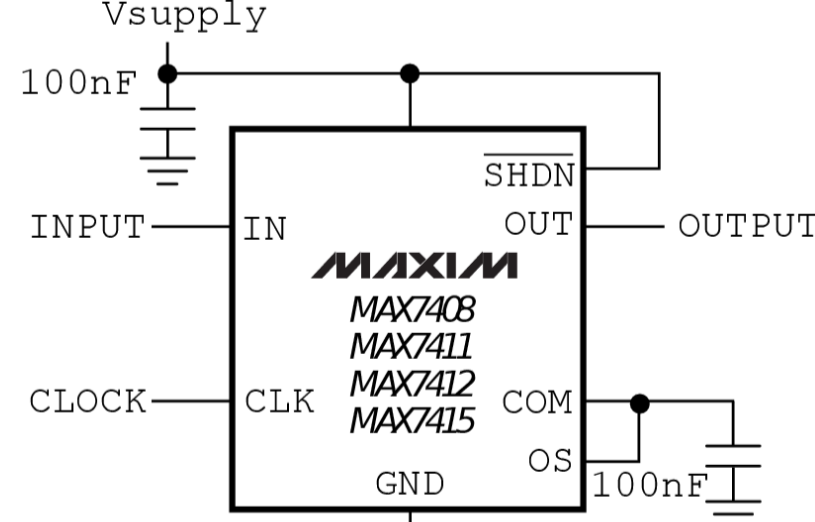


Obrázek 4. Vnitřní zapojení izolačního DC/DC měniče ADuM6000.

Za izolačním zesilovačem, který má pevně dané zesílení x8, následuje diferenciální zesilovač, který nyní již single-ended signál zároveň posouvá a polovinu napájecího napětí, tedy 2,5 V. Rozkmit signálu je zde při 20 % přetížení 3,2 Vpp. Na místě operačních zesilovačů jsou použity precizní obvody AD8544. Signál pokračuje do antialiasing filtru, realizovaného obvodem MAX7408, respektive MAX293, což je integrovaný přeladitelný eliptický filtr osmého řádu, využívající integrované spínané kondenzátory. Na obrázku 5 je funkční zapojení obvodu MAX7408, což je varianta s filtrem pouze pátého řádu. Pomocí externího hodinového signálu je možná volba cut-off frekvence filtru, která odpovídá jedné setině frekvence hodin. Při požadované cut-off frekvenci 10 kHz je tedy potřeba externí signál 1 MHz. Ten je získán klasickým časovačem 555, který je však třeba volit v CMOS provedení, protože bipolární provedení při těchto frekvencích již nemusí správně pracovat.

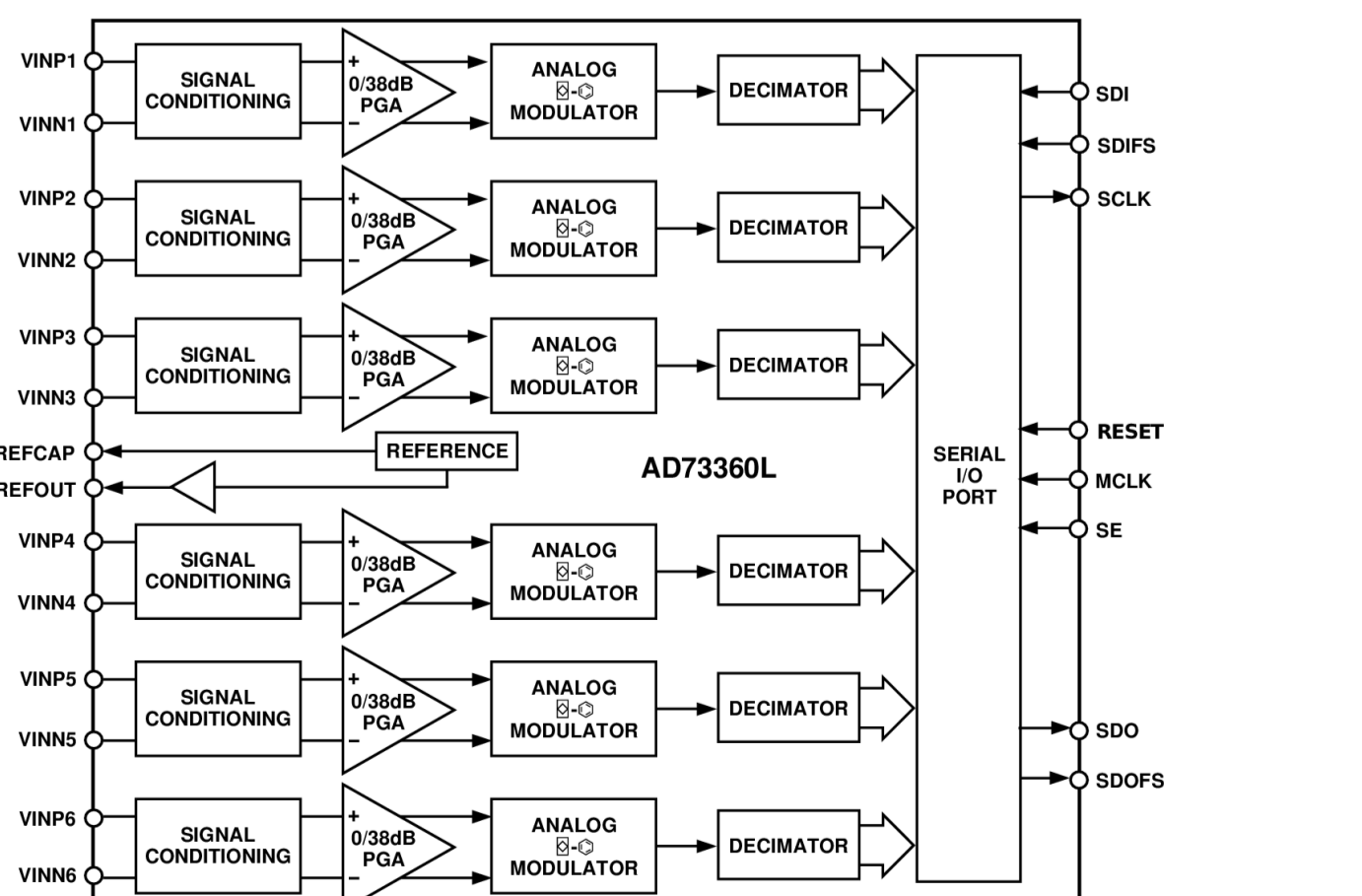
Vybrané parametry filtru MAX293:

- řeladitelnost  $f_c$  (cut-off frekvence) 0,1 Hz až 25 kHz
- teplotní závislost  $f_c$  8 ppm/°C
- zvlněn v propustném pásmu 0,15 dB
- útlum v závěrném pásmu -80 dB od 1,5 násobku  $f_c$
- THD -71 dB



Obrázek 5. Základní funkční schéma zapojení filtru MAX7408.

Po průchodu filtrem je signál přiváděn na vstup ADC. Jako zdroj referenčních napětí pro ADC a offset diferenciálního zesilovače za izolátorem je použita precizní napětěvé reference AD127. Jedná se o sériovou napětěvou referenci s výstupním napětím 1,25 V a teplotním koeficientem 3 ppm/°C v šestipinovém pouzdru TSOT. Potřebná napětí jsou získána vynásobením pomocí OZ zapojeného s integračním článkem na výstupu pro snížení šumu.

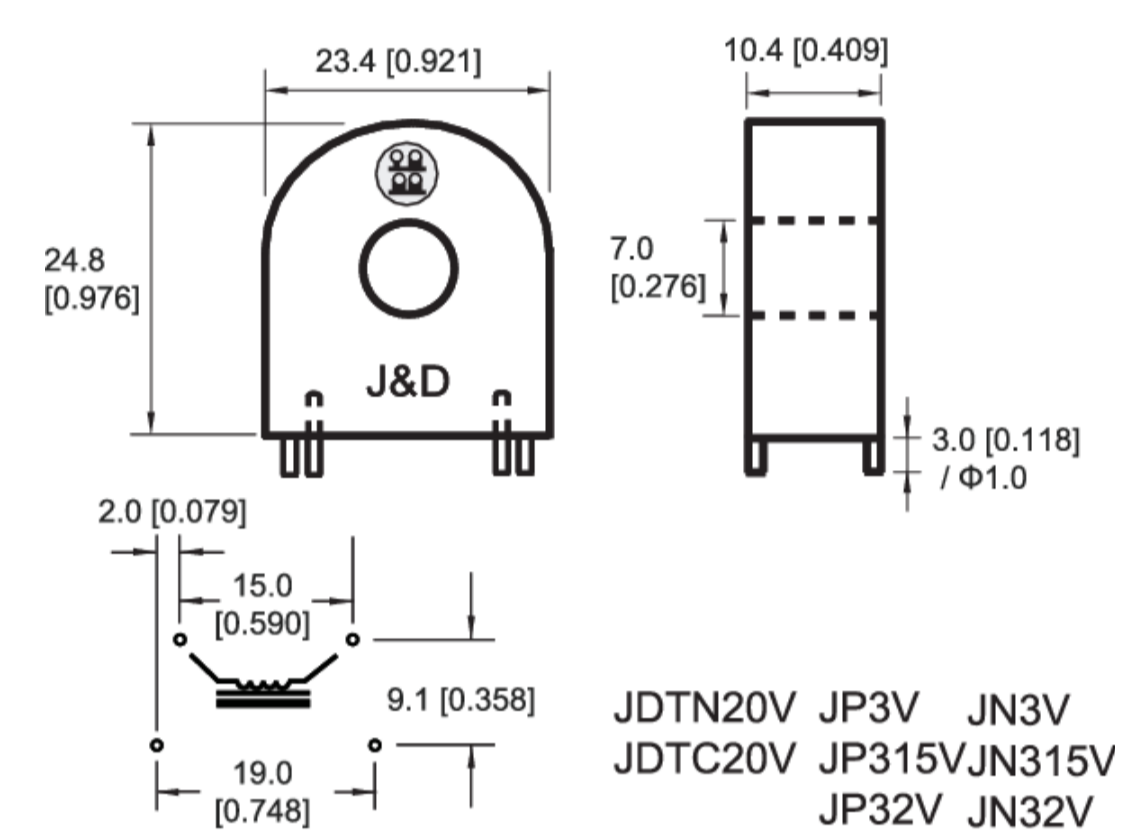


Obrázek 6. Vnitřní blokové schéma AD převodníku AD73360L.

Na prototypu použitý AD převodník je typu AD73360L od Analog Devices. Jedná se o šestikanalový diferenciální šestnáctibitový sigma-delta převodník se vstupními PGA a SPI komunikací v pouzdrě SOIC28. Jeho vnitřní blokové schéma je na obrázku 6. Důležité parametry:

- programovatelná vstupní frekvence vzorkování
- kontinuální vzorkování
- zisk PGA 0 dB až 38 dB v 6 dB krocích
- 76 dB SNR
- až 64 kS/s

Proudové vstupní obvody se liší pouze v prvním části měřícího řetězce. Podle proudového rozsahu se využívá připojení přes speciální násuvné proudové konektory se šroubovacími protikusy, nebo princip průvlekových transformátorů vyčnívajících z krabičky přístroje. V později zmíněné variantě je možné měřit proud v určitých rozsazích v řádu až desítek ampér přímo, bez nutnosti použití externích proudových transformátorů. Na pozici měřících transformátorů jsou použity přesné elektromagnetové průvlekové typy JN3V od firmy J&D. Na obrázku 7 je výkres mechanického provedení. V použité vývodové variantě se transformátory pají do DPS jako běžné THT součástky. Zvolený typ vyniká nízkou fázovou chybou 0,17°. Převodový poměr je 1:2500. Doporučený odpor bočnicku 138 ohmů.



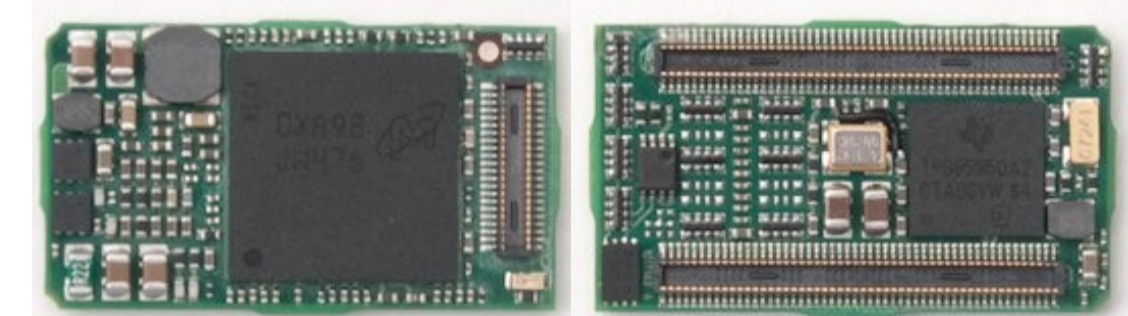
Obrázek 7. Výkres proudového transformátoru JN3V od firmy J&D.

Napětěový úbytek na bočnicku je posunut na referenční napětí 2,5 V, filtrován dolní propustí prvního řádu a zesílen operačním zesilovačem AD8544 na úroveň, která při 25 % přetížení daného rozsahu přesně odpovídá signálu za diferenciálním zesilovačem u napětěvých vstupu. Řetězec se tedy dále nijak neší.

Měřená data z AD převodníků jsou procesorem OMAP přes SPI/McBSP kontinuálně stahována s využitím DMA do bufferů v operační paměti. Zde se provádí zarovnávání dat, které je nutné z důvodu nedeterministického spuštění přenosu dat z ADC. Po naplnění první části kruhového bufferu jsou data využita pouze pro zjištění zarovnání měřených kanálů v proudu dat. Naštěstí je toto pořadí až do resetu převodníků neměnné. Správně zarovnaná data jsou dělena do menších bufferů odpovídajících přesně daným intervalům v reálném čase a zpracovávána výpočetním modulem, jehož výstupem jsou již přímo měřené veličiny, které se archivují a/nebo zobrazují.

## Volba hardwarového provedení

Vývoj přístroje je nyní ve fázi hledání optimálního mechanického provedení, krabičky, procesorového modulu, řešení základní desky, zdroje, způsobu připojení, zálohování, volby non-volatilní paměti pro archivy atd. Nejzásadnějším volbou je použití procesorového modulu. Na trhu je poměrně široký výběr těchto komponent založených na nejmodernějších platformách. Jmenujme například v poslední době velice populární Nvidia Tegra. Vzhledem ke zkušenostem, připravenému driveru pro ADC a dostupnému zámezi však volba platformy zůstává u procesoru OMAP3530. Tento čip integruje do několika SOM (System On Module) například firma LOGIC PD. Nabízí moduly SOM-LV s osazenými ethernetem, až 512 MB RAM, WiFi, BT, USB2.0, LCD řadičem pro rozlišení až 1024x768x24 bitů a mnoha dalšími perifériemi. To vše se podařilo vtěsnat na destičku o rozměrech 31,2x76,5x7,4 mm. Pro ještě miniaturnější měřící přístroj však nabízí ještě extrémnější variantu – SOM TORPEDO, který může mít také až 512 MB RAM, stejný procesor OMAP3530 na frekvenci 600 Mhz, chybí však WiFi, BT a několik dalších prostorově náročných periférií. Menší varianta s rozměry 15x27x3,8mm byla ideální volbou pro přenosné a bateriově napájené varianty analyzátoru. Na obrázku 8 je fotografie menšího modulu.



Obrázek 8. Embedded modul TORPEDO SOM od LOGIC PD. Horní strana a spodní strana s konektory do základní desky.

## Komunikace, ovládání

Zásadní funkcí analyzátoru kvality elektrické energie je schopnost dlouhodobého měření, archivace a možnost stahování dat do PC k dalšímu zpracování. Měřené veličiny se podle nastavení ukládají do cache a poté na disk (SD kartu) v nastavitelném intervalu 200 ms až několika hodin. Kromě toho jsou zaznamenávány všechny výpadky, překročení nastavených mezí, chyby, změny nastavení, události... K ukládání jsou využívány .cea soubory, které se mohou snadno po síti stahovat a zpracovávat v softwaru ENVIS firmy KMB Systems, s.r.o. Zároveň je možné s přístrojem přímo komunikovat pomocí speciálního protokolu, používaného pro komunikaci s existujícími přístroji. Jedná se o běžné TCP spojení. K ovládání, kalibraci a čtení aktuálních dat slouží software ENVIS.Daq.

## Závěr

Výpočetní modul, vzorkování napětí a proudů i komunikace je v podstatě již nyní schopna kontinuálního monitorování kvality elektrické energie. Zatím však parametry nevyhovují třídě A, protože jsou použity AD převodníky s nižší vzorkovací frekvencí a nevhodnými antialiasing filtry. Po vyrobení prvního prototypu na cílovém hardwaru s využitím navržených vstupních obvodů, přijde na řadu doplnění těchto vlastností, vyřešení kalibrace a důkladné proměření přesnosti, stability a spolehlivosti přístroje. V další fázi přijde na řadu vytváření dotykového LCD displeje a vytváření GUI. Nakonec bude nutné vytvořit výrobní dokumentaci, manuály a nechat přístroj otestovat ve zkušebně.

## Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval kolegovi Bc. Petru Cvekovi za konzultace při řešení problémů souvisejících s překladem linuxového jádra a za spolupráci na vytváření driveru pro ADC. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanu Soprovi za mnohé konzultace související s hardwarem.

## Reference

- ČSN EN 61000-4-30 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřící technika – Metody měření kvality energie, 2004.
- ČSN EN 50160 ED2 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 2008.
- Podpora obvodu MAX293 [online]. <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp?id/1443>
- Podpora obvodu ACPL-C79 [online]. [http://www.analog.com/pages/en/optocouplers\\_plastic\\_miniature\\_isolation\\_amplifier/acpl-c79/](http://www.analog.com/pages/en/optocouplers_plastic_miniature_isolation_amplifier/acpl-c79/)
- Podpora obvodu ADuM6000 [online]. <http://www.analog.com/en/interface/digital-isolators/adum6000/products/product.html>
- Podpora obvodu AD73360L [online]. <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad73360l/products/product.html>
- Katalog proudových transformátorů J&D [online]. <http://www.hqsensing.com/pdf/Current%20transformer.pdf>
- System On Module LOGIC PD [online]. <http://www.logicpd.com/products/system-modules>
- The Linux Documentation Project [online]. <http://ltp.org/guides.html>
- Dokumentace k měřícím přístrojům a aplikaci ENVIS [online]. <http://www.kmb.cz/>

## Kontakt

Bc. Viktor Bubla  
bublaviktor@seznam.cz