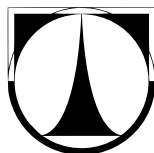


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2012

Viktor Bubla

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 Automatické řízení a inženýrská informatika

Návrh analyzátoru kvality elektrické
energie třídy A pro platformu ARM

*Development of class A power quality
analyzer on ARM platform*

Diplomová práce

Autor:

Bc. Viktor Bubla

Vedoucí práce:

Ing. Jan Kraus, Ph.D.

Konzultant:

Ing. Tomáš Tobiška

V Liberci 14.5.2012

Originál zadání

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména svým kolegům z vývoje firmy KMB systems, s.r.o.[21], se kterými je obvykle radost spolupracovat a vždy pomohou s radou nebo nápadem, jak vyřešit ten či onen problém.

Ing. Milanu Soprovi bych chtěl poděkovat za jeho cenné rady během návrhu schemat, routování desek plošných spojů i návrhu mechanického řešení a způsobu montáže vyvíjených přístrojů.

Konzultantu Ing. Tomáši Tobiškovi bych chtěl pro změnu učinit hlubokou poklonu pro jeho neuvěřitelnou schopnost orientace v kódu firmwaru všech vyráběných přístrojů, jeho schopnost rychlého a efektivního odstraňování chyb a poděkovat mu za podporu při prosazování některých nepopulárních rozhodnutí týkajících se hardwaru.

Vedoucímu práce Ing. Janu Krausovi, Ph.D. bych chtěl poděkovat za podporu a rady během psaní této práce a za to, že mi umožnil zúčastnit se dvou mezinárodních veletrhů, kde jsem se mohl seznámit s nabídkou konkurence a načerpat inspiraci.

Abstrakt

Práce se zabývá vývojem analyzátoru kvality elektrické energie třídy A definovaného v normě ČSN EN 61000-4-30. V teoretické části je předložen výtah z nejvýznamnějších norem definujících požadavky na analyzátory kvality elektrické energie v jednotlivých třídách a je uveden způsob certifikace společností PSL.

V části věnované implementaci je popsáno rozdělení vývoje analyzátoru do několika etap a srovnání základních parametrů analyzátorů již existujících s analyzátořem SMC 144 vyvinutým v první etapě a budoucím finálním přístrojem.

Podrobně jsou popsány hardwarové komponenty analyzátoru SMC 144, konstrukční provedení, způsoby připojení měřených signálů i možnosti komunikace.

Je rovněž popsána nejnižší vrstva firmwaru přístroje, která se těsně váže na hardware a způsoby dosažení přenositelnosti kódu používáním CMSIS. Jsou vysvětleny kroky inicializace, funkce prováděné v hlavní smyčce programu, přerušení a jednotlivé fáze výpočtů naměřených dat.

V kapitole praktických výsledků jsou srovnány výkony moderních mikrokontrolérů a je zhodnocena přívětivost z pohledu ladění. Jsou uvedeny výsledky měření přesností analyzátoru SMC 144 a způsob, jakým byl analyzátor uveden na trh.

V závěru jsou diskutovány dosažené výsledky práce, budoucnost analyzátoru kvality elektrické energie SMC 144 a zejména budoucí etapy vývoje analyzátoru třídy A.

Klíčová slova: Cortex-M4, kvalita, třída A, analýza sítě, CMSIS

Abstract

This thesis deals with the development of class A power quality analyzer defined in the IEC 61000-4-30 standard. In the theoretical part, there is an extract of the most important standards that define requirements for power quality analyzers in different classes. Also process of certification by PSL company is shown.

In the part devoted to the implementation, the division of the development of the analyzer into several stages is presented and a comparison of basic parameters of the existing analyzers, SMC 144 analyzer developed in the first stage and the future final device is shown.

Hardware components of the developed analyzer, construction, methods of connection of measured signals and also communication capabilities are described in details.

The lowest firmware layer of the device is also described, which is tightly bound to the hardware and methods to achieve code portability using CMSIS are explained. Initialization steps, functions performed in the main program loop, interrupts and phases of calculations of measured data are described.

In the chapter of practical results, the performances of modern microcontrollers and simplicity of debugging are compared. The results of accuracy measurement of SMC 144 analyzer are demonstrated. Also the way the newly developed analyzer was placed to the market is mentioned.

In conclusion, the results of the work, the future of SMC 144 power quality analyzer and especially the future stages of development of the class A analyzer are discussed.

Key words: Cortec-M4, quality, class A, network analysis, CMSIS

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt	5
1 Úvod	10
2 Teoretický úvod	12
2.1 Certifikace a třída A	12
2.2 Norma ČSN EN 50160:2010	12
2.2.1 Průběžné jevy	13
2.2.2 Napět'ové jevy	14
2.3 Norma ČSN EN 61000-4-30:2009	15
2.3.1 Všeobecně	15
2.3.2 Parametry kvality energie	18
2.4 Norma ČSN EN 61000-4-7:2009	22
2.4.1 Definice	23
2.4.2 Všeobecně	24
2.4.3 Následné zpracování	27
3 Implementace	29
3.1 Etapy vývoje	29
3.2 Srovnání přístrojů	29
3.3 Hardware SMC 144	30
3.3.1 Konstrukční provedení	30
3.3.2 Připojení k měřené síti	32
3.3.3 Připojení periférií a komunikace	32
3.3.4 Napájení	34
3.3.5 Vstupní obvody, filtry	35
3.3.6 Rozšiřující slot	37
3.3.7 AD převodníky	38
3.3.8 Mikrokontrolér	38
3.3.9 Paměti	43
3.3.10 Periferie	43
3.3.11 DPS	44
3.4 Software	45
3.4.1 Inicializace HW	46
3.4.2 Hlavní smyčka	47

3.4.3	Přerušení	47
3.4.4	Výpočty	48
3.4.5	Archivace	49
3.4.6	Komunikace	49
4	Praktické výsledky	51
4.1	Zkušenosti s MCU	51
4.2	Testy stability měření	51
4.3	Přesnosti	52
4.4	Uvedení SMC 144 na trh	56
	Závěry a doporučení	58
	Použitá literatura a prameny	62
	Nomenklatura	64

Seznam obrázků

1	Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_N ve veřejných distribučních sítích nn.	14
2	Měřicí řetězec. Tato práce se zejména věnuje označené části.	16
3	Synchronizace agregačních intervalů pro třídu A.	17
4	Synchronizace agregačních intervalů pro třídu S.	17
5	Struktura měřicího přístroje z pohledu měření harmonických a meziharmonických.	25
6	Znázornění skupin harmonických a meziharmonických.	27
7	Realizace digitálního filtru dolní propusti.	27
8	Znázornění podskupiny harmonické a vycentrované podskupiny meziharmonických.	28
9	Analyzátory kvality elektrické energie.	30
10	Připojení SMC 144 revize 0 k měřené síti.	33
11	Připojení SMC 144 revize 1 k měřené síti.	33
12	Příklad připojení V/V SMC 144 revize 1.	34
13	Schema spínaného zdroje SMC 144.	34
14	Vstupní filtry.	36
15	Další důležité obvody.	37
16	Spojení zesilovače THS4521 a AD převodníku ADS1278.	39
17	Zapojení MCU v přístroji SMC 144 revize 1.	40
18	Fotografie DPS přístroje SMC 144 revize 0.	44
19	Výkon a velikost kódu pro různé řady MCU.	52
20	Grafy chyb měření U a I a meze pro třídu S.	53
21	Grafy chyb měření P a Q a meze pro třídu S.	54
22	Přenos harmonických napětí a proudů vstupními obvody.	55
23	Objednací schema přístroje SMC 144.	57

1 Úvod

Účelem práce, které se věnuji v posledních několika letech a budu v ní i nadále pokračovat, je postupný vývoj analyzátoru kvality elektrické energie v tak zvané třídě A.

Analyzátor kvality elektrické energie je obecně zařízení schopné sledovat charakteristiky dodávky elektrické energie nn, vn nebo vvn definované normou ČSN EN 50160[24]. Způsoby, jakými jsou charakteristiky měřeny, vyhodnocovány a zaznamenávány, jsou specifikovány v normách ČSN EN 61000-4-30[22], ČSN EN 61000-4-7[23] a ČSN EN 61000-4-15[25]. Normy definují tři třídy analyzátorů kvality elektrické energie A, S a B. Liší se ve způsobu vyhodnocování měřených veličin i v přenostech, se kterými je musí být schopny určit.

Tato problematika je široce obsáhlá a není záležitostí práce na několik dní. Důkladem toho je fakt, že i v dnešní době existuje na světě stále pouze velice malé množství analyzátorů kvality splňujících všechny požadavky s certifikátem vydaným společností PSL a téměř ve všech případech se jedná o obrovské mezinárodní společnosti jako je Fluke, Siemens apod.

Nejedná se pouze o návrh speciálního hardwaru nebo naopak o vytvoření firmwaru s danými algoritmy. Jde o společný paralelní vývoj HW a SW tak, aby byly ve výsledku dosaženy stanovené cíle s optimalizovaným využitím hardwaru a tím i cenou přístroje. Nejde pouze o vytvoření analyzátoru třídy A. Jde o to, aby vzniklý přístroj byl funkčně a cenově konkurenceschopný a aby se mohly brzy vrátit náklady související s jeho vývojem.

V teoretickém úvodu uvedu výtah z nejvýznamnějších norem týkajících se funkčnosti a parametrů, které musí analyzátory různých tříd splňovat. Tyto informace jsou základním vodítkem při stanovování požadavků na hardware měřicích obvodů, přesností AD převodníků, ale i výpočetní a paměťovou kapacitu použitého mikroprocesoru.

Dalším důvodem, proč uvádím výtah z norem je fakt, že je v nich jasně definováno, které parametry sítě a jakým způsobem se musejí vyhodnocovat a archivovat. Jenom díky stoprocentnímu akceptování uvedených norem výrobci síťových analyzátorů můžeme dosáhnout jednoho ze základních principů definice analyzátoru třídy A — totiž že při měření stejného signálu dvěma různými přístroji musíme získat za všech okolností totožná data.

Na začátku kapitoly implementace uvedu, na jakých etapách vývoje jsem se s vedoucím práce dohodl a jaké kroky budou následovat. Srovnám existující analyzátor kvality elektrické energie SMPQ se speciálně navrženým jednoduchým analyzátozem SMC 144, který vznikl ze dvou důvodů. Prvním požadavkem bylo vytvoření levné varianty analyzátoru bez displeje s pokročilými funkcemi a možnostmi komunikace.

Druhým, s touto prací souvisejícím, důvodem bylo vytvoření platformy s moderním výkonným mikrokontrolérem, který by měl podle předběžných odhadů postačit ke konstrukci přístroje třídy A.

Dále v kapitole implementace popíši podrobně hardware a zjednodušeně i software přístroje SMC 144. Ukáži způsob připojení měřených signálů a dalších periférií. Zmíním se o faktu, že první verze desky plošných spojů není ideální a které změny jsou připravovány na první revizi. Budu zde upozorňovat na řešení, která jsou dostatečná pro levný analyzátor, ale ve vyvíjeném finálním přístroji budou muset být řešena jiným způsobem. Vysvětlím důvod, proč je přístroj SMC 144 osaditelný různými mikrokontroléry firmy STMicroelectronics, jaké mezi nimi jsou rozdíly a jaké jsou jejich nejvýznamnější vlastnosti.

V kapitole praktické výsledky zmíním osobní zkušenost s novými řadami MCU z hlediska vývoje, výpočetního výkonu a potenciálu pro budoucí modifikace výpočetních algoritmů. Uvedu výsledky zkoumání přesnosti měření napětí, proudu a výkonů přístroje SMC 144 a přístroj na základě měření zařadím do odpovídající třídy. V závěru kapitoly zmíním způsob, jakým se přístroj SMC 144 poprvé prezentoval na veřejnosti a kteří zákazníci je již používají.

V závěru shrnu obsah práce a dosažené výsledky. Rozepíši se o možnostech využití vytvořeného přístroje a o budoucích etapách vývoje analyzátoru kvality elektrické energie třídy A.

2 Teoretický úvod

2.1 Certifikace a třída A

Následující výtah požadavků z norem, které jsou zásadním vodítkem při návrhu měřicích přístrojů, je nutné bez výjimky splnit, aby přístroj mohl být nejen označován jako analyzátor kvality elektrické energie třídy A, nýbrž aby také, a to je nejpodstatnější, mohl splnit podrobné testy prováděné specializovanými certifikačními společnostmi, jenž mohou certifikát o splnění požadavků na měřicí přístroj třídy A, S nebo B vydat.

Jednou z těchto společností je americká POWER Standard Lab (PSL)[4] sídlící v Kalifornii, která jako jediná na světě nabízí kompletní testování a certifikaci přístrojů třídy A dle mezinárodní normy IEC 61000-4-30. V současné době existuje mnoho přístrojů pyšících se označením třídy A i v České republice. Žádný z nich však nemá certifikát vydaný zmíněnou PSL.

Výrobci často zneužívají označení třídy A jako konkurenční výhodu nebo reklamní trik, když alespoň některé měřené parametry splňují přesnosti nebo algoritmy definované v normě. Analyzátor bez výhrad splňující požadavky třídy A včetně certifikátu vydaného společností PSL dodávají pouze nejvýznamnější světoví výrobci měřicích přístrojů, jako je Fluke [18], Siemens nebo sama společnost PSL.

U některých obrázků a tabulek v této kapitole není explicitně uváděno, že se jedná o ilustrace převzaté z příslušných norem.

2.2 Norma ČSN EN 50160:2010

Norma pojmenovaná *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*[24], jak už název napovídá, definuje charakteristiky napětí, které mají být sledovány a také limitní hodnoty, jenž by měly být dodavatelem elektrické energie dodrženy. Jedná se o evropskou normu vzniklou ze spolupráce CENELEC¹ a CEER². Nahrazuje normu EN 50160:2007, z níž reorganizuje rozdělení událostí a průběžných jevů, upravuje a přidává některé definice a přidává kapitolu týkající se charakteristik v sítích vvn.

V první kapitole je definován rozsah platnosti, ve druhé citované normy a ve třetí kapitole jsou popsány termíny a definice. V následujících třech kapitolách jsou již konkrétními hodnotami a způsoby definovány charakteristiky dodávky elektrické energie a měření s využitím dříve vysvětlených pojmů pro nn, vn a vvn. Způsob vyhodnocování dále okomentuji a budu zmiňovat rozdíly mezi požadavky normy a schopnostmi současných přístrojů.

¹European Committee for Electrotechnical Standardization

²Council of European Energy Regulators

Tabulka 1: Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech pro řady harmonických až do 25.

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3		Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h
Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h	Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.					

2.2.1 Průběžné jevy

Kmitočet sítě Jmenovitý kmitočet napájecího napětí je 50 Hz. Během 99,5 % roku musí být kmitočet v rozsahu 49,5 Hz až 50,5 Hz. Po 100 % času musí být v rozsahu 47 Hz až 52 Hz.

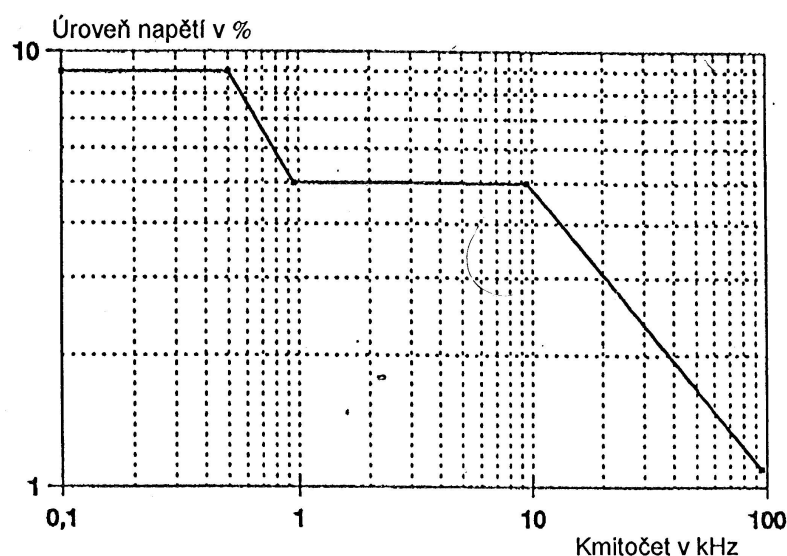
Odchyłky napájecího napětí Za normálních provozních podmínek nemá odchylka od jmenovitého napětí přesáhnout +10 % / -15 %. Jedná se o průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v intervalech 10 minut. V 95 % času nemá přesáhnout odchylku ± 10 %.

Rychlé změny napětí Sem patří zejména míra vjemu flikru, která musí být po 95 % času v libovolném týdenním období menší nebo rovna jedné.

Nesymetrie napájecího napětí V libovolném týdenním období musí být 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky.

Harmonická napětí V libovolném týdenním období musí být za normálních provozních podmínek 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotám uvedeným v tabulce 1. Kromě toho celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí (do harmonické řady 40) musí být menší nebo roven 8 %.

Úrovně signálu v napájecím napětí Jedná se zejména o signály dálkového hromadného ovládání a jiné datové komunikace po distribuční síti. Střední hodnota na-



Obrázek 1: Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_N ve veřejných distribučních sítích nn.

Tabulka 2: Klasifikace poklesů napětí podle zbytkového napětí a doby trvání.

Zbytkové napětí u %	Doba trvání t ms				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\,000$	$1\,000 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$90 > u \geq 80$	CELL A1	CELL A2	CELL A3	CELL A4	CELL A5
$80 > u \geq 70$	CELL B1	CELL B2	CELL B3	CELL B4	CELL B5
$70 > u \geq 40$	CELL C1	CELL C2	CELL C3	CELL C4	CELL C5
$40 > u \geq 5$	CELL D1	CELL D2	CELL D3	CELL D4	CELL D5
$5 > u$	CELL X1	CELL X2	CELL X3	CELL X4	CELL X5

pětí signálu měřeného po dobu tří sekund musí být v 99 % dne menší nebo rovná hodnotám uvedeným na obrázku 1.

2.2.2 Napěťové jevy

Přerušení napájecího napětí Dále se rozděluje na dlouhá přerušení napájecího napětí, která trvají obvykle podstatně déle, než 3 minuty, a na krátká přerušení napájecího napětí, která trvají většinou méně, než několik sekund.

Poklesy napájecího napětí Obecně je prahová hodnota poklesu napětí rovna 90 % jmenovitého napětí. Jako referenční se využívá jmenovité napájecí napětí sítí nn. Podle zbytkového napětí jako procentuální části jmenovité hodnoty a podle délky trvání se jevy agregují do buněk dle tabulky 2. Vyhodnocují se statisticky.

Dočasná zvýšení napětí Prahová hodnota přechodného přepětí je rovna 110 % jmenovitého napětí. Měření, agregace a zpracování probíhá obdobně jako v případě poklesů napájecího napětí. Jevy se rozdělují dle tabulky 3.

Tabulka 3: Klasifikace přechodných zvýšení napětí podle maximálního napětí a doby trvání.

Přechodné zvýšení napětí u %	Doba trvání t ms		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$u \geq 120$	CELL S1	CELL S2	CELL S3
$120 > u > 110$	CELL T1	CELL T2	CELL T3

2.3 Norma ČSN EN 61000-4-30:2009

Norma *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) — Část 4-30: Zkušební a měřicí technika — Metody měření kvality energie* [22] definuje metody měření a vyhodnocování výsledků pro parametry kvality energie ve střídavých napájecích sítích 50/60 Hz. Metody měření v místě instalace jsou popsány tak, aby umožnily získání spolehlivých, opakovatelných a porovnatelných výsledků bez ohledu na použitý měřicí přístroj a podmínky prostředí. Norma se týká specifikace funkce, ne však konstrukce přístrojů a neuvádí prahové hodnoty, ve kterých by se měřené parametry kvality energie měly pohybovat.

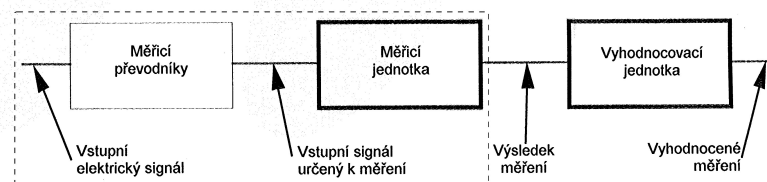
První kapitola je věnována definování rozsahu platnosti normy. Druhá shrnuje normativní odkazy a třetí je věnována definici pojmů a veličin, se kterými se dále operuje. Čtvrtá a pátá kapitola se již věnuje konkrétním požadavkům na funkci analyzátorů kvality a v šesté kapitole se uvádí způsoby a požadavky na ověřování těchto funkcí.

Oproti původní revizi normy z roku 2004 jsou v aktuální druhé edici z roku 2009 některé zásadní rozdíly, které se týkají přerozdělení tříd měřicích přístrojů a redefinice mnoha funkcí. Drtivá většina analyzátorů kvality, které jsou v současné době na trhu, odpovídají svými parametry třídě A definované v původní normě a nesplňují nové přísnější nebo jinak zadané požadavky. V následujícím textu se zmíním o těchto rozdílech.

2.3.1 Všeobecně

Třídy provádění měření Zde jsou definovány tři třídy provádění měření, pro něž je v následující kapitole vždy uvedeno, jaké požadavky jsou pro tu kterou třídu u konkrétního parametru kladeny nároky. Původní norma užívá rozdělení na třídu A a B. Nyní je dělení rozšířeno na A, S a B. Toto rozdělení je natolik zásadní, že budu přímo citovat z normy:

Třída A (Advanced) se použije pokud jsou nutná přesná měření, například pro aplikace ve smluvních vztazích, ověřování shody s normami, odstranění pochybností, atd. Jakákoliv měření parametru prováděná dvěma různými přístroji vyhovujícími požadavkům třídy A budou, pokud se měří stejné signály, vytvářet srovnatelné vý-



Obrázek 2: Měřicí řetězec. Tato práce se zejména věnuje označené části.

sledky v mezích specifikované nejistoty.

Třída S (Serveys) se může použít pro statistické přehledy v aplikacích měření kvality energie, s možností měření pouze omezené podmnožiny parametrů. I když jsou využívány ekvivalentní intervaly měření jako u třídy A, výpočetní nároky pro třídu S jsou nižší.

Třída B (Basic) je definována proto, aby se mnohé existující měřicí přístroje nestaly zastaralými. Metody třídy B nejsou doporučovány do nových přístrojů a v příští edici normy mohou být odstraněny.

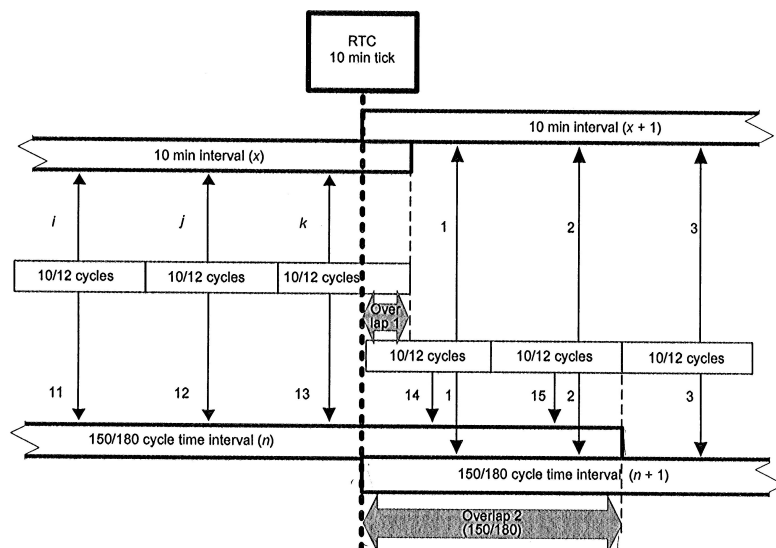
Organizace měření Elektrické veličiny určené k měření mohou být buď dostupné přímo v sítích nn, nebo pomocí měřicích převodníků. V normě 61000-4-30 se neuvažují měřicí převodníky. Na obrázku 2 je schema měřicího řetězce včetně naznačení přerušovanou čarou, kterých částí řetězce se týká tato práce.

Elektrické hodnoty určené k měření Zde se uvádí, že podle kontextu mohou být měřena sdružená napětí nebo fázová napětí a že mohou být měřeny jedno i vícefázové sítě. Kromě měření nesymetrie napětí, která je v podstatě mnohafázová, jsou metody specifikované v normě takové, aby se v každém měřicím kanálu mohly vytvářet nezávislé výsledky. Sdružená napětí mohou být měřena přímo, nebo mohou být odvozena z napětí fázových měřených vůči N. Proud může být měřen na všech fázových vodičích i na nulovém a ochranném vodiči.

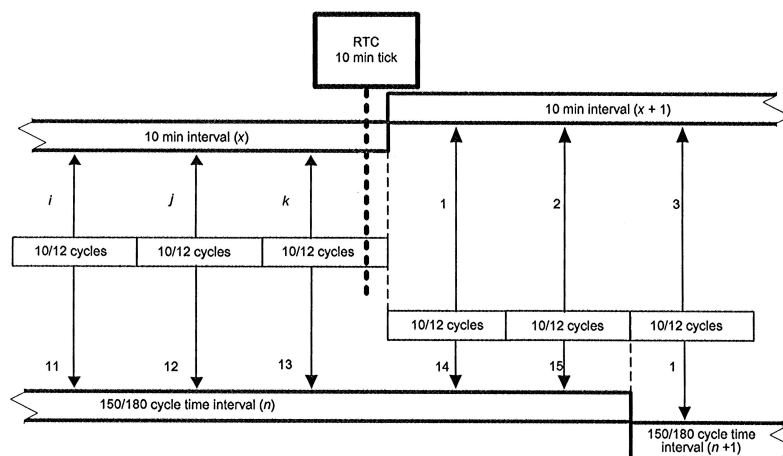
Agregace měření přes časové intervaly Základní měřicí interval pro velikosti parametrů jako napájecí napětí, harmonické, mezipharmonické a nesymetrie musí být 10 cyklů pro napájecí síť 50 Hz nebo 12 cyklů pro napájecí síť 60 Hz. Měřicí intervaly jsou dále agregovány přes tři různé intervaly:

- 150/180 cyklů pro síť 50 Hz/60 Hz
- 10 minut (v budoucnu bude pravděpodobně nahrazeno intervalem 1 minuta)
- 2 hodiny

Novinkou v poslední edici normy je požadavek na resynchronizaci 10-ti/12-ti cyklových měřicích intervalů s každým 10-ti minutovým tikem RTC, jak je znázorněno na



Obrázek 3: Synchronizace agregčních intervalů pro třídu A.



Obrázek 4: Synchronizace agregčních intervalů pro třídu S.

obrázku 3. Na obrázku 4 je znázorněn způsob, jak má být prováděna resynchronizace u přístrojů třídy S.

Algoritmus agregace měření Agregace se provádějí s použitím druhé odmocniny aritmetické střední hodnoty druhých mocnin vstupních hodnot. Pro jednotlivé agregční intervaly jsou tři kategorie agregace.

Data pro interval 150/180 cyklů by měl být agregován bez přerušení z 15-ti 10/12 cyklových intervalů. 150/180 cyklové časové intervaly musí být resynchronizovány při každém desetiminutovém tiku, jak je znázorněno na obrázku 3. V tuto chvíli pokračuje dále poslední interval 150/180 cyklů, dokud se nedokončí, ale zároveň začíná nový interval 150/180 cyklů. Dochází tedy k překrývání jak 10/12, tak i 150/180 cyklových intervalů. Tento požadavek neplatí pro přístroje třídy S, které dokonce nemusí řešit ani desetiminutovou resynchronizaci. Navíc u nich není vyžadováno vy-

hodnocování všech parametrů bez mezer (například harmonické, meziharmonické nebo nesymetrie).

Desetiminutový interval musí být označen absolutní časovou známkou (například 01H10.00) odpovídající času dokončení desetiminutové agregace. Agregace musí být bez mezer z 10/12 cyklových intervalů. Každý desetiminutový interval musí začínat přesně s tikem resynchronizačního RTC. Zde se opět využívá překrývání 10/12 cyklového intervalu, přičemž dokončovaný 10/12 cyklový interval se započítává do předchozího desetiminutového intervalu agregace. Třída S může používat buď shodnou metodu se třídou A, nebo zjednodušenou agregaci, kdy se do předchozího desetiminutového intervalu započítává 10/12 cyklový interval měřený ve chvíli příchodu resynchronizačního pulzu a následující interval se započítává již do nového desetiminutového intervalu. Interval by měl být opět označen absolutní časovou známkou odpovídající času dokončení intervalu. Při této zjednodušené metodě agregace nedochází k překrývání.

Vstupem dvouhodinové agregace by mělo být 12 desetiminutových intervalů. Dvouhodinový interval by měl být bez mezer a bez překrývání. Je dáno, že dvouhodinové intervaly musí začínat v sudých hodinách RTC. Požadavky pro třídu S v případě dvouhodinových intervalů jsou shodné s třídou A.

Nejistota časových hodin Nejistota času RTC je definována relativně vůči UTC. Zatím co norma z roku 2004 pouze požadovala pro přístroje třídy A nejistotu maximálně ± 20 ms pro 50 Hz nebo $\pm 16,7$ ms pro 60 Hz, poslední edice problematiku dále rozvádí, uvádí způsoby, jak dané přesnosti dosahovat a jaká by měla být tolerance RTC v případě, kdy není k dispozici externí synchronizační signál. Tato tolerance by měla být lepší, než ± 1 s za 24 hodin. Pro třídu S se uvádí tolerance RTC nejhůře ± 5 s za 24 hodin.

Koncepce označování příznakem Během krátkodobých poklesů napětí, přepětí nebo výpadků napětí mohou algoritmy měření pro některé parametry vytvářet nespolehlivé hodnoty. Uživatel by měl mít možnost nastavit prahové hodnoty napětí a přepětí, při jejichž překročení mají být data označena příznakem „nespolehlivosti“. Všechny agregované hodnoty, které pro svůj výpočet použijí hodnotu označenou příznakem, musí být taktéž označeny příznakem. Příznaky se musí ukládat spolu s agregovanými daty, aby bylo později možné zjistit, že data mohou být nespolehlivá.

2.3.2 Parametry kvality energie

Síťový kmitočet Pro třídu A i S platí, že odečet kmitočtu se musí získávat každých 10 s. Protože síťový kmitočet nemusí být přesně 50 Hz nebo 60 Hz, nemusí být

počet cyklů v desetisekundovém intervalu celočíselný. Výstup základního kmitočtu je poměr počtu celých cyklů čítaných během desetisekundového intervalu a kumulativní doby trvání celých cyklů. Před každým vyhodnocením se musí signál filtrovat pro minimalizaci účinků vícenásobných průchodů nulou. Každý desetisekundový interval musí začínat na absolutním desetisekundovém času ± 20 ms pro 50 Hz nebo $\pm 16,7$ ms pro 60 Hz. Norma připouští i použití jiných technik, které poskytnou ekvivalentní výsledky — například konvoluce.

Přístroj by měl být schopen měřit frekvenci v rozsahu 42,5 Hz až 57,5 Hz/51 Hz až 69 Hz s přesností ± 10 mHz pro třídu A, respektive ± 50 mHz pro třídu S. Měření by mělo být prováděno na referenčním napět'ovém kanálu a výrobce by měl uvést, jak se bude přístroj chovat v případě výpadku napětí na referenčním kanálu. V případě frekvence není vyžadována žádná agregace.

Velikost napájecího napětí Musí se měřit efektivní hodnota velikosti napětí v časovém intervalu 10 respektive 12 cyklů pro rozvodnou síť 50 Hz respektive 60 Hz. Každý interval musí být přilehlý k sousedním intervalům 10/12 cyklů a nesmí je překrývat kromě případu resynchronizace ilustrovaném na obrázku 3. Z definice musí efektivní hodnota velikosti napětí obsahovat harmonické, mezipharmonické, síťové signály atd.

Pro třídu A je požadovaná přesnost $\pm 0,1\%$ U_{din} ³ v rozsahu 10 % až 150 % U_{din} . Pro třídu S postačí přesnost $\pm 0,5\%$ U_{din} v rozsahu 20 % až 120 % U_{din} . Efektivní hodnota velikosti napětí musí být agregována podle dříve popsaných kritérií.

Krátkodobé poklesy a krátkodobá zvýšení napájecího napětí Základním měřením krátkodobého poklesu a krátkodobého zvýšení napětí musí být $U_{rms(1/2)}$ ⁴ pro třídu A i S s tím, že norma dovoluje pro třídu S k měření využít i $U_{rms(1)}$ ⁵. Trvání cyklu měření pro $U_{rms(1/2)}$ i $U_{rms(1)}$ závisí na frekvenci. Měla by být použita poslední naměřená frekvence, která není označena příznakem. Norma umožňuje i použití jiných metod, které splní požadavky na nejistotu uvedené v 6. kapitole normy.

Prahová hodnota krátkodobého poklesu nebo přepětí je procentní hodnota U_{din} nebo U_{sr} ⁶. Uživatel musí zvolit používané referenční napětí. Taktéž musí uživatel stanovit prahovou hodnotu napětí a hodnotu hystereze. V jednofázových systémech přepětí nebo pokles začíná, když $U_{rms(1/2)}$ překročí nastavenou hodnotu a končí, když se $U_{rms(1/2)}$ vrátí za prahovou hodnotu plus hystereze. Ve třífázových systémech přepětí nebo pokles začíná, když $U_{rms(1/2)}$ překročí nastavenou hodnotu na kterékoli

³ U_{din} se označuje dohodnuté vstupní napětí

⁴ $U_{rms(1/2)}$ je efektivní hodnota velikosti napětí v jedné půlperiodě

⁵ $U_{rms(1)}$ je efektivní hodnota velikosti napětí v jedné periodě

⁶ U_{sr} je označováno klouzavé referenční napětí

fázi a končí, když se $U_{rms(1/2)}$ vrátí za prahovou hodnotu opět posunutou o hysterezi.

Krátkodobý pokles napětí je charakterizován dvojicí dat — buď zbytkovým napětím a dobou trvání nebo hloubkou poklesu a dobou trvání. Zbytkové napětí je nejmenší změřená hodnota $U_{rms(1/2)}$ na jakémkoli kanálu během doby poklesu. Hloubka poklesu je rozdíl mezi referenčním napětím a zbytkovým napětím. Doba trvání je rozdíl mezi začátkem a koncem krátkodobého poklesu napětí.

Krátkodobé zvýšení napětí je charakterizováno dvojicí dat — maximální velikostí krátkodobého zvýšení napětí a dobou trvání. Maximální napětí je největší změřená hodnota $U_{rms(1/2)}$ na jakémkoliv kanálu během doby krátkodobého zvýšení napětí. Doba trvání je časový rozdíl mezi začátkem a koncem krátkodobého zvýšení napětí.

Pro případ použití klouzažícího referenčního napětí uvádí norma filtr, který se má pro výpočet z 10/12 cyklových intervalů dat neoznačených příznakem použít:

$$U_{sr(n)} = 0,9969 \cdot U_{sr(n-1)} + 0,0033 \cdot U_{(10/12)rms}$$

kde $U_{sr(n)}$ je současná hodnota, $U_{sr(n-1)}$ je předcházející hodnota a $U_{(10/12)rms}$ je nejnovější efektivní hodnota 10/12 cyklů. Jedná se vlastně o filtr prvního řádu s časovou konstantou 1 minuta.

Nejistota měření zbytkového napětí a velikosti krátkodobého zvýšení napětí je pro třídu A 0,2 % a pro třídu S 1,0 % z U_{din} . Nejistota měření doby trvání odpovídá jedné polovině cyklu při zahájení děje a polovině cyklu při jeho ukončení.

Přerušení napětí Pro metodu měření platí stejné požadavky jako pro měření krátkodobých poklesů a zvýšení napětí.

V jednofázových systémech přerušení napětí začíná, když je detekován pokles napětí U_{rms} pod práh přerušení napětí a končí, když je hodnota napětí U_{rms} rovná nebo vyšší než práh přerušení napětí plus hodnota hystereze. V případě vícefázových systémů je detekováno přerušení napětí, když ve všech fázích napětí U_{rms} poklesne pod práh přerušení napětí a končí, když alespoň v jedné fázi napětí U_{rms} překročí prahovou hodnotu přerušení napětí plus hystereze. Prahovou hodnotu přerušení napětí a hysterezi musí nastavit uživatel na základě konkrétní situace. Prahová hodnota přerušení napětí by neměla být nastavena pod mez nejistoty měření zbytkového napětí plus hodnoty hystereze. Hodnota hystereze je obvykle nastavena na 2 % z U_{din} .

Začátek přerušení napětí by měl mít časovou značku podle času, kdy napětí U_{rms} , které přerušení iniciovalo, pokleslo pod nastavený práh a ukončení by mělo mít značku podle času, kdy napětí U_{rms} , které ukončilo přerušení, stouplo nad prahovou hodnotu zvětšenou o hysterezi. Délka trvání přerušení napětí je opět rozdíl mezi časem zahájení a ukončení jevu.

Nejistota měření doby trvání přerušení napětí je shodná s nejistotou určení délky

trvání poklesu nebo zvýšení napětí.

Nesymetrie napájecího napětí Nesymetrie napájecího napětí se vyhodnocuje s použitím metody symetrických složek. Při podmínce nesymetrie je kromě sousledné složky U_1 přítomna alespoň jedna z následujících složek: zpětná složka U_2 a/nebo nulová složka U_0 . Základní složka efektivní hodnoty signálu vstupního napětí se měří v časovém intervalu 10/12 cyklů pro 50 Hz/60 Hz rozvodné sítě. Účinek harmonických se přitom minimalizuje použitím filtru nebo DFT⁷.

Zpětná složka u_2 vyjádřená v procentech se vyhodnocuje:

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 = \frac{\text{zpětná složka}}{\text{sousledná složka}} \cdot 100 \%$$

Pro 3-fázové systémy se toto může psát ($U_{ij fund}$ je základní napětí od fáze i k fázi j):

$$u_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \%$$

kde

$$\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}$$

Nulová složka u_0 se vyhodnocuje velikostí poměru vyjádřeného v procentech:

$$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100 = \frac{\text{nulová složka}}{\text{sousledná složka}} \cdot 100 \%$$

Nejistota měření napětíové nesymetrie nesmí překročit $\pm 0,15 \%$ pro třídu A, respektivně $\pm 0,3 \%$ pro třídu S. Přístroj třídy S nemusí vyhodnocovat nulovou složku u_0 . Naměřené hodnoty musí být standardně agregovány přes všechny intervaly.

Harmonická napětí Zde se odkazuje na třídu I z normy ČSN EN 61000-4-7[23]. Pouze se zdůrazňuje, že třída A musí měřit harmonické v každém 10/12 cyklovém intervalu bez mezer a pro harmonické nejméně do řádu 50. Třída S by měla splňovat požadavky třídy II ze stejné normy, přičemž je dovoleno, aby se harmonické měřily nespojitě. Dále stačí vyhodnocovat harmonické pouze do řádu 40.

Harmonická napětí musí být agregována přes standardní intervaly.

Meziharmonická napětí Opět se odkazuje na normu ČSN EN 61000-4-7[23]. Třída A by měla splňovat požadavky třídy I. Měla by měřit spojitě meziharmonická napětí nejméně do řádu 50 z 10/12 cyklových intervalů. Pro třídu S se požadavky nedefinují.

⁷DFT — diskrétní fourierova transformace

Meziharmonická napětí musí být taktéž běžně agregována.

Měření parametrů záporných a kladných odchylek Pro určení parametrů kladných a záporných odchylek v procentech U_{din} se může použít 10/12 cyklová hodnota efektivní velikosti napětí $U_{rms-200ms}$. Záporná odchylka $U_{rms-under}$ je rovna U_{din} , když $U_{rms-200ms,i} > U_{din}$, nebo rovna $U_{rms-200ms,i}$, když $U_{rms-200ms,i} \leq U_{din}$. Kladná odchylka $U_{rms-over}$ je naopak rovna U_{din} , když $U_{rms-200ms,i} < U_{din}$, a rovna $U_{rms-200ms,i}$, když $U_{rms-200ms,i} \geq U_{din}$. Třída S nemusí tento parametr vyhodnocovat.

2.4 Norma ČSN EN 61000-4-7:2009

Norma *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) — Část 4-7: Zkušební a měřicí technika — Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich* [23] se týká přístrojové techniky určené k měření spektrálních složek v kmitočtovém rozsahu do 9 kHz, které jsou superponovány na základní složku napájecích sítí 50 Hz a 60 Hz. Rozlišuje se mezi harmonickými, meziharmonickými a ostatními složkami nad rozsahem kmitočtů harmonických do 9 kHz. Norma definuje měřicí přístrojovou techniku určenou ke zkoušení jednotlivých zařízení podle mezí emise stanovených v určitých normách a rovněž určenou k měření harmonických proudů a napětí v aktuálních napájecích sítích.

První kapitola je věnována definování rozsahu platnosti normy. Druhá shrnuje normativní odkazy a třetí je věnována definici pojmů a veličin, se kterými se dále operuje. Čtvrtá kapitola specifikuje všeobecné koncepce a společné požadavky pro všechny typy přístrojového vybavení určeného k měření a vyhodnocování harmonických, meziharmonických a ostatních složek. Pátá kapitola se věnuje již samotnému měření — vstupním obvodům, požadavkům na přesnost a způsobu vyhodnocování. V dalších kapitolách jsou nastíněny alternativní principy analýzy, řešení přechodného období a požadavky na specifikaci vlivu změny provozních podmínek na přesnosti měření.

Základem aktuální verze normy je ČSN EN 61000-4-7 edice 2 z července roku 2003, která je doplněna, rozšířena a upravena změnou A1 z listopadu roku 2009. Tato změna v rozsahu 23 stran znesnadňuje orientaci v normě a činí aktuální ČSN EN 61000-4-7 dosti nepřehlednou.

2.4.1 Definice

Symbolika V normě se používá následující symbolika pro rozvoj Fourierových řad (liší se od definice v původním znění normy edice 2):

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin\left(\frac{k}{N}\omega_1 t + \varphi_k\right)$$

kde

$$\begin{cases} c_k = |b_k + ja_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ Y_{C,k} = \frac{c_k}{\sqrt{2}} \\ \varphi_k = \pi + \arctan\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad \text{pokud } b_k < 0 & \varphi_k = \arctan\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad \text{pokud } b_k > 0 \\ \varphi_k = \frac{\pi}{2} \quad \text{pokud } b_k = 0 \text{ a } a_k > 0 & \varphi_k = -\frac{\pi}{2} \quad \text{pokud } b_k = 0 \text{ a } a_k < 0 \\ \varphi_k = 0 \quad \text{pokud } |b_k| \leq \varepsilon \text{ a } |a_k| \leq \varepsilon \end{cases}$$

a

$$\begin{cases} b_k = \frac{2}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) \times \sin\left(\frac{k}{N}\omega_1 t\right) dt \\ a_k = \frac{2}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) \times \cos\left(\frac{k}{N}\omega_1 t\right) dt \\ c_0 = \frac{1}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) dt \end{cases}$$

Význam použitých symbolů:

ω_1	úhlový kmitočet základní složky ($\omega_1 = 2\pi f_{H,1}$)
T_N	šířka časového okna
c_0	stejnoseměrná složka
c_k	amplituda složky s kmitočtem $f_{C,k} = \frac{k}{N}f_{H,1}$
$Y_{C,K}$	efektivní hodnota složky c_k (Y se nahrazuje I/U pro proudy/napětí)
$f_{H,1}$	základní kmitočet distribuční soustavy
k	řád spektrální složky týkající se rozlišení kmitočtu ($f_{C,1} = \frac{1}{T_N}$)
N	počet základních period uvnitř šířky okna
φ_k	úhel fázového posunu spektrální čáry k

Definice týkající se harmonických Změna normy A1 používá nový způsob značení a upravuje definice kmitočtu harmonické $f_{H,h}$, řádu harmonické h , efektivní hodnoty harmonické složky $Y_{H,h}$, efektivní hodnoty skupiny harmonických $Y_{g,h}$ a efektivní hodnoty podskupiny harmonických $Y_{sg,h}$.

Definice týkající se činitelů zkreslení I zde změna A1 přináší poupravené značení. Celkové harmonické zkreslení je nyní značeno THD_{YX} , kde se Y nahrazuje U

pro napětí nebo I pro proudy. To platí i u ostatních činitelů zkreslení.

$$\text{THD}_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{Y_{H,h}}{Y_{H,1}} \right)^2}$$

kde $Y_{H,h}$ jsou harmonické složky do stanoveného řádu h_{max} a $Y_{H,1}$ je efektivní hodnota základní složky. Celkové harmonické zkreslení skupiny je značeno THDG_Y a výpočet se provádí z efektivních hodnot skupin harmonických $Y_{g,h}$ a efektivní hodnoty skupiny přidružené k základní harmonické složce $Y_{g,1}$.

$$\text{THDG}_Y = \sqrt{\sum_{h=h_{min}}^{h_{max}} \left(\frac{Y_{g,h}}{Y_{g,1}} \right)^2} \quad kde \quad h_{min} \geq 2$$

Celkové harmonické zkreslení podskupiny THDS_Y vypočteme pomocí efektivní hodnoty podskupin harmonických $Y_{sg,h}$ a efektivní hodnoty podskupiny přidružené k základní složce $Y_{sg,1}$.

$$\text{THDS}_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{Y_{sg,h}}{Y_{sg,1}} \right)^2} \quad kde \quad h_{min} \geq 2$$

Dílčí vážené harmonické zkreslení $\text{PWHD}_{H,Y}$ získáme z efektivní hodnoty vážené s řádem harmonické h vybrané skupiny harmonických vyššího řádu (od řádu h_{min} do h_{max}) a efektivní hodnoty základní složky.

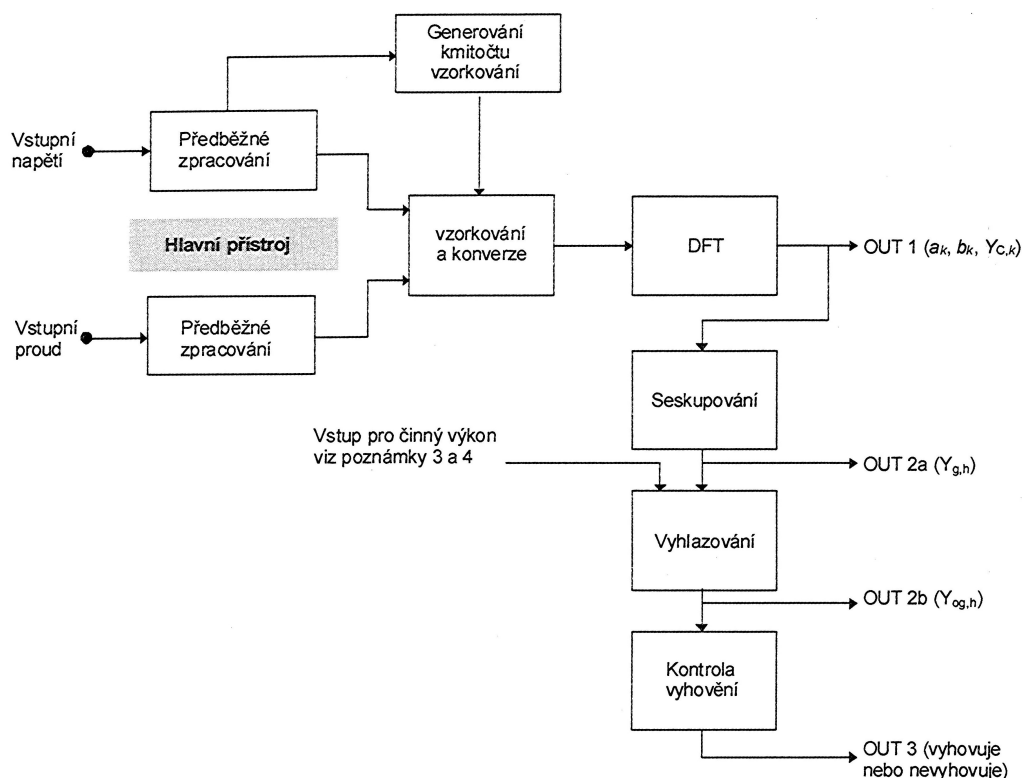
$$\text{PWHD}_{H,Y} = \sqrt{\sum_{h=h_{min}}^{h_{max}} h \left(\frac{Y_{H,h}}{Y_{H,1}} \right)^2}$$

Pro výše uvedené činitele zkreslení se uvažuje $h_{max} = 40$.

Definice týkající se meziharmonických Efektivní hodnota spektrální složky je nyní značena $Y_{C,k}$, efektivní hodnota meziharmonické složky $Y_{C,i}$, efektivní hodnota skupiny meziharmonických $Y_{ig,h}$, efektivní hodnota vycentrované podskupiny meziharmonických $Y_{isg,h}$, kmitočet skupiny meziharmonických $f_{ig,h}$ a kmitočet vycentrované podskupiny meziharmonických $f_{isg,h}$.

2.4.2 Všeobecně

Hlavní přístroj Dle normy musí přístroj, použitelný pro měření harmonických a meziharmonických, obsahovat vstupní obvody s anti-aliasing filtrem, AD převodník



Obrázek 5: Struktura měřicího přístroje z pohledu měření harmonických a mezipharmonických.

včetně vzorkovací a paměťové jednotky, jednotku synchronizace a tvarování okna je-li požadována a DFT procesor vytvářející Fourierovy koeficienty a_k a b_k (OUT 1 na obrázku 5). Šířka okna musí být 10 (pro soustavy 50 Hz) nebo 12 (pro soustavy 60 Hz) základních period (tedy $T_N = 200\text{ ms}$) s pravoúhlým vážením, synchronizovaná k základnímu kmitočtu napájecí soustavy. V případě ztráty synchronizace je dovoleno Hanningovo vážení. Ztráta synchronizace však musí být indikována na displeji přístroje a takto získaná data musí být označena a nesmí se použít pro určení shody. Mohou se však použít pro jiné účely — má tedy smysl je archivovat. Časové okno se musí synchronizovat s každou skupinou 10/12 cyklů. Čas mezi čelem prvního vzorkovacího impulsu dvou po sobě jdoucích skupin musí odpovídat době trvání specifikovaného počtu cyklů rozvodné sítě s maximální přípustnou chybou $\pm 0,03\%$. Přístroje obsahující fázový závěs musí vyhovět požadavkům na přesnost v rozsahu alespoň $\pm 5\%$ jmenovitého kmitočtu sítě.

Požadavky na přesnost Uvažují se dvě třídy přesnosti I a II. Pro zkoušky emise, jsou-li emise blízké mezním hodnotám, se požaduje vyšší třída I. Maximální přípustné chyby pro obě třídy přesnosti jsou uvedeny v tabulce 4. Uvedené hodnoty se týkají ustálených signálů jediného kmitočtu v provozním kmitočtovém rozsahu, aplikované na přístroje při jmenovitých provozních podmínkách stanovených výrob-

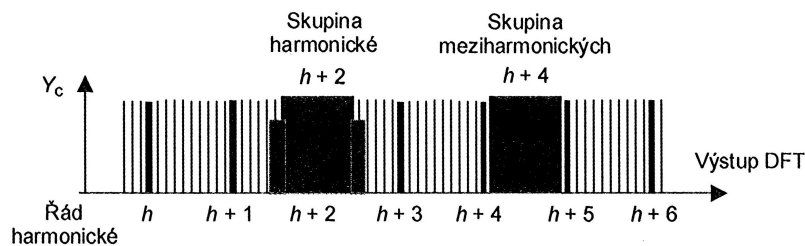
Tabulka 4: Požadavky na přesnost měření proudu, napětí a výkonu.

Třída	Měření	Podmínky	Maximální chyba
I	Napětí	$U_m \geq 1 \% U_{nom}$	$\pm 5 \% U_m$
		$U_m < 1 \% U_{nom}$	$\pm 0,05 \% U_{nom}$
	Proudu	$I_m \geq 3 \% I_{nom}$	$\pm 5 \% I_m$
		$I_{nom} < 3 \% I_{nom}$	$\pm 0,15 \% I_{nom}$
	Výkonu	$P_m \geq 150 W$	$\pm 1 \% P_m$
		$P_m < 150 W$	$\pm 1,5 W$
II	Napětí	$U_m \geq 3 \% U_{nom}$	$\pm 5 \% U_m$
		$U_m < 3 \% U_{nom}$	$\pm 0,15 \% U_{nom}$
	Proudu	$I_m \geq 10 \% I_{nom}$	$\pm 5 \% I_m$
		$I_{nom} < 10 \% I_{nom}$	$\pm 0,5 \% I_{nom}$

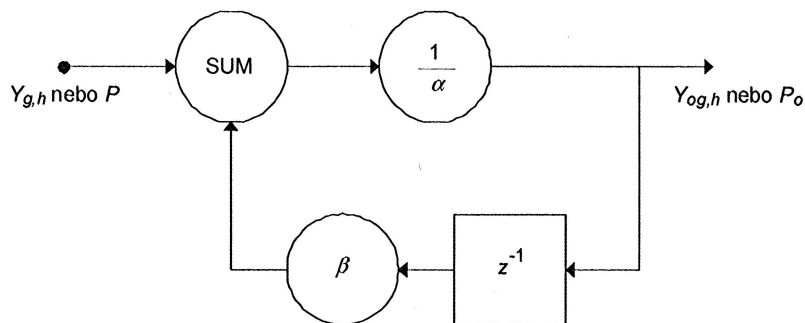
cem.

Vstupní obvody proudu Kromě toho, že by měly vstupní obvody být vhodné pro analyzované proudy, uvádí norma i konkrétní parametry, které by měly splňovat. Například pro přístroje třídy II by příkon proudového vstupního obvodu neměl překročit 3 VA. Pro přístroje třídy I nesmí efektivní hodnota úbytku napětí na vstupu překročit 0,15 V. Vstupní obvody musí nepřetržitě odolávat přetížení $1,2 I_{nom}$ a přetížení $10 I_{nom}$ po dobu 1 s nesmí způsobit jakoukoliv škodu. Přístroj s rozsahem do 5 A musí být schopen přijímat signály s činitelem výkyvu do 4, pro rozsah do 10 A s činitelem výkyvu 3,5 a 2,5 pro vyšší rozsahy. Dále se vyžaduje, aby bylo indikováno přetížení. Další požadavky vyplývají z tabulky 4.

Vstupní obvod napětí Vstupní obvody musí být přizpůsobeny maximálnímu napětí a kmitočtu analyzovaného síťového napětí a musí udržovat své charakteristiky a přesnost nezměněnou do 1,2 násobku maximálního napětí. Činitel výkyvu 1,5 je považován za dostatečný v běžných případech, pro průmyslové prostředí se doporučuje alespoň 2. Opět je vyžadována indikace přetížení. Po dobu 1 s musí vstupní obvody odolat střídavému napětí buď o velikosti čtyřnásobku nastaveného vstupního napětí nebo 1 kV, podle toho co je menší, aniž by došlo k jakémukoliv poškození přístroje. Pro dosažení univerzálnosti vstupních obvodů norma doporučuje pro síť 50 Hz umožnění volby rozsahu U_{nom} z hodnot 66 V, 115 V, 230 V, 400 V a 690 V. Absorbovaný příkon vstupního obvodu nesmí překročit 0,5 VA při 230 V. Je třeba také zajistit, aby vysoká hodnota základní složky napětí, ve srovnání s ostatními měřenými složkami, nezpůsobila poškození nebo nebezpečné intermodulační chybové signály ve vstupních obvodech. Napětíové vstupní obvody samozřejmě musí taktéž splňovat přesnosti dané tabulkou 4.



Obrázek 6: Znázornění skupin harmonických a meziharmonických.



Obrázek 7: Realizace digitálního filtru dolní propusti.

2.4.3 Následné zpracování

Seskupování a vyhlazování Při určování harmonických je výstup OUT 1 (viz. obr. 5) DFT prvním seskupením určeným k sečtení druhých mocnin mezilehlých složek mezi dvěma přiléhajícími harmonickými podle rovnice

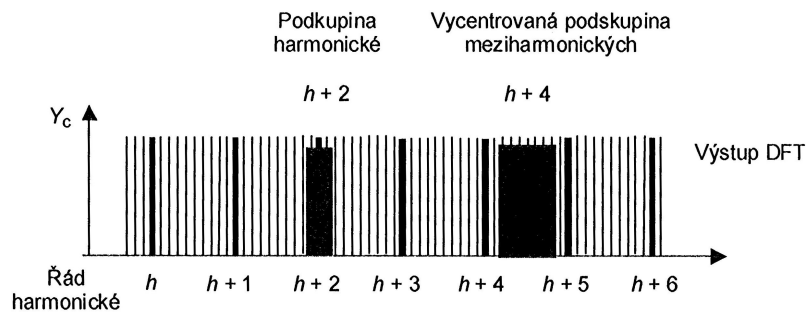
$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) - \frac{N}{2}}^2 + \sum_{k=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}-1} Y_{C,(N \times h)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) + \frac{N}{2}}^2$$

znázorněné na obrázku 6.

Vyhlazování signálu se musí provádět přes efektivní hodnotu $Y_{g,h}$ každého řádu harmonické (OUT 2a na obrázku 5) s použitím digitálního ekvivalentu filtru dolní propusti prvního řádu s časovou konstantou 1,5 s. Funkční schema filtru je na obrázku 7. z^{-1} označuje zpoždění časového okna, α a β jsou koeficienty filtru — ty jsou uvedeny v tabulce 5 pro různé kmitočty sítí a délky okna.

Tabulka 5: Koeficienty vyhlazovacího filtru podle šířky okna.

Kmitočet	Cykly N v okně	Četnost vzorkování	α	β
50	10	$\approx 1/200 \text{ ms}$	8,012	7,012
60	12	$\approx 1/200 \text{ ms}$	8,012	7,012
50	16	$\approx 1/320 \text{ ms}$	5,206	4,206
60	16	$\approx 1/267 \text{ ms}$	6,140	5,140



Obrázek 8: Znázornění podskupiny harmonické a vycentrované podskupiny meziharmonických.

Určování podskupin harmonické napětí Fourierova transformace předpokládá stacionární signál. Velikost síťového napětí však může kolísat, přičemž energie harmonických složek se šíří do přilehlých kmitočtů spektrálních složek. Pro zvýšení přesnosti určení napětí se musí výstupní složky $U_{C,k}$ pro každých 5 Hz DFT seskupovat dle obrázku 8 a rovnice

$$Y_{sg,h}^2 = \sum_{k=-1}^1 Y_{C,(N \times h)+k}^2$$

3 Implementace

3.1 Etapy vývoje

S vedením firmy KMB systems, s.r.o. jsem se shodl na rozdělení vývoje analyzátoru třídy A do dvou hlavních etap. První z nich je otestování nové platformy mikrokontrolérů řady STM32F400[14] formou vývoje levného analyzátoru sítě na DIN lištu, který poslouží k přípravě firmwaru, zprovoznění všech zásadních periférií jako je rozhraní pro externí paměť, časovače, AD převodníky, softwarový fázový závěs, komunikační rozhraní jako USART, ethernet, ale i SPI a I2C sběrnice, a také k vytvoření bootloaderu a odladění spolupráce mezi novou řadou MCU a použitým vývojovým prostředím IAR Embedded Workbench pro ARM. Vyvíjený analyzátor byl na základě firemních zvyků a historických důvodů pojmenován SMC 144 a na této platformě je možná téměř kompletní příprava firmwaru získávání dat, zpracování a archivace pro budoucí finální přístroj třídy A, protože při portaci firmwaru na nový hardware budou nutné pouze minimální změny.

Druhou etapou je návrh rozšířeného a kompletního hardwaru, který umožní dosažení přesností vyžadovaných třídou A.

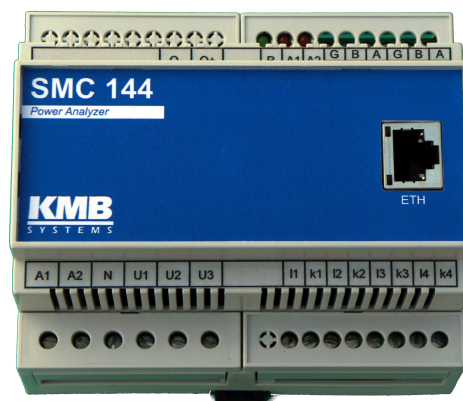
3.2 Srovnání přístrojů

V tabulce 6 jsou srovnány základní vlastnosti a parametry tří analyzátorů kvality elektrické energie. Přístroj SMPQ 44 (na obrázku 9a je třífázová varianta SMPQ 33) je již po několik let nejvyšším modelem analyzátoru firmy KMB systems, s.r.o. Jedná se o přístroj určený pro montáž do panelu standardního rozměru 96x96 mm. V základním provedení obsahuje proudové transformátory pro nepřímé měření proudu s pomocí externích proudových transformátorů s výstupem 5 A a napětíové měřicí vstupy pro pětivodičové připojení k síti. Srdcem přístroje je STR912FW44 s jádrem ARM966E-S. Tento mikrokontrolér je v dnešní době již zastaralý a z mnoha důvodů není vhodný pro nové návrhy. Jedněmi z nejnejpříjemnějších vlastností, souvisejících s vývojem nového přístroje, je problematické ladění, potřeba kompletního JTAG programátoru, nutnost přepínání bank interní flash nebo například potřeba více napájecích napětí zvláště pro periferie a jádro. Již nyní musí být některé výpočty rozděleny do několika kroků (například nespojitě měření harmonických) z důvodu omezeného výpočetního výkonu jádra.

Přístroj SMC 144 na obrázku 9b je, jak již bylo řečeno výše, prvním přístrojem firmy KMB systems, s.r.o., používající moderní mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex-M4. Jedná se o přístroj určený k montáži na DIN lištu, využívající různé externí proudové transformátory umožňující přímé měření proudu až do 600 A. Z důvodu požadavku na nízkou cenu přístroje se jedná o jednodeskové provedení pouze



(a) SMPQ 33.



(b) SMC 144 revize 0.

Obrázek 9: Analyzátoři kvality elektrické energie.

s nejdůležitějšími vstupy a výstupy a s hřebínkem pro volitelné osazení rozšiřující desky, umožňující například doplnění přístroje o nativní ethernet. Díky vyvedení mnoha sběrnic a GPIO na rozšiřující konektor je tak vlastně zároveň i vývojovou deskou pro testování nových periférií a komunikačních rozhraní. Nejzásadnějším zjednodušením SMC 144 oproti „skutečným“ analyzátorům je použití pouze integrovaných dvanáctibitových SAR AD převodníků obvodu STM32F407 namísto kvalitních externích sigma-delta převodníků s nejméně 16-ti bitovým rozlišením. Pro svůj účel použití jako levných analyzátorů pro podružné měření jsou však integrované převodníky více než dostačující a hrají zásadní roli v ušetřené ceně materiálu.

Přístroj označený ELITE, který zatím nemá oficiální název, má uvedené parametry, se kterými se v současné době počítá pro to, aby mohl být označen jako analyzátor sítě třídy A. Bude používat stejný MCU jako SMC 144. Pro vzorkování napětí a proudů však budou využity špičkové externí sigma-delta převodníky s vyšším rozlišením a vzorkovací frekvencí. Bude doplněna externí paměť RAM, archivy bude možné ukládat kromě interní NAND flash paměti rovněž na SDHC kartu. Napěťové vstupy budou řešeny jako 4 plně diferenciální vstupy, proudové vstupy budou umožňovat připojení jak klasických proudových transformátorů, tak i senzorů využívajících principu Rogowského cívky.

3.3 Hardware SMC 144

3.3.1 Konstrukční provedení

Při stanovování zadání přístroje, který je dnes označován jako SMC 144, byla jednou z hlavních priorit snadná vyrobiteľnosť, nízka cena a dobrá dostupnosť součástek

Tabulka 6: Srovnání současných a vyvíjených analyzátorů kvality.

	SMPQ 44	SMC 144	ELITE
Sondy	interní CT	externí CT	externí CT/rogowského cívky
Vstupy	4 x U vůči PE, 4 x I	3 x U vůči N*, 4 x I	4 x diferenciální U, 4(5) x I
Zes. a filtry	SE, 2. řád	SE, 2. řád	DIFF, 2. řád
ADC	$\Sigma\Delta$ 16 bit @ 6,4 kS/s	SAR 12 bit @ 6,4 kS/s	$\Sigma\Delta$ 24 bit @ 25,6 kS/s
MCU	STR912FW44	STM32F407	STM32F407
Jádro	ARM966E-S	ARM Cortex-M4	ARM Cortex-M4
MHz/MIPS	96/96	168/210	168/210
FPU	Nemá	Single precision	Single precision
ROM	1 MB	1 MB	1 MB
RAM	96 kB + 512 kB	196 kB	196 kB + 1 MB
Výpočty	Class S	Class S	Class A
Archivace	512 MB NAND	512 MB NAND	512 MB NAND, SDHC
Zobrazení	LCD 240x160 ČB	Volitelné	TFT LCD 320x240
Komunikace	RS-485, Ethernet, USB	RS-485, Ethernet	Ethernet, USB, Wi-Fi

* V druhé revizi DPS jsou již měřena 4 napětí vůči PE.

a dílů. Na základě uvedených požadavků bylo rozhodnuto, že přístroj bude řešen jako jednodeskový ve standardní krabici typu Module Box[8] na DIN lištu o šířce šesti modulů od firmy Camden Electronics. Z hlediska ochrany před nebezpečným dotykem je SMC 144 přístrojem třídy II, který kombinuje ochranu zesílenou izolací a ochranu vysokou impedancí.

Přístroj SMC 144 měl do jisté míry také vytvořit alternativu k multifunkčnímu přístroji SMC 33, který narozdíl od SMC 144 využívá průvlekové proudové transformátory integrované na desce přístroje a umožňuje volitelné osazení mnoha V/V (analogový vstup a výstup, dva digitální vstupy a výstupy). Časem se ukázalo, že toto univerzální řešení není výhodné z důvodů velkých rozměrů DPS, vyšší ceny a toho, že pouze menšina zákazníků od přístroje vyžadovala více než základní komunikaci a případně réleový alarmový výstup. Proto bylo rozhodnuto pro minimalistické řešení s pouhým jediným réleovým nebo impulsním výstupem a doplnění druhé volitelné sběrnice komunikace RS-485, která by se mohla využít k připojení téměř libovolného počtu externích V/V modulů.

Dalším požadavkem byla možnost komunikace přes drátový nebo optický ethernet, Wi-Fi nebo doplnění jednoduchého displeje a tlačítek. Pro tento účel jsem navrhl rozšiřující slot s vyvedenými periferními piny MCU a možností osazení svislé DPS nebo plochého kabelu vedoucího do druhé desky. Nakonec z důvodu absence displeje nesmí chybět zelená LED indikující běh přístroje a dvě konfigurovatelné červené alarmové LED.

3.3.2 Připojení k měřené síti

V nulté revizi přístroje SMC 144 se měřené napětí připojuje čtyřvodičově k nulovému (N) a třem fázovým vodičům (L1, L2, L3). Pomocné napájecí napětí může být propojeno s libovolnou kombinací měřených vodičů, obvykle se však využívá některý fázový a nulový vodič, může se však využít i oddělené napájecí napětí, které může být případně zálohováno pomocí UPS, nebo nízké stejnosměrné napětí 18 až 75 V u speciální varianty přístroje. Pomocné napájecí napětí se doporučuje připojit přes 1 A pojistku a vypínač, případně jistič. K přístroji se nepřipojuje ochranný vodič, protože SMC 144 v nulté revizi neumožňuje měření čtyř napětí, ani se nejedná o přístroj třídy I z hlediska ochrany před nebezpečným dotykem. Popsané zapojení je ilustrováno na obrázku 10.

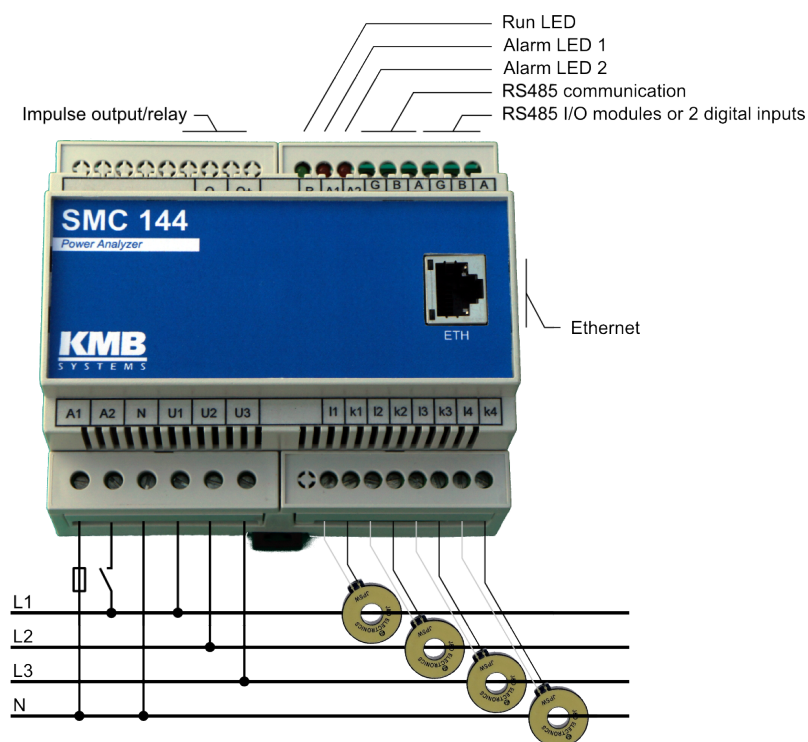
V aktuálně připravované revizi DPS dochází k mnoha změnám. Nejzásadnější je přidání čtvrtého měřeného napětí a s tím související přidání další svorky měřených napětí. Nově se bude připojovat nulový vodič (N), tři fázové vodiče (L1, L2, L3) a měřicí vstup L4 bude využit k připojení potenciálu PE, čímž umožní měření napětí středního/nulového vodiče. Počítá se zároveň s variantou využití revidovaného přístroje pro měření až čtyř jednofázových vedení se společným neutrálním vodičem. V nové revizi přístroje je nutné přesunout pomocné napájecí napětí do horní řady svorek. Připojení SMC 144 revize 1 k měřené síti je na obrázku 11.

Až čtyři proudy převáděné externími proudovými transformátory na úroveň několika desítek mA jsou připojeny na svorky l1, k1 až l4, k4, přičemž poslední čtvrtý proud může být použit pro měření proudu středním vodičem nebo k měření fázového proudu v případě zmíněného využití pro měření až čtyř jednofázových vývodů.

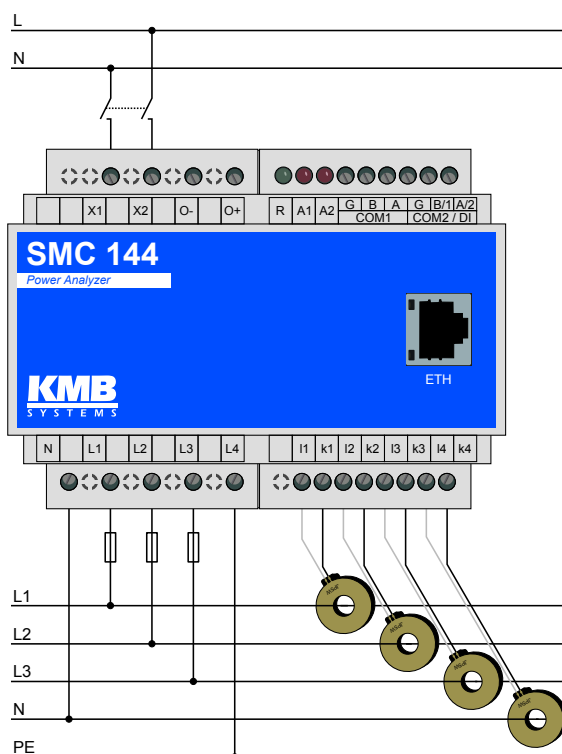
3.3.3 Připojení periferií a komunikace

Základní komunikační rozhraní RS-485 slouží ke komunikaci s nadřazeným systémem, kalibraci, nastavování, odesílání aktuálních dat nebo stahování archivů. Připojení je běžné třívodičové - svorka G slouží ke srovnání potenciálů připojených zařízení a diferenciální signály A a B slouží k samotnému přenosu dat. Volitelná druhá komunikace RS-485 slouží ke sběrníkovému propojení přístroje s externími moduly analogových a digitálních vstupů a výstupů. V první revizi DPS se počítá s volitelným variantním osazením dvou pasivních digitálních vstupů na místo neosazené druhé komunikace RS-485.

Volitelný digitální výstup, pokud je osazen jako réleový, může spínat jmenovité napětí až 230 V a proud 5 A. Impulsní výstup využívá jako spínací prvek tranzistor optočlenu a je určen ke spínání malého stejnosměrného napětí do 24 V. V případě zapojování impulsního výstupu je nutné dbát na správnou polaritu externího zdroje napětí připojeného do ovládané smyčky. Polarita a příklad zapojení V/V je ilustro-



Obrázek 10: Připojení SMC 144 revize 0 k měřené síti.



Obrázek 11: Připojení SMC 144 revize 1 k měřené síti.

tor, pojistku, tlumivku pro potlačení souhlasného rušení, varistor, graetzův můstek a filtrační kondensátory. Před nimi je u varianty napájení ze sít'ového napětí předřazen speciální obvod, který omezí maximální napětí, na které se kondensátory nabíjí. V důsledku stačí použít kondensátory na nižší napětí (úspora prostoru, ceny) a zdroj je zároveň použitelný i pro připojení na sdružené napětí 400 V.

Za samotným spínaným zdrojem následuje filtrační LC π článek a obvod zpětné vazby, kterým se zároveň nastavuje výstupní napětí přibližně 5 V. VF transformátor, transil, ultrarychlý lavinový usměrňovač, schottkyho dioda, optočlen a kondensátory okolo obvodu LNK364 firmy Power Integrations jsou zapojeny dle doporučeného zapojení dle katalogového listu výrobce.

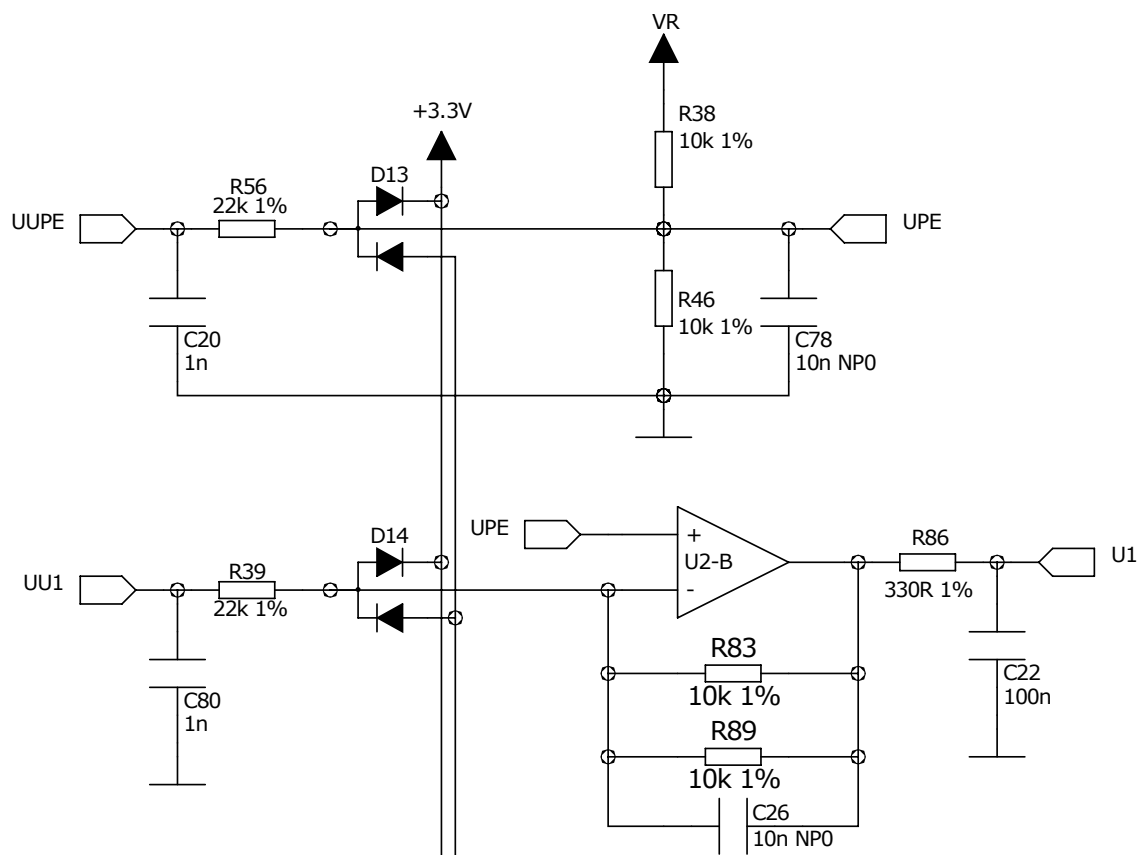
Napájecí větev 5 V není již dále stabilizována. Pro napájení analogových obvodů, MCU, NAND flash, rozšiřujícího modulu a I2C teploměru je však potřeba ještě 3,3 V napájecí napětí. To je variantně získáno pomocí low drop-out obvodů TPS76333[17] nebo LM2937[12] od firmy Texas Instruments. První z obvodů v miniaturním pouzdře SOT-23 je schopen dodávat maximálně 150 mA, druhý v pouzdře TO-263 může dodat až 500 mA. Volba regulátoru závisí na typu a množství připojených periférií.

Velice důležitou součástí z hlediska EMC a rušení měřeného signálu je Y kondensátor spojující „primární“ stranu zdroje se signálem země „bezpečného“ vnitřku přístroje. Jeho optimální hodnota nebo případné vypuštění bude experimentálně vyzkoušeno při testech odolnosti přístroje na bursty.

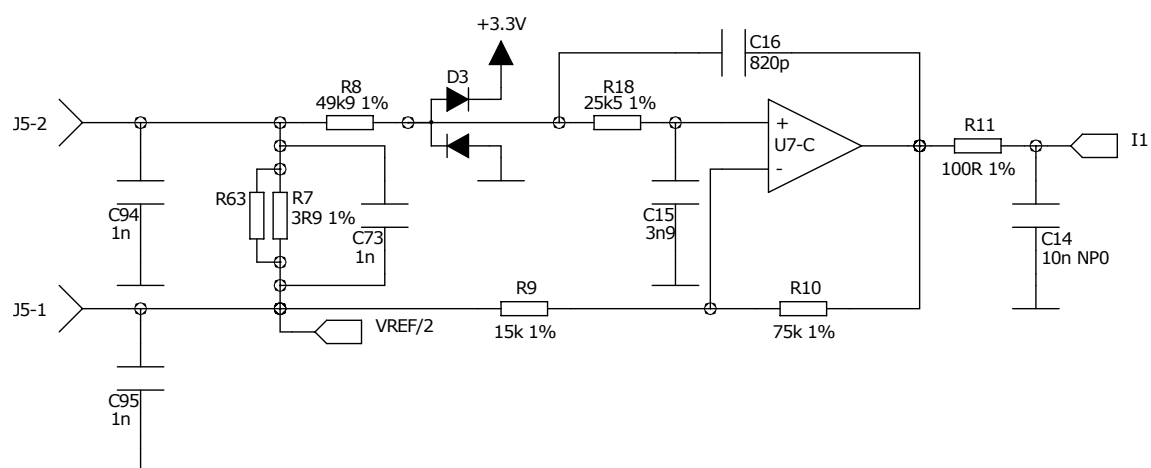
3.3.5 Vstupní obvody, filtry

Vstupní svorky napětí vedou přímo na pětice resistorů 220 k Ω v SMT pouzdrech velikosti 1206 zapojených v sérii pro dosažení dostatečného výkonového dimenzování a vyhovění kategorii přepětí 300 V CAT III. Na obrázku 14a je filtr referenčního vstupu (označen UUPÉ), jehož výstup je přiveden na neinvertující vstupy diferenciálních zesilovačů všech měřených napětí (diferenciální zesilovač pro napětí U1 v dolní části obrázku). Z vnějšího pohledu se všechny vstupy chovají naprosto shodně — vstupní impedance je 1,1 M Ω . Přesto, že v cestě napět'ového signálu jsou tři RC členy, filtr se chová jako dolní propust druhého řádu, protože výstupní RC člen musí splňovat impedanční požadavky vstupu AD převodníku a je naladěn na daleko vyšší frekvenci. Hodnoty součástek byly odladěny v simulačním softwaru tak, aby se amplitudové a frekvenční charakteristiky celého vstupního obvodu maximálně blížily charakteristikám vstupního obvodu měření proudu. Jak přesně se tento požadavek podařilo splnit je zřejmé z přenosu harmonických v kapitole 4.3.

Na obrázku 14b je schema zesilovače kombinovaného s filtrem prvního proudového kanálu I1. Pro návrh filtru byl využit software FilterLab V2.0[19], kde byly zadány následující požadavky: charakteristika typu Butterworth, dolní propust, druhý řád, zisk 6, pokles o 3 dB při 2,5 kHz, topologie Sallen Key. Na svorky se přímo připojí ex-

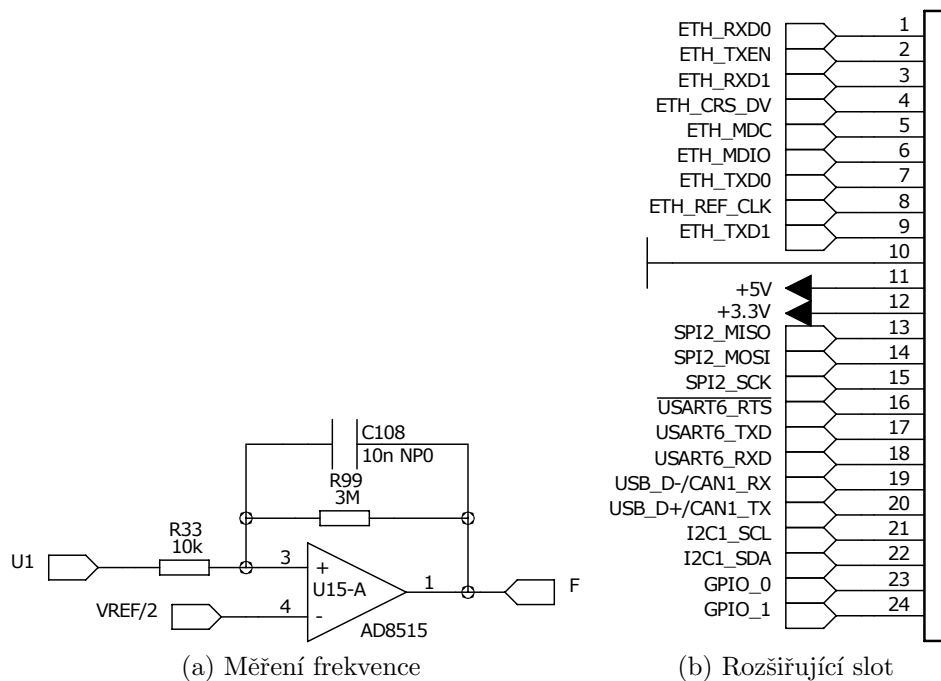


(a) Napětí



(b) Proud

Obrázek 14: Vstupní filtry.



Obrázek 15: Další důležité obvody.

terní proudový transformátor s převodem 1:2500. Paralelní kombinací dvou resistorů je tvořen bočník proudového transformátoru. Napětí na bočníku je zesilováno a filtrováno navrženým obvodem. Jako celek má vstupní obvod proudu opět charakter dolní propusti druhého řádu s několika dalšími časovými konstantami posunutými vysoko nad 2,5 kHz. Kondensátor připojený paralelně k bočníku slouží ke kalibraci fázového posunu proudových vstupů vůči napětovým.

Na obrázku 15a je schema komparátoru s kladnou zpětnou vazbou a časovou konstantou $\tau = 30\text{ ms}$, který slouží k měření frekvence síťového napětí a synchronizaci fázového závěsu vzorkování. Jako vstup je využito filtrované napětí první fáze, které je komparované vůči polovině referenčního napětí. Výstup F ve formě digitálního signálu jde přímo na GPIO MCU s povoleným generováním přerušování při hraně vstupního signálu.

3.3.6 Rozšiřující slot

Na obrázku 15b je ve schematu zobrazen dvouřadý čtyřřadvacetipinový lámací hřebínek a signály, které jsou na něj vyvedeny. Kromě země a napájecího napětí 3,3 V a 5 V je možné v periferním modulu připojeném do tohoto „slotu“ využít kompletní rozhraní RMII včetně 50 MHz hodinového signálu, dále sériové sběrnice SPI a I2C, USART, USB, CAN a dva GPIO.

Zatím jsem vytvořil jediný rozšiřující modul, který byl nejvíce žádán. Jedná se o ethernetový modul s PHY KSZ8001L[11] firmy Micrel v prakticky základním do-

poručeném zapojení dle katalogového listu. V plánu jsou již další rozšiřující moduly — například propojení k druhé DPS s jednoduchým displejem a několika tlačítky nebo modul optického ethernetu.

3.3.7 AD převodníky

Ke vzorkování měřených proudů a napětí jsou v SMC 144 využívány integrované AD převodníky obvodu STM32F207 nebo STM32F407. Pro zamýšlený účel přístroje, kterým je levná varianta analyzátoru, jsou dva dvanáctibitové SAR AD převodníky, každý vzorkující čtyři vstupy, bohatě dostačující, jak bude dokázáno v kapitole 4.

Pro připravovaný finální hardware analyzátoru třídy A budou právě vstupní obvody a AD převodníky součástí, která se bude nejzásadněji lišit. Na rozdíl od SMC 144 budou použity precizní externí AD převodníky ADS1278[10] od firmy Texas Instruments. Jedná se o 24-bitové, osmikanálové, synchronně vzorkující sigma-delta převodníky s frekvencí vzorkování až 144 kS/s, poměrem signál/šum až 111 dB a SPI rozhraním.

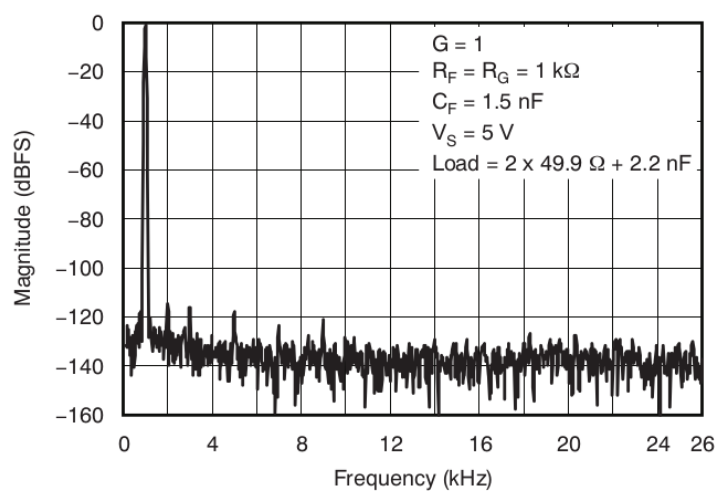
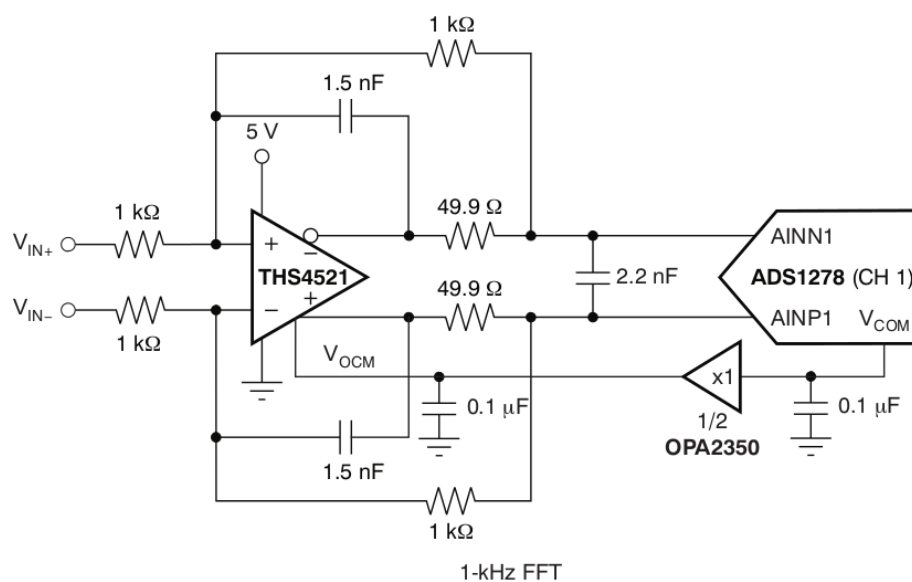
Převodníky mají diferenciální vstupy a pro dosažení maximálního výkonu bude nutné odpovídajícím způsobem upravit i vstupní obvody. Vstupní zesilovače a filtry budou nahrazeny plně diferenciálními precizními operačními zesilovači, které jsou svými parametry vhodné k použití ve 24-bitových systémech. Příkladem je THS4521 od stejného výrobce. Obvod vyniká extrémně nízkým šumem $4,6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a zkreslením THD+N -122 dB.

Konečná volba operačního zesilovače bude ještě záviset na dostupnosti a ceně obvodů, které se v případě špičkových součástek této kategorie, navíc v provedení s průmyslovým teplotním rozsahem, pohybují ve stokorunách za kus. Na obrázku 16 je schema a spektrum navzorkovaných dat při sinusovém vstupním signálu 1 kHz s úrovní -0,5 dBFS kombinace operačního zesilovače a AD převodníku převzatá z katalogového listu THS4521 dostupného na [15].

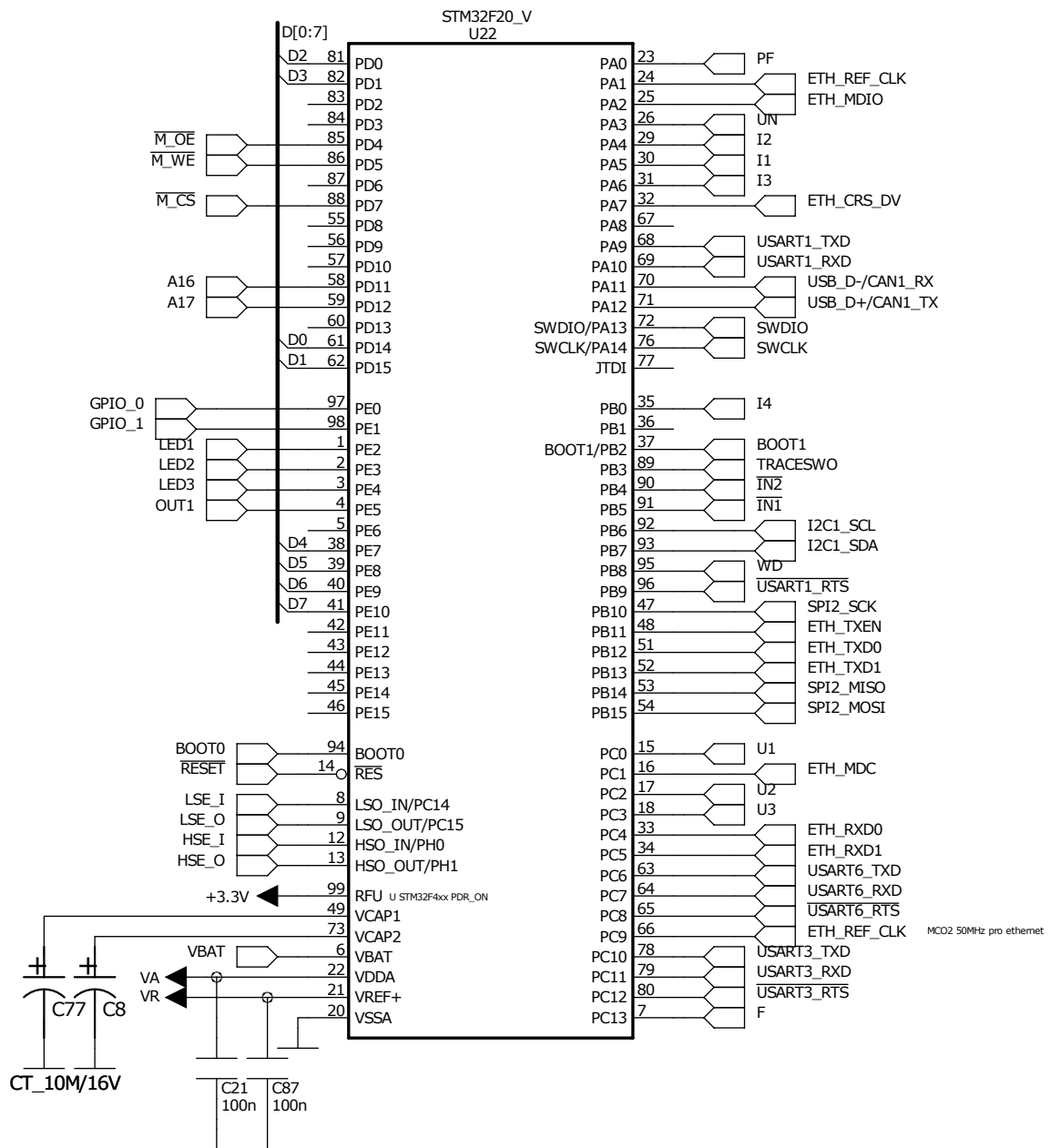
3.3.8 Mikrokontrolér

Přístroj SMC 144 byl s vědomím, že bude použit pro testy výkonu a funkcí nové řady MCU STM32F400 firmy STMicroelectronics, navržen tak, aby mohly být osazeny oba typy mikrořadičů. STMicroelectronics má na svých webových stránkách k dispozici aplikační poznámky, které popisují způsob, jak dosáhnout této univerzálnosti správným návrhem DPS. Jedná se zejména o správné připojení pinů, které se svou funkcí mezi jednotlivými řadami liší. Obvody z řady STM32F400 využívají například pin pro řízení integrovaných obvodů pro dohled nad napájecím napětím, které byly v obvodech řady STM32F200 označeny jako RFU⁸ a nemusely se připojovat.

⁸reserver for future use



Obrázek 16: Spojení zesilovače THS4521 a AD převodníku ADS1278.



Obrázek 17: Zapojení MCU v přístroji SMC 144 revize 1.

Na obrázku 17 je zobrazeno zapojení pinů MCU STM32F20-V pro SMC 144 revize 1, tedy obvodu ve 100 pinovém pouzdře TQFP. Schematická značka má uvedenu poznámku u pinu RFU tak, aby mohla být univerzálně používána s oběma řadami obvodů. Neobsahuje piny napájení. Ty se automaticky připojují k síti pojmenované $+3.3V$ a GND .

Pokud si projdeme připojení pinů zleva dole podle směru hodinových ručiček, začneme s připojením země analogového napájecího napětí $VSSA$, referenčního napětí $VREF+$ a filtrovaného napájecího napětí AD převodníků $VDDA$. Vstup $VBAT$ je připojen k lithiové knoflíkové baterii, která slouží pro zálohu RTC a zálohované části SRAM. Ke vstupům $VCAP$ se připojují elektrolytické kondenzátory, které jsou využívány vnitřním měničem, sloužícím k tvorbě napájecího napětí jádra ARM Cortex-M3/4.

Následuje výše zmiňovaný vstup RFU/PDR_ON a dvojice pinů pro připojení hlavního (25 MHz) a hodinového (32,768 kHz) krystalu. Pin resetu je připojen k RC članku z napájecího napětí a také k programovacímu konektoru. $BOOT0$ slouží k ovládání integrovaného bootloaderu, který umožňuje naprogramování obvodů STM-32F200/400 bez použití speciálního JTAG nebo SWD programátoru.

Signály $D0$ až $D7$ jsou součástí sběrnice, kterou je pomocí FSMC připojena paměť NAND flash. Součástí rozhraní jsou dále signály M_OE , M_WE , M_CS , $A16$ a $A17$. Signál $OUT1$ slouží k řízení digitálního výstupu — optočlenu nebo relé. $LED3$, $LED2$ a $LED1$ jsou po řadě dvě alarmové a stavové LED dioda. Signály $GPIO_0$ a $GPIO_1$ jsou první z popisovaných signálů, které jsou vyvedeny na rozšiřující slot. Tuto skupinu signálů jsem ve schematu pro přehlednost odlišil umístěním vlaječky dále od MCU.

Vstup PF je připojen na dělič ze sítě 5 V a je sledován analogovým watchdogem. Skupina signálů začínajících písmeny $ETH_$ náleží RMII rozhraní pro připojení ethernetového PHY čipu. Signály UN , $U1$, $U2$, $U3$ a $I1$, $I2$, $I3$, $I4$ jsou měřená napětí a proudy přiváděné na integrované AD převodníky.

$USART1_$ jsou označeny signály základní komunikace RS-485. Signály $USB_/CAN1_$ umožňují vytvoření rozšiřujícího modulu s USB konektorem nebo konektorem pro připojení na sběrnici CAN. $SWDIO$ a $SWDCLK$ jsou programovací a ladicí signály rozhraní SWD. Spolu se zemí a napájecím napětím 3,3 V postačí k plnému přístupu k MCU z vývojového prostředí IAR EWARM[20] pomocí emulátoru J-Link[6] od firmy SEGGER.

$BOOT1$ je druhým konfiguračním pinem integrovaného bootloaderu. $TRACE-SWO$ je pomocný signál SWD, umožňující výpis některých ladicích informací v reálném čase bez zásahu do běhu programu. $IN1$ a $IN2$ jsou signály dvou digitálních vstupů. $I2C1_$ přidává rozšiřujícímu slotu možnost osazení součástek využívajících sběrnici I2C. Signál WD slouží k cyklickému resetování externího obvodu watch-

dogu.

Rozšiřující slot obsahu i signály rozhraní SPI díky pinům připojeným k *SPI2* a na konec i jeden vyhrazený USART přes trojici signálů *USART6*. Signály *USART3* jsou připojeny k volitelnému druhému rozhraní RS-485.

Posledním signálem je *F*, který přivádí na pin nastavený pro detekci náběžných hran a vyvolávání přerušení obdélníkový průběh z tvarovače měřeného napětí první fáze a umožňuje měření frekvence.

32-bitové MCU založené na harvardské architektuře s oddělenou vnitřní flash pamětí a operační pamětí se při snaze o zvýšení výpočetního výkonu potýkají s problémem omezené rychlosti čtení z integrované flash paměti. Firma STMicroelectronics přišla počínaje řadou STM32F200 s jádrem ARM Cortex-M3 se zajímavým řešením, díky kterému je možné dosáhnout vyššího výkonu (až 150 DMIPS) i s relativně pomalou vnitřní flash pamětí. Technologie je nazývána ART — Adaptive real-time accelerator. Myšlenka spočívá v tom, že z flash paměti se nečte po 32-bitových slovech, ale do speciální transparentní programového bufferu jsou čteny najednou bloky 128 bitů. Čtení z flash tedy může být realizováno se čtvrtinovou frekvencí vůči rychlosti vykonávání instrukcí.

Vyšší řada obvodů STM32F400 je vybavena jádrem ARM Cortex-M4, který dosahuje ještě vyšších taktů (až 168 MHz), takže při výkonu 1,25 DMIPS/MHz jsou tyto obvody až několikanásobně rychlejší, než obvody řady STR912 aktuálně používané v nejvyšších přístrojích firmy KMB systems, s.r.o. Jádro ARM Cortex-M4 přináší navíc jednotku pro práci s čísly v plovoucí řádové čárce a množinu DSP instrukcí, díky čemuž může v některých funkcích dosahovat až řádového zrychlení výpočtu. Tyto vlastnosti jsou zásadní pro budoucí využití v analyzátoru třídy A, protože ten, jak je zřejmé z kapitoly 2, musí zvládnout kontinuální zpracování většího množství dat.

Přístroj SMPQ 44 s MCU řady STR912 neumožňuje kontinuální vyhodnocování všech harmonických napětí i proudů, protože i přes pečlivě optimalizované funkce není dostatečně výkonný. SMC 144 s tím již nemá problém. V tabulce 7 je pro zajímavost uvedeno, kolik operační paměti je nutné pouze pro vzorkování a ukládání měřených dat. Toto množství dat je nutné zpracovat a vypočítat z nich všechny měřené veličiny každých 400 ms (v přístroji musí být dva buffery — jeden je plněn z AD převodníků, nad druhým jsou prováděny výpočty). Pokud si označíme počet vzorků na periodu N , počet period v měřicím cyklu C , velikost použitého datového typu B a počet měřených kanálů K , potřebné množství operační paměti R pro buffery AD převodníků vypočteme jednoduše

$$R = 2 \cdot N \cdot C \cdot B \cdot K$$

Tabulka 7: Vzorkování signálů a buffery v operační paměti.

N	$N \cdot C$	f_{VZ} [Hz]	B	K	R [B]
128	1280	6400	2	8	40960
128	1280	6400	4	8	81920
256	2560	12800	2	8	81920
256	2560	12800	4	8	163840
512	5120	25600	2	8	163840
512	5120	25600	4	8	327680

přičemž vzorkovací frekvence f_{VZ} AD převodníku je pro síť 50 Hz

$$f_{VZ} = 50 \cdot N$$

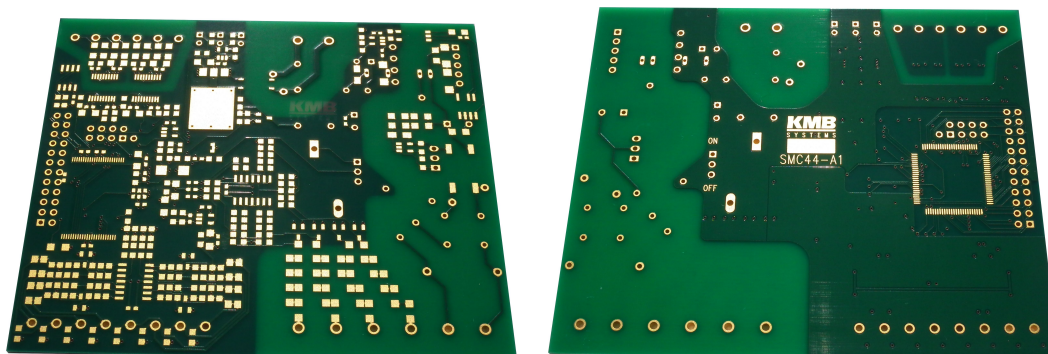
Z tabulky je zřejmé, že pokud bychom chtěli použít starý mikrokontrolér řady STR912 s vnitřní pamětí 96 kB pro měření s vyšší přesností (4 byty/vzorek), tak by už při nejpomalejším vzorkování $N = 128$ téměř nestačila vnitřní operační paměť. Teoretický limit mikrokontroléru řady STM32F200 se 128 kB vnitřní operační paměti je vzorkování $N = 256$ se základní přesností (16-bitový AD převodník) a pro obvody řady STM32F400 je pomyslným limitem $N = 512$ při základní přesnosti nebo $N = 256$ pro 24-bitové převodníky. Bohužel přístroj SMC 144 není vybaven externí SRAM, takže nebylo možné otestovat možnost využití externí paměti připojené přes FSMC pro buffery AD převodníků, čímž by odpadl problém s kapacitou paměti, ale vyvstal nový — mohlo by docházet k problému s rychlostí přenosů, sladění DMA kanálů SPI AD převodníků a komunikace s externí pamětí a pravděpodobně i k citelnému snížení rychlosti výpočtů, pokud by se prováděly v externí paměti.

3.3.9 Paměti

V přístroji SMC 144 je využívána pouze jediná externí paměť kromě vnitřní flash STM32F200/400, vnitřní SRAM a vnitřní zálohované SRAM. Je jí 4 Gb NAND flash paměť NAND04GW382DN6 firmy Numonyx v pouzdře TSOP48. Jedná se o běžnou NAND flash s osmibitovým rozhraním a velikostí stránky 2 kB. Je udávána životnost až 100000 přepisů.

3.3.10 Periferie

Použité MCU využívají integrovaný hlídací obvod (watchdog). Pro dosažení vysoké spolehlivosti a odolnosti proti zamrznutí programu při silném rušení, které v průmyslových podmínkách může snadno nastat, se používá rovněž obvod externího



(a) Spodní strana

(b) Horní strana

Obrázek 18: Fotografie DPS přístroje SMC 144 revize 0.

watchdogu MCP1318[13] od firmy Microchip. Tento obvod sleduje jednak pokles napájecího napětí pod danou mez a jednak signál na svém vstupu WDI, který musí být hlídáným obvodem překlápen v určitém intervalu, jinak obvod pomocí výstupu s otevřeným kolektorem stáhne reset signál MCU a zajistí korektní resetování přístroje.

Pro měření teploty v rozvaděči je použit obvod TMP75[16] od firmy Texas Instruments, umístěný na horní vrstvě při spodním okraji DPS mezi svorkovnicemi pro připojení měřených napětí a proudů tak, aby byl co možná nejméně ovlivněn zdroji tepla v přístroji. Integrovaný obvod v pouzdře MSOP-8 komunikuje s MCU přes I2C rozhraní. Přesnost $\pm 1,5^\circ\text{C}$ postačuje k orientačnímu měření teploty.

Pro komunikaci po sběrnici RS-485 jsou používány obvody ADM2582[9] firmy Analog Devices. Obvod je výjimečný tím, že spojuje v jednom 20-ti pinovém SOIC pouzdře izolační DC/DC převodník (který Analog Devices označuje registrovanou značkou *isoPower*) a RS-485 transceiver. Obvod umožňuje přenášet datové toky s rychlostí až 16 Mb/s. Oddělení primární a sekundární strany je s izolační pevností 2,5 kV po dobu 1 minuty.

3.3.11 DPS

Schema i deska plošných spojů byla vytvořena v softwaru Mentor Graphics PADS. Z důvodu potřeby dosažení dobrých vlastností z pohledu EMC a kvalitního rozvodu napájení byla zvolena čtyřvrstvá konstrukce plošného spoje. Maximální možný počet spojů je veden na spodní straně DPS, kde jsou zároveň osazeny všechny SMT součástky kromě MCU. Z prostorových důvodů a z důvodu minimalizace délky rychlých digitálních spojů jsem MCU a NAND flash paměť osadil na stejné místo z obou stran plošného spoje a dbal jsem zároveň na umístění MCU co možná nejblíže rozšiřujícímu slotu. Umístění všech ostatních SMT součástek na jednu stranu DPS umožňuje snadné zadání výroby spolupracujícím subdodavatelům v Číně. MCU a vývodové

součástky jsou již doosazovány v České republice dle konkrétní varianty přístroje, kterou zákazník požaduje. DPS revize 0 byla pouze prototypovou sérií, takže se kompletně osazovaly ve firmě, je však nutné s touto možností počítat. Na obrázku 18a je fotografie spodní strany DPS.

Na horní straně DPS jsou osazeny všechny vývodové součástky, MCU, šroubovací konektory, programovací hřebínek a slot pro rozšiřující moduly. Signálové spoje na této vrstvě slouží pouze k rozvodu signálů z pinů MCU k prokovům a rozšiřujícímu slotu. Zbylá plocha je využita pro rozlitou měď, která rozvádí napájecí větev 5 V a v části nad vstupními obvody referenční napětí 3,3 V. Dvě vnitřní vrstvy rozvádí zem a digitální 3,3 V napájení po celé ploše DPS. Na obrázku 18b je fotografie horní strany DPS. Můžete si povšimnout, že v době prvního návrhu desky se měl přístroj nazývat SMC 44.

Rozlité mědi samozřejmě nesmí zasahovat do oblastí s nebezpečným napětím a nesmí spojit galvanicky oddělené obvody komunikace a digitálních V/V. K tomu byly využity plochy označované *keepout*. Celý blok spínaného napájecího zdroje musí být pro dodržení požadavků zesílené izolace vzdálen od bezpečných obvodů s minimální povrchovou vzdáleností 5,9 mm.

Základní jemnost plošného spoje, kterou se označuje šířka nejtenčích spojů a nejmenších mezer mezi nimi, je 6 mil. Rozměr DPS je 103x86,5 mm. Materiál desky FR4. Tloušťka mědi na vnějších vrstvách 0,7 mil, izolace mezi vnějšími a vnitřními vrstvami 9 mil, vnitřní vrstvy mědi 1,4 mil a střední základní materiál má tloušťku 39 mil. Spoje na vnějších stranách jsou zlacené a překryté nepájivou maskou.

Běžné pasivní součástky, na které nejsou kladeny žádné výkonové požadavky, jsou ve velikosti 0805. Odporů ve vstupních napětíových děličích, které musí být dimenzovány na vyšší maximální povolené napětí, SMT tantalové kondenzátory a například i bočníky proudových transformátorů jsou ve velikosti 1206. Jediná součástka v menším pouzdře 0603 je 100 nF keramický kondenzátor, který je používán k blokování napájecích nebo referenčních napětí z důvodu nižší parazitní indukčnosti a ušetření místa na DPS.

3.4 Software

Veškerý firmware pro přístroje firmy KMB systems, s.r.o. založené na procesorech ARM je programován ve vývojovém prostředí IAR Embedded Workbench for ARM (IAR EWARM) a překládán pomocí výchozího IAR C Compiler (ICC). Použitý programovací jazyk je výhradně ANSI C s některými rozšířeními ICC a výjimečně assembler.

Kromě základních ANSI C knihoven, které jsou dodávány jako součást balíku IAR EWARM, firmware využívá tzv. standard peripherals library[5], což je sada

zdrojových souborů a hlavičkových souborů, které zásadním způsobem zjednodušují programování a zpřehledňují kód, protože vytvářejí vrstvu funkcí nad samotnými registry MCU tak, že je kód zaprvé přenositelný a za druhé samovysvětlující i bez potřeby komentářů. Standard peripheral library dodává výrobce mikrokontrolérů ST Microelectronics zvlášť pro každou řadu (STM32F100, STM32F200, STM32F400 atd.) a od řady STM32F200 jsou plně kompatibilní se standardem CMSIS[1]⁹. Díky tomu je firmware, který byl pečlivě vytvořen s korektním využitím knihoven standard peripheral library plně přenositelný na vyšší řadu mikrokontroléru nebo mezi různými MCU ze stejné řady.

Tohoto zásadního faktu jsem využil při vytváření nejnižší vrstvy firmwaru, takže stejný firmware je možné nyní překládat a naprogramovat do mikrokontrolérů STM32F205VGT6, STM32F207VGT6, STM32F407VGT6 a mnoha dalších, které jsou pinově kompatibilní se zmíněnými a mají samozřejmě také dostatek operační paměti a programové flash.

Mým úkolem, jako primárně hardwarového vývojáře, bylo zejména vytvoření nového projektu v IAR EWARM, příprava všech potřebných souborů standard peripheral library, vytvoření skriptu pro linker, úprava inicializace jádra, vytvoření funkcí pro inicializaci hardwaru, import a adaptace maximálního množství existujících zdrojových kódů z jiných přístrojů, přeložení firmwaru a jeho oživení s novým hardwarem.

Posledním krokem byla podpora, spolupráce a intenzivní komunikace s hlavním programátorem vyšší vrstvy softwaru, se kterým jsme diskutovali a implementovali některé změny ve způsobu zpracování měřených dat, které umožňuje nový výkonnější hardware.

3.4.1 Inicializace HW

Ještě před tím, než se spustí vykonávání kódu funkce `main.c`, provádí mikrokontrolér nejzákladnější nastavení jádra, časování flash paměti a konfiguraci oscilátorů. K tomu slouží soubor `system_stm32f4xx.c` a funkce `SystemInit()`. Na rozdíl od všech ostatních zdrojových souborů je v tomto prováděno nastavování registrů přímo, bez použití CMSIS funkcí. Prakticky to však není problém, protože toto nejzákladnější nastavení se musí provést vždy na míru hardwaru konkrétní aplikace a mikrokontroléru. Proto je tento soubor jedním z mála, které nejsou společné pro STM32F200 a STM32F400. Výhodou však je, že STMicroelectronics dodává přehledný grafický konfigurační nástroj vytvořený pomocí maker v Microsoft Excel, který umožňuje nastavení oscilátorů, PLL, povolení cache, časování flash a hodinových výstupů. Stiskem tlačítka je poté ve složce nástroje vygenerován zmiňovaný

⁹Cortex Microcontroller Software Interface Standard

soubor *system_stm32f4xx.c*.

Po zmíněném základním nastavení jádra mikrokontroléru následuje skok na začátek funkce *main*. Zde jsou přečteny kalibrační struktury z vyhrazeného bloku programové flash paměti včetně informací, které moduly hardware přístroje má (na základě toho se potom například inicializuje nebo neinicializuje ethernet apod.). Následuje funkce *Hardware_Init()*, kde se provádí nejzásadnější část programu. Jsou zde postupně inicializovány a nastavovány veškeré periferie, časovače, RTC, GPIO, vstupy přerušení, DMA kanály, AD převodníky, I2C, SPI, USART, FSMC, NVIC a watchdog.

Následuje inicializace archivů, načtení informací o výpadku napájení a kontrola archivů. Je inicializován čas, do logu uložena informace o spuštění přístroje, dochází k inicializaci výpočtů, komunikace a stavových LED diod. Odsud program vstupuje do nekonečné smyčky, ve které zůstává až do vypnutí napájení.

3.4.2 Hlavní smyčka

V hlavní smyčce se do nekonečna provádí reset vnitřního i externího watchdogu, sledování komunikačních bufferů, zda nepřišla zpráva a testování proměnné, která je nastavena při zaplnění bufferu AD převodníku. Funkce sledování komunikačních bufferů provede v případě přečtení korektní zprávy její zpracování, přípravu dat a odeslání odpovědi. Samotné přenosy zpráv jak přes USART, tak i ethernet oběma směry probíhají výhradně pomocí DMA a MCU jejich přenosem není nijak zatěžován.

V případě, že je nastaven flag informující o naplněném bufferu AD převodníku, je zavolána funkce *Vypocty_SMC144()* a předány ukazatele na buffery AD převodníku. Po dokončení výpočtů a všech dalších akcí na nich závisejících pokračuje program opět od začátku nekonečné smyčky.

3.4.3 Přerušení

Program využívá několika různých zdrojů přerušení. Prvním z nich je přerušení od časovače *TIM2*, který je nakonfigurován tak, aby generoval přerušení každých 200 μ s. Zde je volána funkce pro kontrolu počítání cyklů měření frekvence, jsou kontrolovány buffery DMA AD převodníků (a tam případně nastavena proměnná spouštějící výpočty), je inkrementován milisekundový timer a timer ethernetu.

Dalším důležitým zdrojem je přerušení od třetího AD převodníku, který je využíván ve funkci analogového watchdogu. Vyhrazeným vstupem AD převodníku je kontinuálně měřeno napětí na děliči z pětivoltové větve přístroje. Při výpadku napájení poklesne nejdříve toto napětí 5 V a až po několika desítkách milisekund začne klesat napájecí napětí 3,3 V, které využívá i MCU. Této doby se využívá k ulo-

žení důležitých dat jako je stav elektroměru a některých dalších proměnných včetně informace o času výpadku do logu. Při detekci výpadku a dokončení všech nevyhnutelných akcí zůstává program v místní nekonečné smyčce, ze které se dostane buď zásahem watchdogu, nebo pravděpodobněji úplným výpadkem a novým spuštěním napájení.

Dalšími zdroji přerušení je obsluha komunikace s I2C teploměrem nebo příchozí data po USARTu.

3.4.4 Výpočty

Po naplnění jednoho z bufferů AD převodníku jsou předána data ke zpracování. To se skládá z mnoha kroků, přičemž některé z nich mohou spouštět další řetězce procesů. Omezím se pouze na vyjmenování základních kroků výpočtů ze dvou důvodů. Jednak nejsem autorem výpočtů a za druhé by jejich podrobný popis vydal na celou další diplomovou práci. Provádí se tedy:

- aktualizace času (minulý běh výpočtů byl před 200 ms)
- založení a inicializace struktur dat potřebných pro výpočty
- korekce fázového závěsu (dle rozdílu pozice vlny získané pomocí DFT)
- úprava změřených dat (ss složka, přenásobení kalibračními konstantami)
- výpočet sum druhých mocnin změřených dat
- výpočty efektivních hodnot
- výpočet jalového výkonu z DFT
- kontrola překročení mezí (detekce saturace)
- zápis výsledků do struktur aktuálních dat
- výpočet FFT
- výpočet THD
- výpočet nesymetrie
- aktualizace interních dat pro výpočty
- aktualizace interních dat archivu
- aktualizace stavu elektroměru
- výpočet průměrných hodnot

- vyhodnocení alarmů
- výpočty kvality a flickeru

V současné době se pracuje na doplňování a modifikacích výpočtů tak, aby použité algoritmy korespondovaly s požadavky definovanými normami, které jsou zmiňovány v kapitole 2.

3.4.5 Archivace

Archiv je ukládán do NAND flash paměti pokaždé, když je připraveno více, než 512 B dat k zápisu. Použitá NAND flash totiž umožňuje provedení maximálně čtyř jednotlivých zápisů do každé stránky o velikosti 2 kB. Poté je možný další zápis až po smazání celého bloku (64 stránek). V případě detekce výpadku jsou veškeré cache archivů z operační paměti uloženy do k tomu vyhrazené oblasti NAND flash tak, aby nemohlo dojít ke ztrátě dat.

V současnosti přístroj SMC 144 ukládá 5 různých typů archivů. Tzv. *MAIN_ARCHIVE* slouží k ukládání všech měřených parametrů sítě, které uživatel chce archiovat s periodou záznamu dle zvolené agregace od 200 ms do 24 hodin. *LOG_ARCHIVE* slouží k ukládání všech nedeterministických jevů, jako jsou výpadky sítě, resety přístroje způsobené watchdogem, změny digitálních vstupů, aktivace alarmů, ale i změna konfigurace uživatelem, nastavení času nebo smazání některých archivů. Význam *ELMER_ARCHIVE* asi nevyžaduje komentář. Zmíním pouze, že ukládaná data elektroměru jsou čtyřkvadrantní včetně čtvrt hodinových maxim a minim s rozdělením dle tarifů. *PQMAIN_ARCHIVE* obsahuje flagy splnění nebo nesplnění limitů agregovaných hodnot dle uživatelských limitů nebo dle normy ČSN EN 50160. Ukládá se se stejnou periodou jako *MAIN_ARCHIVE*. Poslední typ archivu *PQE-VENT_ARCHIVE* slouží k asynchronímu ukládání krátkodobých poklesů nebo přepětí včetně úrovně, začátku a konce jevu a dalších výjimečných jevů tohoto typu.

Stejně tak jako výpočty, i archivace, typy archivů a například i řešení flagů potenciálně chybných dat a jejich interpretace, jsou nyní upravovány tak, aby korespondovaly s požadavky popsány v normách.

3.4.6 Komunikace

Každý přístroj SMC 144 nezávisle na konfiguraci volitelného příslušenství obsahuje základní komunikaci RS-485, která slouží ke kalibraci, nastavení přístroje, odesílání aktuálních a archivních dat. Pro komunikaci s přístrojem se používá firemní protokol KMB long nebo Modbus. Z pohledu MCU probíhá komunikace po rozhraní USART a využívá se softwarově řízené přepínání směru RS-485 transceiveru signálem interně označovaným jako $\overline{\text{RTS}}$. Výchozí nastavení rychlosti USARTu je standardních

9600 b/s a adresa přístroje je nastavena na 250. Aby bylo možné snadno se spojit s přístrojem, jehož adresu neznáme nebo jsme ji zapomněli, deset sekund po zapnutí napájení je vždy základní RS-485 rozhraní nastaveno s těmito parametry. Reaguje však kromě adresy 250 i na adresu, kterou jsme sami nastavili. Díky tomu, pokud běžně používáme rychlost 9600 b/s a na sběrnici není více přístrojů SMC 144, můžeme se k přístroji připojit vždy okamžitě po zapnutí. Po uplynutí 10 s, pokud nedojde k navázání spojení, kterým se limit prodlužuje, dojde k přepnutí na nastavenou komunikační rychlost, která může být nastavena i na více než 230400 b/s.

Volitelně může být přístroj osazen druhou komunikací RS-485, která by měla sloužit k připojení externích modulů analogových a/nebo digitálních V/V. Použitý protokol a způsob řízení externích V/V mám promyšlený, nebyl však ještě schválen ani implementován.

Další možností komunikace je ethernetový modul osazený do rozšiřujícího slotu. S jeho pomocí může být přístroj SMC 144 připojen do LAN a komunikovat rychlostí 10 Mb/s. Použitý ethernetový PHY umožňuje i komunikaci rychlostí 100 Mb/s, tato rychlost je však zbytečně vysoká a klade i vyšší nároky na obsluhu inicializace spojení a kvalitu vedení. Primárním rozhraním RS-485 je přístroji přidělena IP adresa a poté mohou veškeré operace, které umožňuje základní RS-485, probíhat po ethernetu.

4 Praktické výsledky

4.1 Zkušenosti s MCU

Při porovnání práce s mikrokontroléry řady STR912 a s moderními STM32F200/400 se s kolegou programátorem jednohlasně shodujeme v tom, že neexistuje žádný důvod, proč by se ještě někdy měly obvody STR912 používat. Kromě daleko snazšího ladění, v některých případech až řádově vyšší rychlosti, větší operační paměti, množství periférií a jednoduššího napájení jsou obvody STM32F200/400 dokonce i levnější. Jak se ukázalo v provedených testech na hardwaru SMC 144, MCU z řady STM32F400 by měl výkonnostně postačovat pro vyvíjený analyzátor třídy A.

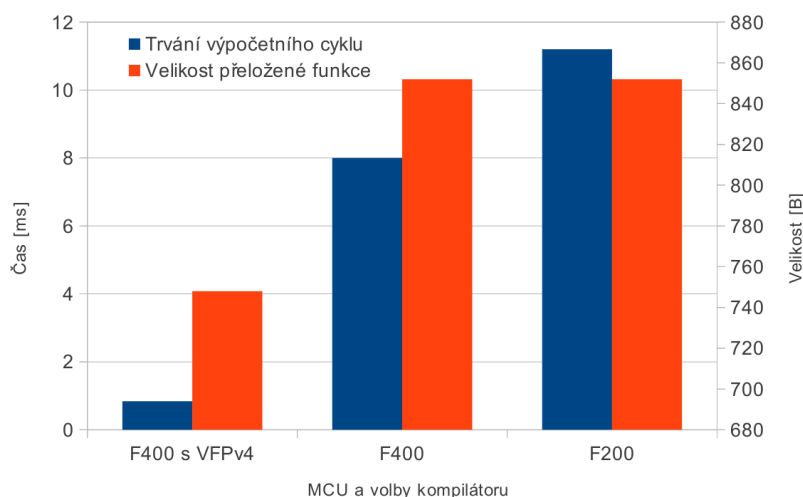
Rozdíl mezi řadami STM32F200 a STM32F400 si můžeme ilustrovat na grafu 19. V grafu jsou zachyceny dva jevy. Prvním z nich (modré sloupce) je srovnání hrubé výpočetní síly při provádění funkcí s řadou výpočtů využívajících datový typ s plovoucí řádovou čárkou. Mezi druhým a třetím sloupcem je rozdíl daný pouze frekvencí jádra mikrokontroléru 120 MHz vůči 168 MHz. První sloupec, kde doba výpočtu je téměř řádově kratší, bylo ve volbách kompilátoru IAR EWARM povoleno využití hardwarové podpory floating point jednotky jádra ARM Cortex-M4 (označováno VFPv4). Srovnatelný skok v rychlosti výpočtů předpokládáme i v případě, kdy by se veškeré výpočty, které jsou nyní silně optimalizovány tak, aby mohly korektně pracovat s pevnou řádovou čárkou, převedly do plovoucí řádové čárky. Zároveň je jisté, že mikrokontrolér bez FPU by takového přechodu při zachování stejné vzorkovací frekvence nemohl být schopen.

Červené sloupce srovnávají velikost přeloženého objektového souboru s testovací funkcí. Díky tomu, že například násobení dvou reálných čísel se základní přesností (32 bitový float) spočívá v případě využití FPU pouze v zápisu operandů do registrů a provedení jedné operace násobení, zatímco MCU bez FPU si musí připravit operandy a zavolat funkci softwarového násobení, dochází i k určité úspoře programové flash paměti. V tomto konkrétním případě se jedná o úsporu přes 10 %, ale je třeba vzít v potaz, že se jedná pouze o srovnání velikosti jednoho malého zdrojového souboru s testovanou funkcí a v případě překladu celého firmwaru bude rozdíl zanedbatelný.

4.2 Testy stability měření

Dva přístroje SMC 144 s deskou revize 0 vybavené ethernetovým modulem jsou již několik týdnů umístěny v budově TUL a slouží k testování stability firmwaru a komunikace. Do dnešního dne v logu ani v archivech nebyl zaznamenán výpadek (kromě výpadků napájení, které samozřejmě nejsou způsobeny chybou přístroje).

Ve firmě KMB systems, s.r.o. bohužel není k dispozici teplotní komora a od doby,



Obrázek 19: Výkon a velikost kódu pro různé řady MCU.

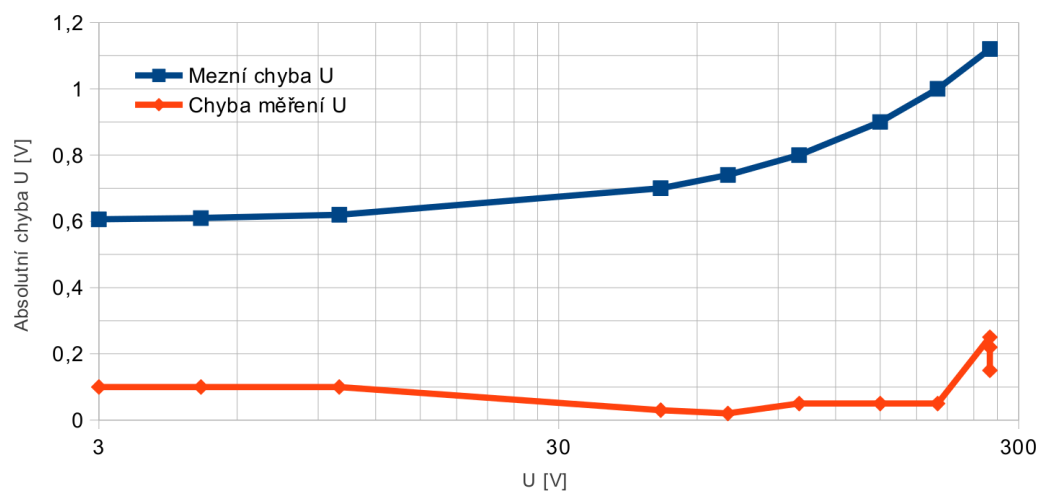
od které přístroj existuje, nebylo možné využít ani extrémních venkovních teplotních podmínek pro vyzkoušení teplotní závislosti měření. Hardwarově nejpodobnější přístroj SMC 33, se kterým byly některé testy teplotní závislosti měření provedeny, vykazoval prakticky zanedbatelný vliv na přesnost měření a můžeme tedy usuzovat, že i v přístroji SMC 144 by byl vliv na přesnost hluboce pod udávanou nejistotou měření.

Je asi pochopitelné, že test časové stability měření taktéž zatím nemohl proběhnout. Několik prvních prototypů přístroje je však nakalibrováno a jejich přesnost se bude moci po delší době kalibrátorem ověřit. Zatím nevykazují měřitelné odchylky.

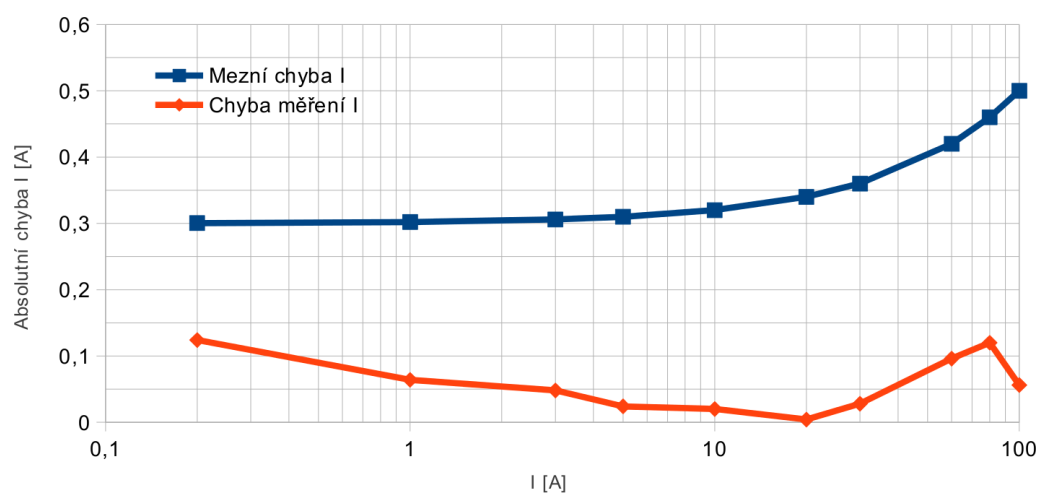
4.3 Přesnosti

S nakalibrovaným přístrojem SMC 144-1-100 (tedy varianta s průvlekovými proudovými senzory JP5W a nominálním proudovým rozsahem 100 A) byly provedeny standardní testy přesnosti pomocí kalibrátoru Fluke 6100A. Byla proměřena přesnost v celém rozsahu proudu i napětí a jejich kombinace při měření výkonů. Činný výkon byl měřen s fázovým posunem mezi napětím a proudem 0° , jalový výkon s posunem 90° . V grafech na obrázcích 20 a 21 je zobrazen i průběh mezních hodnot chyby měření pro splnění přesnosti vyžadované pro analyzátory třídy S, které SMC 144 evidentně splňuje. Tyto limity jsou pro napětí $0,6\text{ V} + 0,2\%$ z měřené hodnoty, pro proud (rozsah 100 A) $0,3\text{ A} + 0,2\%$ z hodnoty a pro výkony 90 W respektive $90\text{ var} + 0,2\%$ z hodnoty.

Na obrázku 22 jsou přenosové charakteristiky vstupního obvodu a filtru napětí a proudu. Na vstup přístroje byly z kalibrátoru přivedeny konstantní napětí 60 V a 5 A s frekvencí, která se přepínala po násobcích 50 Hz. Tím jsme získali v podstatě přenosovou frekvenční charakteristiku kompletních vstupních řetězců. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3.5 obě charakteristiky se měly v ideálním případě shodovat. Pře-

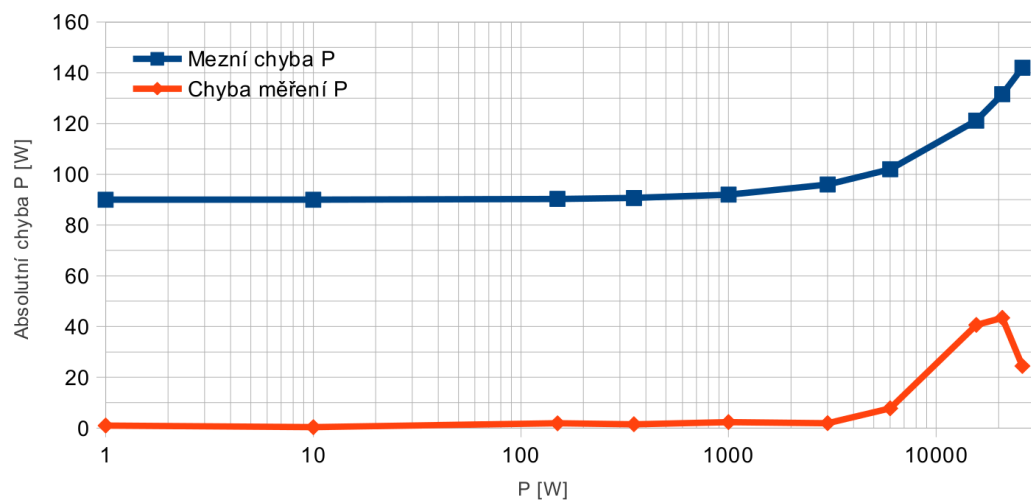


(a) Měření napětí

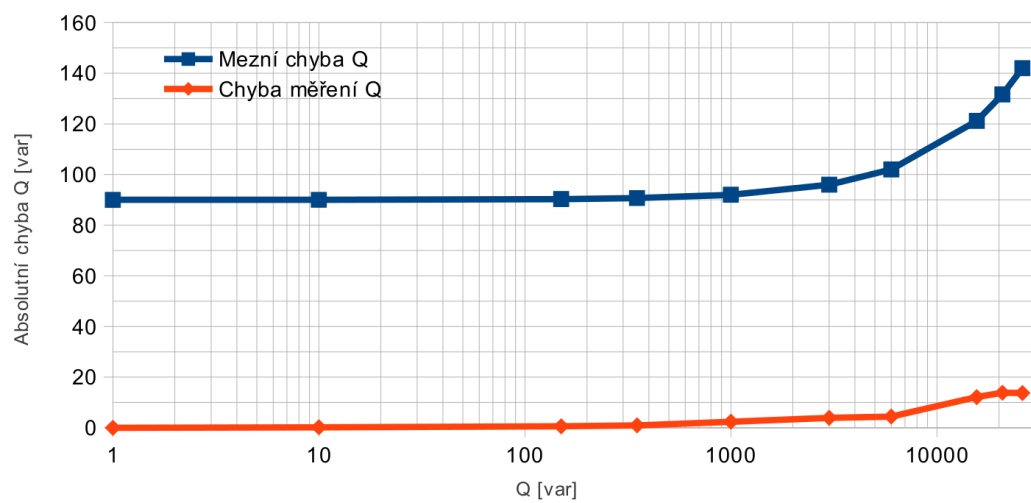


(b) Měření proudů

Obrázek 20: Grafy chyb měření U a I a meze pro třídu S.

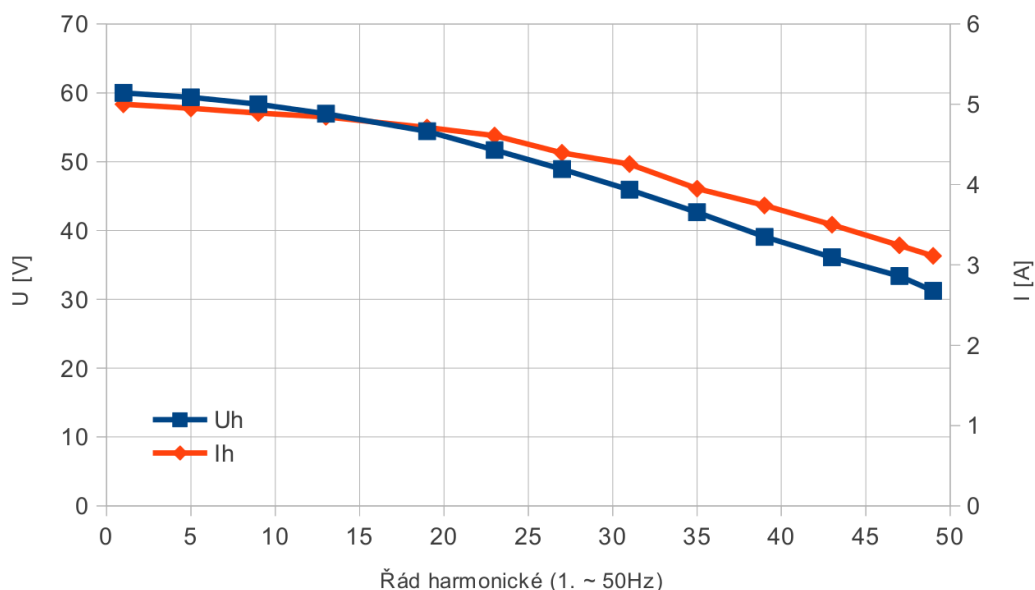


(a) Měření činného výkonu ($PF = 1$)



(b) Měření jalového výkonu ($PF = 0$)

Obrázek 21: Grafy chyb měření P a Q a meze pro třídu S.



Obrázek 22: Přenos harmonických napětí a proudů vstupními obvody..

nosy jsou však ovlivněny mnoha dalšími vlivy, které při simulacích nebyly uvažovány. Nejpodstatnější je samozřejmě výběr součástek z řady hodnot a jejich tolerance, ale i vedlejší parametry některých článků vstupního řetězce, jako jsou proudové transformátory apod. Dalším významným vlivem je nutnost pro každý proudový rozsah provádět hardwarovou kalibraci fázového posunu pomocí změny kondenzátoru v jednom z RC článků proudového filtru tak, aby napětí a proud, které jsou na vstupu ve fázi, byly ve fázi i na vstupech AD převodníků. Naštěstí žádné ze zmíněných zjednodušení nebo vlivů nemá ve výsledku na měření vliv, protože na základě pečlivě proměřených přenosových charakteristik jsou vypočítány kalibrační polynomy pátého stupně, kterými se jednotlivé harmonické přenásobují a tím se koriguje útlum antialiasing filtrů a dalších obvodů. Kdybychom provedli stejné měření již s aktivní korekcí harmonických, v grafu by byly dvě vodorovné přímky na 60 V a 5 A.

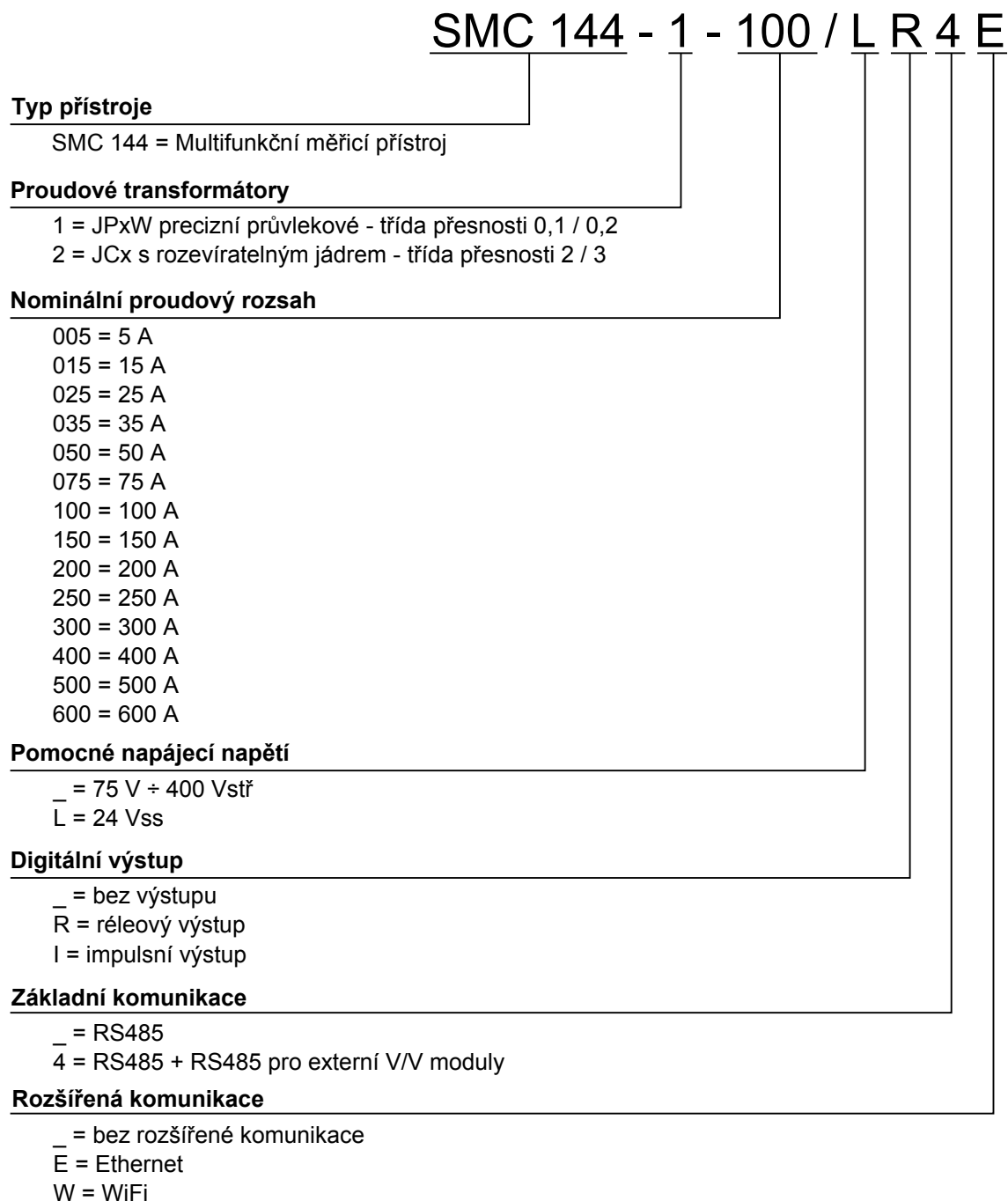
Problém, se kterým se u SMC 144 výrazně potýkáme, je vysoký šum v měřených signálech. Při zobrazení průběhů vln v softwaru ENVIS.Daq je zřetelné, že na první pohled stochastický šum nabývá špičkových hodnot v řádu až desítek LSB AD převodníku. Při měření proudů a napětí blízkých nominálním hodnotám se tento šum prakticky neprojevuje a „vyprůměruje se“ v efektivních a agregovaných hodnotách. Ovlivňuje však harmonické, které mají náhodnou nenulovou hodnotu. Problém nastává při měření malých proudů v hodnotách jednotek procent z nominální hodnoty, kdy se výchylka způsobená měřeným proudem začíná ztrácet v šumu a efektivní hodnota proudu dává větší než skutečné hodnoty. V důsledku se pak může elektroměr velice pomalu inkrementovat i v případech, kdy přístroj neměří žádný proud. Tato chyba byla identifikována a v revizi 1 bude ošetřena úplně jiným řešením zdrojů referenčního a dalších pomocných napětí.

V přístroji třídy A by podobný šum v měřených signálech nepřípadal v úvahu. Na druhou stranu by však ani neměl šanci vzniknout, protože externí sigma-delta převodníky musejí používat precizněji řešené napět'ové reference, jejich vstupy jsou řešeny plně diferenciálně, plánované operační zesilovače mají o mnoho desítek dB větší potlačení souhlasného rušení a co je nejdůležitější, sigma-delta převodníky se už z principu chovají jako digitální filtry vysokého řádu a vysokofrekvenční rušení takové, jaké se objevuje v měřených průbězích signálů u SMC 144, by bylo odfiltrováno.

4.4 Uvedení SMC 144 na trh

Přístroj byl poprvé oficiálně představen na výstavě Hannover Messe v týdnu 23. až 27. dubna 2012. Sklidil velký ohlas a ukázalo se, že přístroj tohoto typu je na trhu žádoucí. Stal se součástí produktového katalogu přístrojů firmy KMB systems, s.r.o. a přístroj v revizi 0 je nabízen ve variantách dle objednáč'ího schematu na obrázku 23. Z výstavy jsme si odvezli několik poptávek.

V České republice byl ještě před tím jeden přístroj nasazen v Praze v datovém centru společnosti ha-vel, kde slouží ke sledování odběru dvou napájecích uzlů pro servery s indikací blížícího se překročení nastaveného limitu proudu. Firma TECHSYS, která již v minulosti používala hardware některých přístrojů firmy KMB systems, s.r.o. a vytvářela si vlastní firmware, má zájem o podobné využití hardwaru SMC 144 a již mají k dispozici jeden z prvních prototypů varianty pro malé napájecí napětí. Německá společnost SOLON, zabývající se kromě jiného zelenou energií a solárními panely, má zájem o využívání DPS SMC 144 ve svých strojích. Hardware SMC 144 se ukázal být vysoce flexibilním a univerzálním modulem v mnoha aplikacích. K dalšímu vylepšení dojde po dokončení revize 1, která přidá volitelné dva digitální vstupy a možnost pětivodičového měření napětí.



Obrázek 23: Objednací schema přístroje SMC 144..

Závěr a budoucí vývoj

Během práce na projektu vývoje analyzátoru kvality elektrické energie třídy A, která je z části popsána v této zprávě, jsem se seznámil se souvisejícími normami, s konkurenčními přístroji a požadavky zákazníků, distributorů a výrobců elektrické energie.

S vedoucím práce jsme se shodli na rozdělení vývoje do několika etap. V první etapě se podařilo navrhnout, vyrobit, oživit a používat nový levný analyzátor kvality elektrické energie SMC 144 postavený na moderní platformě mikrokontrolérů firmy STMicroelectronics. Přístroj je díky použití univerzálního rozšiřujícího slotu možné flexibilně doplňovat o další periferie. Již byl navržen a odzkoušen rozšiřující ethernetový modul.

Na novém hardwaru v současné době probíhá doplňování algoritmů převzatých z analyzátoru SMPQ 44 do podoby, která koresponduje s požadavky na způsoby vyhodnocování měřených dat dle normy ČSN EN 61000-4-30 [22] pro přístroje třídy A. Připravovaný firmware je vytvářen díky dodržování standardů CMSIS tak, že bude po dokončení finálního hardwaru velice snadno přenositelný na větší mikrokontrolér z řady STM32F400.

Jako vystavovatel jsem se zúčastnil dvou veletrhů — v březnu 2012 výstavy AMPER[2] v Brně a poté v dubnu obrovského veletrhu HANNOVER MESSE[3] v Německu, kde byl analyzátor SMC 144 oficiálně představen a sklídl pozitivní ohlasy. Na základě zkušeností z výstav a zpětné vazby od zákazníků dokončuji revizi desky plošných spojů přinášející další funkční vylepšení.

V současné době dokončuji manuál k přístroji SMC 144 a během nejbližších dní budou předány do výroby podklady pro výrobu nové revize desek plošných spojů. Nový hardware bude poté podroben veškerým potřebným testům EMC ve zkušebně a zařazen do běžného výrobního sortimentu firmy KMB systems, s.r.o.

Již současný hardware SMC 144, jak bylo ukázáno v kapitole praktických výsledků, s rezervou splňuje požadované přesnosti třídy S, v jejímž rámci se bude i prezentovat zákazníkům. Na základě doposud provedených měření a testů je možné přístroj nasadit v aplikacích kontinuálního měření kvality elektrické energie, pro podružné měření energie nebo jako inteligentní měřicí přístroj s možností řízení digitálního výstupu na základě hodnot nastavených parametrů sítě. Nově byla doplněna funkce záznamu navzorkovaných vln při překročení nastavených limitů.

Po dokončení zmíněných formalit přijde na řadu další etapa vývoje analyzátoru třídy A, tedy návrh hardwaru s měřicím řetězcem, jehož předběžně vybrané komponenty jsem zmínil v kapitole implementace. Jedná se zejména o použití špičkových vstupních diferenciálních zesilovačů a externích precizních sigma-delta AD převodníků.

V první fázi druhé etapy vývoje se opět začne s přístrojem bez displeje, bude se však již počítat s jeho budoucím doplněním. Pravděpodobně bude použito jiné konstrukční řešení, než u přístroje SMC 144. Krabíčka na DIN lištu bude nahrazena větší krabíčkou s rozměrem 144x144 mm do panelu a taktéž se již nebude jednat o jednodeskové provedení.

Následnému vývoji analyzátoru třídy A se budu nadále věnovat jak pracovně, tak případně i v rámci doktorského studia. Zdá se totiž, že v blízké době bude docházet k dalším zpříšňováním a změnám v definicích a požadavcích na analyzátory nejvyšší třídy a prostoru pro vývoj je v této oblasti více než dostatek.

Použitá literatura a prameny

- [1] Domovská stránka standardu CMSIS [online].
URL <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-microcontroller-software-interface-standard.php>
- [2] Oficiální stránky výstavy Amper Brno [online].
URL <http://www.amper.cz/>
- [3] Oficiální stránky výstavy Hannover Messe [online].
URL <http://www.hannovermesse.de/>
- [4] PowerStandardLab – Power Quality Measurement Methods [online].
URL <http://www.powerstandards.com/IEC-61000-4-30.php>
- [5] Standard peripheral library pro obvody STM32F200 [online].
URL http://www.st.com/internet/com/SOFTWARE_RESOURCES/SW_COMPONENT/FIRMWARE/stm32f2xx_stdperiph_lib.zip
- [6] Stránka podpory emulátoru SEGGER J-Link [online].
URL <http://www.segger.com/jlink.html>
- [7] Stránka podpory integrovaných měničů Traco Power [online].
URL <http://www.tracopower.com/products/dc-dc-converters/sip-package/>
- [8] Stránka podpory krabiček ModuleBox firmy Camden [online].
URL <http://www.camdenelec.com/electronics/product-subcategory.asp?Category=ENCLOSURES&Sub=Din%20Rail%20standard%20and%20extended%20height%20module%20boxes>
- [9] Stránka podpory obvodu ADM2582 [online].
URL <http://www.analog.com/en/interface/digital-isolators/adm2582e/products/product.html>
- [10] Stránka podpory obvodu ADS1278 [online].
URL http://www.ti.com/product/ads1278?DCMP=analog_signalchain_mr&HQS=ads1278-pr
- [11] Stránka podpory obvodu KSZ8001L [online].
URL http://micrel.com/page.do?page=product-info/fastether_trans.jsp

- [12] Stránka podpory obvodu LM2937 [online].
URL <http://www.ti.com/product/lm2937>
- [13] Stránka podpory obvodu MCP1318 [online].
URL <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en024830>
- [14] Stránka podpory obvodu STM32F407VGT6 [online].
URL <http://www.st.com/internet/mcu/product/252140.jsp>
- [15] Stránka podpory obvodu THS4521 [online].
URL <http://www.ti.com/product/ths4521>
- [16] Stránka podpory obvodu TMP75 [online].
URL <http://www.ti.com/product/tmp75>
- [17] Stránka podpory obvodu TPS76333 [online].
URL <http://www.ti.com/product/tps76333>
- [18] Stránka podpory přístroje třídy A Fluke 1750 [online].
URL <http://www.fluke.com/fluke/czcs/pomucky-pro-kvalitu-site/trifazove/fluke-1750.htm?PID=56030>
- [19] Stránka softwaru Microchip FilterLab V2.0 [online].
URL http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010007
- [20] Stránka vývojového prostředí IAR EWARM [online].
URL <http://www.iar.com/en/Products/IAR-Embedded-Workbench/ARM/>
- [21] Webové stránky firmy KMB systems, s.r.o. [online].
URL <http://www.kmb.cz/index.php/cs/>
- [22] CENELEC (editor): *ČSN EN 61000-4-30 ed. 2, Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-30: Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [23] CENELEC (editor): *ČSN EN 61000-4-7 ed. 2, Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-7: Zkušební a měřicí technika - Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojená do nich*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [24] CENELEC (editor): *ČSN EN 50160 ed. 3, Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha: Český Normalizační Institut, 2010.
- [25] CENELEC (editor): *ČSN EN 61000-4-15 ed. 2, Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-15: Zkušební a měřicí technika - Flickrmetr - Specifikace funkce a dimenzování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Nomenklatura

AD	Analog Digital — analogově číslicový
ARM	Advanced RISC Machine — architektura CPU a MCU
DC/DC	převod ss napětí na jiné nebo izolované ss napětí
DFT	Discrete Fourier Transform — diskrétní fourierova transformace
DMA	Direct Memory Access — přímý přístup periférií k paměti
DPS	Deska Plošných Spojů
EMC	ElectroMagnetic Compatibility — elektromagnetická kompatibilita
FPU	Floating Point Unit — jednotka pro práci s čísly s plovoucí řádovou čárkou
FSMC	Flexible Static Memory Controller — řadič pro připojení paralelních externích pamětí k obvodům STM
GPIO	General Purpose Input Output — univerzální V/V pin MCU
I2C	Inter-Integrated Circuit — adresovatelná sériová sběrnice
JTAG	Joint Test Action Group — standardní programovací a ladicí rozhraní
LAN	Local Area Network — místní síť
LED	Light Emmiting Diode — světelná dioda
LSB	Least Significant Bit — nejméně významný bit
MAC	Media Access Control — označení obvodu s linkovou vrstvou rozhraní
MCU	Micro Control Unit — mikrokontrolér (kombinace ALU, flash, RAM, periférií)
NAND	v současnosti nejběžnější technologie velkoobjemových flash pamětí
nm	Nízké Napětí, jehož jmenovitá efektivní hodnota je $< 1\text{kV}$
NVIC	Nested Vectored Interrupt Controller — prioritní řadič přerušení
PHY	Physical Layer — zkratka pro označení obvodu fyzické vrstvy rozhraní
PLL	Phase Locked Loop — obvod fázového závěsu
RAM	Random Access Memory — paměť s přímým přístupem
RJ-45	osmipinový konektor používaný s UTP a STP kabely v LAN

RMI Reduced Media Independent Interface — rozhraní pro spojení MCU a PHY
 ROM Read Only Memory — paměť pouze pro čtení
 RS-485 standard průmyslové sériové sběrnice komunikace
 RTC Real Time Clock — obvod reálného času
 RTS Ready To Send — signál připravenosti k odeslání dat
 SAR Successive Approximation Register — obvod s postupnou aproximací
 SDHC Secure Digital High Capacity — formát paměťové karty
 SMT Surface Mount Technology — technologie součástek pro povrchovou montáž
 SPI Serial Peripheral Interface — plně duplexní sériová linka
 SRAM Static Random Access Memory — statická RAM
 ss StejnoSměrné
 STP Shielded Twisted Pair — stíněná kroucená dvojlinka
 SWD Single Wire Debug — alternative JTAG s pouhými čtyřmi vodiči
 THD Total Harmonic Distortion — celkové harmonické zkreslení
 UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter — univerzální asynchronní sériová linka
 UPS Uninterruptible Power Supply - nepřerušitelný zdroj energie
 UTC Coordinated Universal Time — koordinovaný světový čas
 UTP Unshielded Twisted Pair — nestíněná kroucená dvojlinka
 V/V zkratka Vstupy/Výstupy, anglicky I/O
 VF Vysoko Frekvenční
 vn Vysoké Napětí, jehož jmenovitá efektivní hodnota je v rozmezí 1kV a 36kV
 vvn Velmi Vysoké Napětí, jehož jmenovitá efektivní hodnota je $> 36\text{kV}$
 WiFi Wireless Fidelity — typ bezdrátové sítě