

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 669*

*ISSN 1213-418X*

**Jiří Drápela**

**MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE  
STATICKÝMI ELEKTROMĚRY  
V PODMÍNKÁCH AKTIVNÍCH  
DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE  
STATICKÝMI ELEKTROMĚRY V PODMÍNKÁCH  
AKTIVNÍCH DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV**

ELECTRICITY METERING BY MEANS OF STATIC REVENUE METERS  
DEPLOYED IN ACTIVE DISTRIBUTION SYSTEMS

TEZE PŘEDNÁŠKY  
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU  
SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA A ELEKTROENERGETIKA



BRNO 2020

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

elektroměr, smart metering, smart grid, metrika energie, výkonová teorie, rychlé změny směru toku energie, harmonické zkreslení, vysokofrekvenční vedené symetrické rušení, odolnost elektroměrů chyba měření, nejistota měření, testování

## **KEYWORDS**

revenue meter, smart metering, smart grids, energy metrics, power theories, fast energy flow direction changes, harmonic distortion, supraharmonics, immunity, measurement error, measurement uncertainty, testing

© Jiří Drápela, 2020

ISBN 978-80-214-5900-7

ISSN 1213-418X

# OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 KONSTRUKCE, METRIKA A VLASTNOSTI STATICKÝCH DIGITÁLNÍCH ELEKTROMĚRŮ .....	9
2.1 Konstrukce .....	9
2.2 Metriky a jejich vlastnosti.....	11
2.2.1 <i>Metriky činného výkonu a činné energie</i> .....	14
2.2.2 <i>Metriky jalového výkonu a jalové energie</i> .....	16
2.2.3 <i>Metriky velikosti napětí a proudu</i> .....	18
3 ODEZVA STATICKÝCH ELEKTROMĚRŮ V PODMÍNKÁCH AKTIVNÍCH DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV.....	19
3.1 Odezva ELM na rychlé změny směru toku činné energie .....	19
3.2 Frekvenční odezva ELM v měření činné energie.....	21
3.3 Odolnost ELM na supraharmonické v pásmu 2 - 150 kHz.....	22
4 ZÁVĚR .....	25
LITERATURA .....	25

## O AUTOROVI



**Jiří Drápela**, doc. Ing. Ph.D.  
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně  
Technická 3082/12, 61600 Brno, ČR  
Tel.: +420 541 146 211  
Email: drapela@feec.vutbr.cz  
www: <https://www.vutbr.cz/en/people/jiri-drapela-2924>

Narozen 10. února 1976 v Novém Městě na Moravě. V roce 1999 absolvoval na Fakultě elektrotechniky a informatiky VUT v Brně obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika. V roce 2006 dokončil na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií doktorské studium s tématem disertační práce: „Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť“ a v roce 2010 se habilitoval s tématem habilitační práce: „Blikání světelných zdrojů způsobené meziharmonickými složkami napětí“.

Od roku 2010 vykonává funkci zástupce vedoucího Ústavu elektroenergetiky, působí v Centru výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie na FEKT VUT v Brně, a je vedoucím laboratoře Kvality elektrické energie a nízkofrekvenční EMC.

Ve své práci se obecně věnuje problematice kvality elektrické energie; nízkofrekvenční EMC s rušením šířeným po silových vedeních; měření a analýze dat; automatizaci řízení distribučních sítí a souvisejícím autonomně řízeným procesům. Zabývá se jak modelováním a simulacemi výkonových elektrických systémů, tak i návrhem technických řešení a praktickými realizacemi. Odborná činnost je zaměřena na spolupráci s akademickou i aplikační sférou, tuzemskou i zahraniční.

Pedagogická činnost byla od roku 1999 zaměřena postupně na elektrotepelnou techniku, osvětlovací soustavy až po oblast provozu sítí a kvalitu elektrické energie. V současné době je garantem a/nebo přednášejícím předmětů Spotřeba a užití elektrické energie, Kvalita elektrické energie a EMC 1, Diagnostika v elektroenergetice a Počítače a programování 2. Byl vedoucím 24 bakalářských a 44 magisterských obhájených prací. Do současnosti byl také vedoucím stáží 11 zahraničních studentů (Francie, Brazílie, Itálie). Během svého působení na FEKT VUT v Brně vychoval 1 doktoranda. Jako garant a lektor se také podílel na výuce v rámci řady odborných seminářů a školení pořádaných pro pracovníky průmyslových partnerů.

V letech 2003 až 2019 byl postupně úspěšným řešitelem projektů GAČR, projektů pro rozvoj vzdělávání FRVŠ, projektů TAČR a řady projektů smluvního výzkumu.

Je autorem nebo spoluautorem 5 kapitol ve vědeckých a odborných knihách, 10 článků ve vědeckých a odborných časopisech a více než 100 článků v konferenčních sbornících. Za významné lze také považovat spoluautorství dvou standardů IEEE (IEEE Std 1789™-2015 and IEEE Std 1453™-2015). Jeho výzkumná práce se stala základem standardu IEC TR 61547-1. Dále je spoluautorem jednoho národního užitého vzoru (UV 29472/2016), autorem 3 licencovaných SW, a několika prototypů/HW řešení pro průmysl.

Doc. Drápela je členem profesních mezinárodních organizací - IEEE (od 2007-Member, 2016-Senior Member), CIGRE (od 2008) a CIRED (od 2006) a aktivním členem řady národních (ČK CIRED) a mezinárodních (IEEE, CIRED) pracovních skupin.

# 1 ÚVOD

Měření množství a případně i dalších parametrů elektrické energie v předávacích místech mezi obchodními subjekty je nedílnou součástí provozování a využívání střídavé (AC) elektrizační soustavy. Ve spojitosti s ekonomickým významem a hospodařením s elektrickou energií je zásadní znalost množství elektřiny, která je předána.

Za tímto účelem byl vyvinut, zkonstruován a výhradně využíván elektromechanický elektroměr činné energie pracující na elektrodynamickém indukčním principu [1]. Indukční elektroměr prostřednictvím svého, z principu analogového, jedno-soustavového měřicího ústrojí implementuje dobovou a obecně přijímanou představu o povaze přenosu činné energie v AC soustavě, kterou registruje/kumuluje kontinuálně v čase, v souladu s očekávaným/předpokládaným množstvím. Z praktických důvodů a za zjednodušujících předpokladů způsobu využívání AC tří-fázové (3F) soustavy, byl sestaven 3F indukční elektroměr, jako jeden kompaktní přístroj, s přirozenou součtovou integrací přírůstku energie z více integrovaných měřicích elektromagnetických soustav na jeden mechanicky vázaný registrační systém. V souladu s Blondelovým teorémem [2] a způsobem provozování 3F soustavy (uzemněná: tří- nebo pěti-vodičová, nebo izolovaná: tří-vodičová) [3], tvoří měřicí ústrojí 3F elektroměru tři, resp. dvě soustavy elektromagnetů [1]. Jednoznačné a neměnné zapojení elektroměru v soustavě také určuje, v závislosti na směru přenosu elektřiny, směr momentu působícího na rotační ústrojí a tudíž směr jeho otáčení, s dopadem na hodnotu kumulované energie v registračním ústrojí. Standardní provedení a značení elektroměrů ve smyslu spotřebičové konvence vede k inkrementaci energie v registru, pokud je energie odebírána spotřebiči. Pokud je ale elektroměr vystaven exportu elektřiny, namísto importu, vede to bez dalších opatření k dekrementaci registrované/kumulované hodnoty. Správné rozlišení a průběžná fixace množství importované a exportované energie jsou důležité z obchodních důvodů. Dodatečným technickým řešením je u indukčních elektroměrů brzda proti zpětnému chodu a registrována je tak energie pouze ve směru zapojení, v souladu se spotřebičovou konvencí.

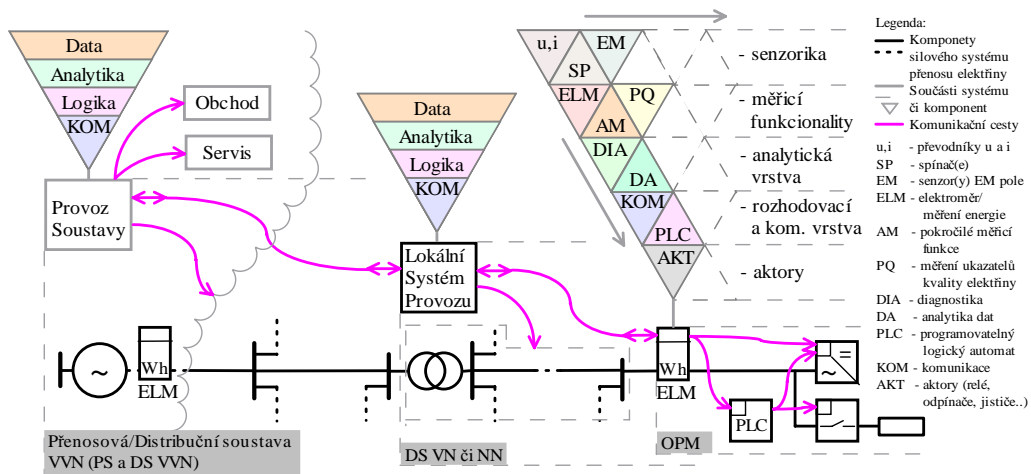
Popis mimo jiné poukazuje na skutečnost, jak jednoúčelovým měřicím přístrojem elektromechanický elektroměr činné energie je. V případě, že je vedle spotřebovaného množství elektřiny třeba měřit i množství dodané, je nutné použít dvě měřidla s odpovídajícím zapojením. Pokud je nezbytné měřit ve třech nezávislých 1F odběrných a předávacích místech (OPM) s importem i exportem elektřiny, je nutné použít šest 1F indukčních elektroměrů s brzdou proti zpětnému chodu. Navíc v běžné praxi je požadavek na měření dalších ukazatelů spojených s výrobou, přenosem a distribucí elektřiny, které jsou řešeny opět samostatnými jednoúčelovými měřidly specializovaných konstrukcí. Setkáváme se tak s elektroměry jalové energie, specificky induktivního a kapacitního charakteru, elektroměry na měření ztrát ( $I^2t$ ), dalšími integračními měřidly pro ohodnocení nesouměrnosti fázového zatížení, apod. Výsledná měřicí sestava/souprava specializovaných elektromechanických přístrojů, například i pro měření okamžitých parametrů (výkony, účinnky, velikosti napětí a proudů, frekvence, apod. [4]), může být značně prostorově rozsáhlá. Přitom k dispozici byly měřené hodnoty pouze aktuální, bez záznamu průběhu v čase. Záznamové analogové systémy s průběžným zápisem na papírový nosič byly jen výjimečné.

Elektroměry ve svém elektromechanickém provedení zaznamenaly, od počátku 20. století až do současnosti, z dnešního pohledu minimální vývoj funkcionalit. Změna v možnostech přišla až v 70. letech s rozvojem elektronických komponent a integrovaných polovodičových analogových a digitálních obvodů. V prvním sledu byly vyvinuty elektroměry hybridní konstrukce, kombinující měřicí ústrojí standardního elektroměru s elektronickým registrem [5]. Následně přišly plně statické elektroměry, které snímají průběhy okamžitých hodnot napětí a proudu a elektronickými obvody implementují metriku výpočtu přírůstku a kumulace energie v souladu s odezvou elektromechanických elektroměrů. První generace statických elektroměrů z 80. a 90. let využívá analogovou implementaci výpočtu, kdy výsledkem zpracování analogových upravených vstupních signálů napětí a proudu je analogový signál úměrný (například) činnému výkonu, který je následně

integrován pro účely kumulace činné energie [4]. Jedná se v zásadě o elektronický převodník napětí a proudu na činný výkon, resp. činnou energii. Takové elektroměry lze označit za elektronické, do značné míry stále jednoúčelové. U elektroměrů z těchto let se často setkáváme s bubínkovým registračním ústrojím, jako u indukčních elektroměrů, s převodem signálu energie zpět na rotační pohyb.

Za zásadní, z hlediska vývoje měřicích vlastností a možností elektroměrů, lze považovat digitalizaci měřicího procesu. Digitální elektroměry, zaváděné od konce 90. let, využívají analogový front-end pro úpravu měřených signálů napětí a proudu s navazujícími digitizéry, A/D převodníky, a se zpracováním diskrétních signálů ve smyslu implementované metricky [4], [6]. Tak jako jiné digitální měřicí přístroje, i digitální elektroměr disponuje, z hlediska integrace měřicích funkcionalit, značnou flexibilitou. Vedle základního měření činné energie elektroměrem (ELM), mohou realizovat měření rozšířené (AM), nebo specializované, například měření ukazatelů kvality elektriny/napětí (Power/Voltage Quality) (PQ/VQ). Zatímco AM znamená měření dalších parametrů: energie jalové či zdánlivé, s rozlišením směru toku složek energie, složek výkonů, efektivní (RMS) velikosti napětí a proudů, frekvence, apod., PQ měření se zaměřuje například na: frekvenční složky, nesymetrii a kolísání napětí, napěťové události (zvýšení napětí, poklesy, přerušení), s hodnocením kvality napětí podle [7]. Integrované statické paměti digitálních přístrojů také umožňují ukládat značné množství měřených a dalších odvozených, procesních, nebo stavových dat. Vedle kumulovaných hodnot energií, jsou/mohou být ukládány i hodnoty či jejich časové řady (profily) všech měřených parametrů veličin s různou agregací, dnes nejčastěji do 15 minutových hodnot, se záznamem do odpovídajících registrů v souladu s definicí OBIS (Object Identification System) kódů [8].

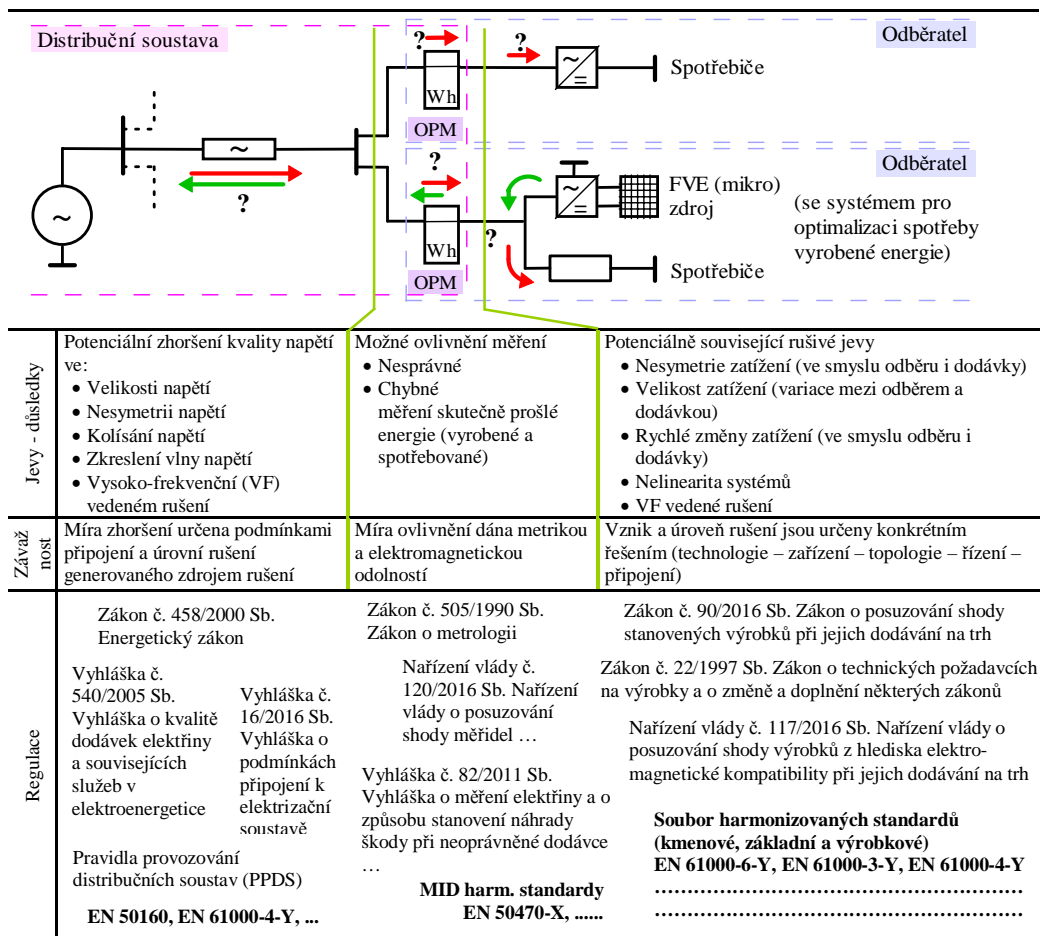
Spolu s vývojem statických digitálních elektroměrů, byly také postupně implementovány komunikační prostředky pro obousměrnou vzdálenou digitální komunikaci s elektroměry využívající řadu standardních komunikačních formátů [4]-[6]. Komunikace byla realizována, v souvislosti s výbavou a možnostmi elektroměrů, nejprve v jednodušší formě s dálkovým odečtem měření a stavů elektroměrů a omezeným zpětným povelováním - AMR (Automatic Meter Reading), a následně s rozšířením využívajícím plně možnosti vybavení novějších generací elektroměrů - AMM (Advanced Metering Management). Právě integrací obousměrné komunikace a rozšiřováním výbavy a funkcionalit elektroměry vstoupily do éry chytrého měření - SM (smart metering), se značným potenciálem pro monitoring a řízení distribučních soustav (DS), Obr. 1.



Obr. 1. Přehledové schéma vrstev monitorování a řízení (distribuční) soustavy pomocí (dat z) chytrých elektroměrů a související infrastruktury - AMI (Advanced Metering Infrastructure)

Chytré elektroměry současných generací, jako základ měřicí infrastruktury - AMI (Advanced Metering Infrastructure) a důležitá součást budoucích DS - SG (Smart Grid), jsou nejenom zdrojem dat, které jsou nositelem informace o stavu systému, ale jsou i prostředkem pro realizaci řízení na OPM v souladu s případnými potřebami DS i zákazníka. Možnosti využití SM pro dosažení předpokládaných ekonomicky motivovaných cílů, [9] a [10], se dále rozvíjí implementací pokročilých analytických a diagnostických funkcí nad měřenými daty, integrací programovatelného logického automatu s rozhodovací vrstvou pro autonomní řídicí funkce, či instalací silových a signálových rozhraní pro účely základní automatizace procesů na OPM (Obr. 1). V současné představě je chytrý elektroměr zařízením komplexní instrumentace sdružující množství běžně samostatných přístrojů a zařízení. Nicméně vybavenost SM dostupných na trhu je různorodá, z hlediska nastaveb nad základní funkci elektroměru nestandardizovaná, a podléhající ekonomické oprávněnosti nasazení/účelu použití.

Současně s vývojem statických elektroměrů však probíhá i změna prostředí, ve kterém plní svou funkci, především na úrovni nízkého napětí (NN). Značným způsobem postupně narůstá podíl zařízení v OPM s polovodičovými měniči, které jsou původcem celé řady rušení [11], [12], jimž jsou elektroměry vystaveny. Situaci přehledově dokumentuje Obr. 2.



Obr. 2. Situační schéma a vymezení souvislostí připojení a provozování OPM a související regulace (výběr) pro dosažení očekávané, "správné" a řádné funkce systému



Intenzivnější změny lze potom spojit s postupnou transformací energetiky s cílem integrovat do DS distribuované obnovitelné zdroje elektřiny (DER), bateriové úložné systémy (BESS), či nabíjecí jednotky pro elektromobily (EVC). Mění se charakter provozu OPM, od čistě spotřebního na výrobní, resp. kombinovaný, s dynamickou časovou a fázovou distribucí směru toku energie. Nejsou nadále platné zjednodušené předpoklady měření elektřiny poplatné jednosměrné distribuci, navíc za doprovodu souvisejících rušivých jevů (Obr. 2), které mohou ovlivnit/degradovat správnost měření, jejich interpretaci a využití dat z SM [13] a to i přesto, že jedním z cílů nasazení SM elektroměrů je právě napomoci úspěšnému začlenění zmíněných technických systémů (DER, BESS, EVC) v OPM.

Pro zajištění požadované funkce zařízení a cílené elektromagnetické kompatibility (EMC) v DS podléhají jednotlivé výrobky, včetně elektroměrů, a parametry provozu DS (která představuje konkrétní elektromagnetické prostředí) technické regulaci, která je uplatňována prostřednictvím právních norem (zákonů) a odvozených prováděcích předpisů (nařízení vlády a vyhlášek), odkazujících na specifické, v EU harmonizované, technické normy (standarty), viz Obr. 2. Standarty vedle funkčních požadavků a například požadavků na konstrukci a bezpečnost, specifikují také požadavky na minimální odolnost a limitují emisi rušení, pokud je to relevantní. Pravdou je, že vývoj technických norem, vycházející z potřeby zkušeností, je vždy za aktuálním stavem a potřebou. Podobně je tomu i v případě statických SM elektroměrů, jejichž potřeba standardizace vlastností nových, zejména měřicích, funkcí a dostatečné odolnosti v podmínkách nových - aktivních DS, není standardizací dostatečně reflektována.

Z hlediska základní měřicí funkce fakturačních statických elektroměrů (měření činné energie), jsou požadavky ve vazbě na EU direktivy [14],[15] specifikovány souborem tzv. MID (Measuring Instrument Directive) standardů [16] a [17]. Tyto standarty, stejně jako další související s měřením energie [18]-[20], nedefinují co to činná resp. jalová energie je a jak se má měřit, ale specifikují soubor testovacích bodů, s cílem ověřit shodu s očekávanou hodnotou měření v mezích definovaných dovolených odchylek od hodnoty správné. Přitom **odezva elektroměrů na rychlé změny a fázovou nesymetrii směru toku energie**, související s OPM vybavenými DER či BESS [21],[22], není vůbec reflektována. Součástí typových zkoušek ověřujících odezvu/odolnost v měření energie na ovlivňující jevy dle [16]-[20] je také **měření přenosu energie elektroměry na harmonických frekvencích v energetickém pásmu do 2 kHz**, v důsledku provozu nelineárních silových zařízení v DS [11]. Nicméně chybějící řádná definice požadavků na měření a specifikace zkoušek, vycházející spíše z vlastností elektromechanických elektroměrů, vede v lepším případě na rozdíl v registraci mezi elektroměry, v horším pak na zásadní chybu měření [23],[24]. V neposlední řadě, potřeba minimální **odolnosti elektroměrů na vedené symetrické rušení ve frekvenčním rozsahu 2 - 150 kHz**, které je způsobeno každým jednotlivým spínaným polovodičovým měničem připojeným do DS [12], byla donedávna zcela opomíjena, i když je evidována řada závažných dopadů na správnost měření [25]-[28].

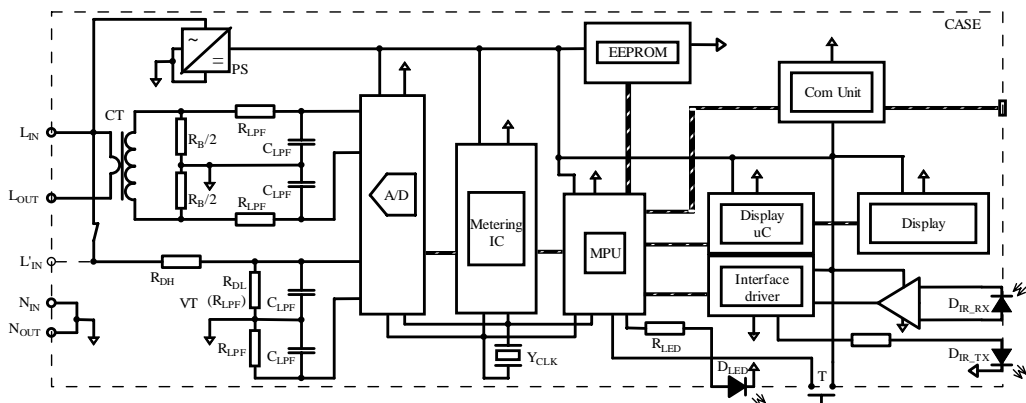
Nadstavbové měřicí funkce (AM či PQ) specificky pro SM elektroměry nemají oporu ve standardizaci žádnou, s výjimkou případů, kdy je deklarován soulad měřicího procesu se standarty pro měření PQ/VQ [29]-[32]. Nicméně převládající, z hlediska dostupnosti a nasazování, SM elektroměry implementují výpočty parametrů a ukazatelů podle vlastní (převážně neveřejné) metodiky výrobce, bez deklarace nejistot měření a bez doložení rozsahu provozních ovlivňujících podmínek a jevů. Taková měření lze pokládat pouze za indikativní s limitací použitelnosti pro zamýšlené účely v oblasti monitoringu a řízení DS.

Na druhou stranu, rozpoznání a rozbor případů selhání měřicích funkcí SM elektroměrů, spolu s vyjasnění měřicích/pracovních podmínek a ujasněním požadovaných vlastností, může napomáhat dřívější a funkční standardizaci požadavků.

## 2 KONSTRUKCE, METRIKA A VLASTNOSTI STATICKÝCH DIGITÁLNÍCH ELEKTROMĚRŮ

### 2.1 KONSTRUKCE

Zjednodušené blokové schéma jedno-fázového jedno-soustavového digitálního SM elektroměru se zaměřením na jeho metrologickou část je na Obr. 3. Typická kompozice digitálního elektroměru pro zajištění základních procesů obsahuje: vstupní převodníky napětí a proudu (VT/CT, snímání měřených signálů, (převod veličiny -  $i \rightarrow u$ ) a úprava velikosti), Anti-Aliasingové filtry (AAF) (úprava frekvenčního rozsahu signálů), A/D převodníky (digitalizace signálů), výpočetní jednotku (Met. IC, realizující metriku elektroměru), řídicí jednotku (MPU, řízení procesů), hodiny reálného času, nezávislou paměť (EEPROM, uchování metrologických dat), rozhraní (včetně nezbytných kontrolérů pro ovládání a zprostředkování dat), komunikační jednotku (Com Unit, vzdálená komunikace přes PLC/LAN/ RF/GSM/GPRS/Wi-Fi/..), zdroj (PS, standardní i záložní napájení). Elektroměry mohou integrovat i další fyzické komponenty a jejich subsystemy jako: další senzory (viz. Obr. 1 (SP, EM, ..), pro detekci nedovolené manipulace, apod.), silový odpínač (zapínání/vypínání OPM), reléové výstupy (ovládání zátěží/zařízení v OPM), apod.



Obr. 3. Zjednodušené schéma jedno-fázového jedno-soustavového digitálního SM elektroměru

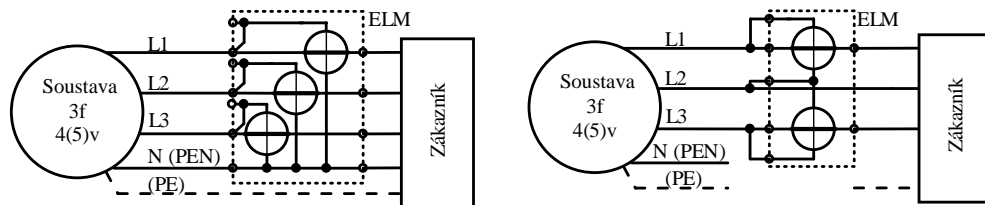
Z metrologického hlediska je zásadní částí elektroměru HW a SW provedení od vstupních silových svorek pro připojení do obvodu, přes analogový front-end, až po výpočetní jednotku s implementovanou metrikou. Převodníky jsou vzhledem k připojení elektroměrů vždy do obvodu NN (v případě připojení do vyšších napětových hladin, VN/VVN/ZVN je připojení provedeno přes měřicí transformátory napětí a proudu) řešeny následujícím způsobem. Převodník napětí využívá v naprosté většině případů odporový dělič se vstupním odporem od 1 do 5 M $\Omega$ . Převodník proudu je realizován pomocí proudového transformátoru (starší řešení), odporového bočnicku (dnes typické), Hallova snímače různých konstrukcí či senzoru na principu Rogowského cívky (narůstající nasazení), vždy jedno-rozsahově [6], [33]. Každý z těchto převodníků má své výhody i nevýhodné stránky, související s jejich frekvenčním a dynamickým přenosem, lineárníou přesnou, a jistě i cenou. U všech převodníků je výstupní signál v předpokládaném pracovním rozsahu úměrný primárnímu signálu. V případě Rogowského cívky je však úměrný derivaci primárního proudu,  $di/dt$ , tzn., že součástí signálové úpravy musí být i vhodný integrátor.

Za přizpůsobením velikosti a veličiny následuje frekvenční přizpůsobení frekvenčního rozsahu signálu před digitalizací pomocí AA filtrů, tak aby se zamezilo aliasing efektu, tedy nepravému zrcadlení frekvenčních složek přes vzorkovací frekvenci AD převodníku (ADC) [34]. Jejich použití je velmi podstatné a důležité. Existuje celá řada technik, které lze v kombinaci s ADC

použit. AA filtry elektroměrů jsou nejčastěji prvního řádu a vždy shodného provedení pro všechny měřicí vstupy. Digitalizace všech signálů v samostatných ADC je realizována typicky s pevnou vzorkovací frekvencí, přičemž výsledná vzorkovací frekvence je obvykle v rozsahu 1.6 až 6.4 kS/s. Mohou být použity i  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC s řádově vyšší vzorkovací frekvencí a následným převzorkováním na nižší frekvenci. Navazujícím článkem měřicího řetězce je digitální signálový procesor (DSP) s implementovanou metrikou elektroměru (výpočet rozhodných parametrů veličin) [35], [36]. U HW realizací se můžeme setkat s nasazením specializovaných DSP, stejně jako s univerzálními programovatelnými hradlovými poli (FPGA). Posledním článkem měřicí části elektroměrů jsou výstupy měření do paměti, na display, ale i na zkušební výstup, který je nedílnou součástí fakturačních elektroměrů [16]. Z toho důvodu je součástí převodníku měřené energie na frekvenci s vyvedením na povinný optický zkušební impulsní výstup (Obr. 3 D<sub>LED</sub>) a případné další metalické "S0" impulsní výstupy. Obsluhu všech periférií zajišťuje mikroprocesorová jednotka (MPU). Dostupná a používaná jsou i proprietární HW řešení digitální části, integrující v jednom obvodu ADC pro každý signál, DSP a MPU, včetně kontrolérů základní komunikace a periférií [35],[36]. Tím jsou mimo jiné eliminovány metalické vazby s přenosem digitálního signálu mezi integrovanými částmi (ADC-DSP-MCU), které mohou představovat vazbu pro rušivý signál.

Každá z komponent schématu (Obr. 3), včetně jejich propojení, definuje určenou přenosovou cestu pro měřené, upravované a zpracovávané signály, a to ať už v analogovém front-endu, nebo v digitální části s navazujícími rozhraními. Přitom jsou procesované signály průchodem přes jednotlivé části měněny s přenosovou funkcí (přenosovými funkcemi) představující úmyslnou změnu, nebo i změnu druhotnou, která však signál mění známým a popsatelným způsobem. Vždy se přitom vychází z předpokladu, že daná realizace a implementace reprezentuje zamýšlené zpracování signálu, které je dostatečně robustní v uvažovaném rozsahu variace vstupních a ovlivňujících veličin.

Třífázové digitální elektroměry pro měření v třífázovém systému jsou řešeny v podobném smyslu jako indukční elektroměry, a tedy sdružují tři soustavy pro měření v systému se čtyřmi pracovními vodiči (typicky NN, nebo VVN) a dvě soustavy pro měření se třemi pracovními vodiči (typicky v izolovaných VN sítích), Obr. 4. V soustavách VN a VVN je připojení řešeno ideově shodně, ale přes odpovídající sady měřicích transformátorů napětí a proudu. Prakticky to znamená, že počet vstupů (napěťový a proudový) digitálních elektroměrů je určen počtem soustav, s počtem analogových obvodů a ADC, který je roven celkovému počtu procesovaných signálů. HW digitální části je společný, avšak s úměrným nárůstem počtu zpracovávaných procesů.



Obr. 4. Zapojení tří-soustavového (vlevo), resp. dvou-soustavového (vpravo) elektroměru do třífázové sítě pro měření v systému se čtyřmi (vlevo), resp. třemi (vpravo) pracovními vodiči

## 2.2 METRIKY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro hodnocení přenosu energie a stavu AC silové soustavy byla vyvinuta a odvozena řada popisů reflektujících potřebu odhalit vlastnosti provozu soustavy. A to ve smyslu různých výkonových teorií [38]-[41], metod pro určení popisných parametrů jednotlivých elektrických veličin a ukazatelů PQ a VQ [11], [42], nebo i nasazení specifického matematického aparátu [34], [42], či způsobu formálního vyjádření. V zásadě lze jednotlivé metodiky pro AC signály rozdělit na dva typy metrik: 1) oknové a 2) estimační, případně jejich kombinaci. Zatímco metriky oknové vychází z předpokladu cyklických dějů, u nichž je možné určit periodu (typicky o systémové frekvenci), po jejímž odeznění je možné se zpětnou platností dovodit jaké vlastnosti/parametry signály měly, snahou estimačních metod je určit/estimovat tyto parametry v aktuálním okamžiku a spojitě v čase, typicky za pomoci filtrů. Oknové metriky jsou konzervativní a mohou být v (kvazi)ustálených stavech přesnější, na druhou stranu zavádí do výpočtu zpoždění a výsledek vyjadřuje ekvivalentní průměrný stav za měřicí okno (MW), a proto například pro rychlé řízení na základě měření jsou vhodnější metody estimační. Oba typy metrik se týkají zpracování signálu jak časové, tak frekvenční oblasti, a při ideálních podmínkách je předpoklad, že všechny způsoby výpočtu téhož vedou na stejný výsledek. Nicméně za neideálních podmínek, při deformacích signálů (periodických i aperiodických), mohou být výsledky z důvodu metodického/systematického nedostatku značně rozdílné.

Digitální elektroměry využívají velké množství různých metrik, někdy individualizovaných, a to i v souvislosti s jejich výpočetní náročností, či určením elektroměru. Výrobci běžně nedokumentují a nedokládají přesný popis HW konstrukce a implementované metriky. Vlastnosti jsou tak dovoditelné, pouze pokud je známo, že je použit například některý z proprietárních měřicích integrovaných obvodů (IC) [35]-[37], nebo v omezené míře na základě dedikovaných testů, sledujících odezvu na testovací signál.

Jak již bylo v úvodu zmíněno, pro elektroměry obecně není standardizováno, jak se má množství energie a ostatní parametry a ukazatele měřit. Nicméně ve std. [16]-[20] jsou alespoň uvedeny základní obecně uznávané definice činného a jalového výkonu, vyjádřené pro případ harmonického ustáleného stavu napětí a proudu. Doplnující informace o vlastnostech a způsobu určení parametrů lze také nalézt ve specifikaci OBIS kódů [8].

Způsob vyjádření množství činné energie po vzoru oknové metriky je dle [16]:

$$A = \int_{t_0}^{t_0+N_{PER}T_{PER}} p(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+N_{PER}T_{PER}} u(t) \cdot i(t)dt \quad (Ws), \quad (1)$$

kde  $u$ ,  $i$  a  $p$  jsou okamžité hodnoty fázových napětí, proudu, resp. výkonu, a  $N_{PER}T_{PER}$  je délka měřicího okna  $T_{MW}$ , daná celistvým násobkem doby jedné periody  $T_{PER}$  systémové frekvence  $f$ . Obecně uznávaná definice činného výkonu, který představuje střední hodnotu za  $T_{MW}$ , je potom:

$$P = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0+N_{PER}T_{PER}} p(t)dt = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0+N_{PER}T_{PER}} u(t) \cdot i(t)dt \quad (W). \quad (2)$$

V ideálním případě je průběhy okamžité hodnoty napětí a proudu možné vyjádřit harmonickými funkcemi ve tvaru:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_U), \quad \psi_U = 0, \quad u(t) = U_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_I), \quad \psi_U - \psi_I = \varphi, \quad i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

kde  $U_m$ ,  $I_m$  jsou maximální hodnoty/amplitudy harmonických průběhů,  $\omega=2\pi f$  je úhlová rychlost a  $\psi_U$ ,  $\psi_I$  jsou počáteční úhly harm. vln napětí a proudu. Dosazením (3) a (4) do definice okamžitého výkonu a po úpravě dostaneme:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]. \quad (5)$$

Okamžitý výkon je superpozicí stejnosměrné složky, úměrné velikostem vln napětí a proudu a jejich vzájemnému fázovému posuvu, a kmitavé harmonické složky, která má velikost určenou opět velikostmi vln napětí a proudu a frekvenci dvojnásobkem systémové frekvence.

Velikosti napětí a proudů v AC výkonovém systému nejčastěji vyjadřujeme jejich efektivními (rms) hodnotami, které představují tepelný ekvivalent stejnosměrného napětí, resp. proudu za periodu, násobek periody, systémové frekvence, s definicemi:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} u^2(t) dt} \text{ (V)}, I = \sqrt{\frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} i^2(t) dt} \text{ (A)}. \quad (6)$$

Za předpokladu harm. průběhu  $u$ , dosazením (3) do (6), je jeho rms hodnota (obdobně pro proud):

$$U = \sqrt{\frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} [U_m \sin(\omega t)]^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Substitucí (7) v (5) a použitím do (2) s následnou integrací je zřejmé, že činný výkon odpovídá pouze stejnosměrné složce okamžitého výkonu, představující ekv. střední hodnotu v intervalu  $T_{MW}$ , s platností výsledného výrazu pouze pro harmonické napětí a proud stejné frekvence:

$$P = \frac{1}{N_{PER} T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} T_{PER}} [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi. \quad (8)$$

Z pohledu dlouhého časového měřítka, s předpokladem spojitého průběhu  $P$  v čase, lze vyjádřit elektrickou práci následovně:

$$A = \int P(t) dt \text{ (Ws)}. \quad (9)$$

Z důvodu potřeby vyjádření výkonové kapacity systému a jeho využití, s ohledem na závislost činného výkonu na  $\varphi$ , byl zaveden zdánlivý výkon, s definičním vztahem pro jeho velikost:

$$S = UI \text{ (VA)}. \quad (10)$$

Ekvivalentně k (9) a za shodných předpokladů můžeme vyjádřit "zdánlivou" přenesenou energii:

$$E = \int S(t) dt \text{ (VAs)}. \quad (11)$$

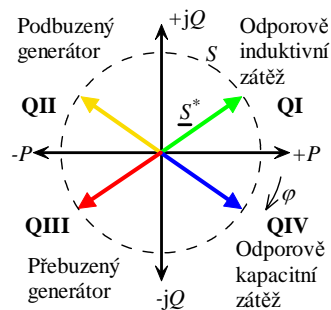
Z důvodu disproporce mezi velikostí zdánlivého výkonu  $S$  a činným výkonem  $P$ , jakožto důsledek přirozené odezvy lineárního RLC obvodu v AC systému, zavedl Budeanu (1927) myšlenou veličinu označovanou jako jalový výkon  $Q$ , který je dán vztahem platným pro harmonické průběhy napětí a proudu, a jenž je použit pro specifikaci jalového výkonu v [20]:

$$Q = UI \sin \varphi \text{ (var)}. \quad (12)$$

V souladu s (9) a (11) a za shodných předpokladů, je výraz pro jalovou energii:

$$R = \int Q(t) dt \text{ (vars)}. \quad (13)$$

Jalový výkon dle (12) je v zásadě geometrickým doplňkem k činnému výkonu dle (8) určující výkon zdánlivý  $S$ . Pro uvažovaný harmonický ustálený stav s konstantní frekvencí je možné vyjádřit zdánlivý výkon v komplexním prostoru s reálnou složkou  $P$  a imaginární částí  $jQ$ , Obr. 5. Spotřebičovou konvencí, kterou aplikují i elektroměry [8], je zaveden kladný směr (+ hodnota) pro odběr-import činného výkonu-energie a jalového výkonu-energie induktivního charakteru. Velikost zdánlivého výkonu je také rovna:



Obr. 5. Výkonový diagram v souladu se spotřebičovou konvencí

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (14)$$

Z obchodního, ale i fyzikálního hlediska, je při kumulaci složek energie třeba rozlišovat a zvlášť uchovávat množství odpovídající jednotlivým směrům s příslušnými kvadranty (Obr. 5). Tomu odpovídá i separace energií registrů podle OBIS kódů dle skupiny C: 1. činná energie + (QI+QIV), 2. činná energie - (QII+QIII), 3. jalová energie ind. + (QI+QII), 4. jalová energie ind. - (QIII+QIV). V souvislosti s popisovanou teorií je však potřeba upozornit, že nejkratším úsekem, s dále nerozlišitelným kvantem energie z hlediska směru pro třídění do registrů, je doba měřicího okna  $T_{MW}$ . Což je důležité při měření v systému, který přechází mezi odběrem a dodávkou.

V třífázovém systému můžeme pro celkovou třífázovou velikost okamžitého výkonu napsat:

$${}^{3F}p(t) = {}^{L1}p(t) + {}^{L2}p(t) + {}^{L3}p(t) . \quad (15)$$

Výraz je přímo aplikovatelný pro třísoustavové elektroměry (Obr. 4), v případě dvou-soustavových (Aronova soustava), je nutná úprava dosazením měřených veličin. V každém případě, v harmonickém ustáleném stavu lze s využitím (2), (5), (8) a (15) a jednotlivých jednofázových veličin pro celkový 3f činný odvodit:

$${}^{3F}P = {}^{L1}U {}^{L1}I \cos {}^{L1}\varphi + {}^{L2}U {}^{L2}I \cos {}^{L2}\varphi + {}^{L3}U {}^{L3}I \cos {}^{L3}\varphi = {}^{L1}P + {}^{L2}P + {}^{L3}P . \quad (16)$$

Symetricky je potom 3f jalový výkon také sumou jednotlivých fázových hodnot:

$${}^{3F}Q = {}^{L1}U {}^{L1}I \sin {}^{L1}\varphi + {}^{L2}U {}^{L2}I \sin {}^{L2}\varphi + {}^{L3}U {}^{L3}I \sin {}^{L3}\varphi = {}^{L1}Q + {}^{L2}Q + {}^{L3}Q . \quad (17)$$

A nakonec pro 3f zdánlivý výkon v souladu s (14) a (10) platí:

$${}^{3F}S = \sqrt{{}^{3F}P^2 + {}^{3F}Q^2} = \sqrt{{}^{L1}U^2 \cdot {}^{L1}I^2 + {}^{L2}U^2 \cdot {}^{L2}I^2 + {}^{L3}U^2 \cdot {}^{L3}I^2} . \quad (18)$$

Za ideálního ustáleného, harmonického a symetrického stavu napěťové a proudové soustavy 3f systému, je průběh  ${}^{3F}p$  (15) konstantní, nezávislý na čase. V případě nesymetrie soustav  $[u]_F$  či  $[i]_F$  je ale  ${}^{3F}p(t)$  obohacen o kmitající složku s frekvencí na dvojnásobku síťové a s velikostí úměrnou míře nesymetrie. Evidentně tak vznikají další složky 3f výkonu (vedle činné a jalové), které souvisí s mírou nesouměrnosti a nevyváženosti. Vhodný popis stavu nabízí souměrné složky [11], [42]. Situaci, kterou není možné jednoduše postihnout sumačním 3f popisem či souměrnými složkami (výkonu) je případ, kdy je v jedné fázi  $+P$  a ve druhé  $-P$ , o významné a třeba i stejné velikosti. Nastává například v OPM se zdrojem s celkově fázově nesymetrickou výrobou a současnou spotřebou. Z pohledu celkové 3f bilance je sice sumace podle (16) a (17) s následnou integrací dle (9) a (13) v pořádku, ale nekoresponduje to se způsobem využití 3f systému, který musí realizovat směnu energie mezi fázemi. Proto je nezbytné integrovat a třdit přírůstky energií pro každou fázi/soustavu elektroměru samostatně, bez mezi-fázových zápočtů.

Nedílnou součástí provozu DS je deformace průběhů napětí a proudů od ideálních harm. vln [11]. Pro analytický popis deformovaných, spojitých a periodických signálů, s předpokladem základní periody o systémové frekvenci, lze s výhodou využít Fourierovy transformace (FT) s reprezentací v podobě Fourierovy řady. Potom průběh okamžité hodnoty napětí a proudu lze vyjádřit sumou harmonických funkcí (bez uvažování DC složek):

$$u(t) = \sum_h u_h(t) = \sum_h \sqrt{2} U_h \sin(\omega_h t + \psi_{uh}) , \quad (19)$$

$$i(t) = \sum_h i_h(t) = \sum_h \sqrt{2} I_h \sin(\omega_h t + \psi_{ih}) , \quad (20)$$

kde  $U_h$ ,  $I_h$ ,  $\psi_{uh}$ ,  $\psi_{ih}$  jsou rms velikosti a počáteční fáze harmonických průběhů napětí a proudu o úhlové rychlosti  $\omega_h = 2\pi h f$  s řádem harmonické  $h$ , kde  $h$  je celé kladné číslo. V souladu s definicí rms hodnoty (6) lze dosazením (19) resp. (20) obdržet celkovou rms hodnotu napětí/proudu:

$$U = \sqrt{\sum_h U_h^2} , \quad I = \sqrt{\sum_h I_h^2} , \quad (21)$$

Stejně tak dosazením řad (19) a (20) do definičního vztahu pro  $P$  (2) a po úpravě dostaneme:

$$P = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} \left[ \sum_h u_h(t) \cdot \sum_h i_h(t) \right] dt = \quad (22)$$

$$= \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} \left[ \sum_h u_h(t) \cdot i_h(t) + \sum_{h,k \neq h} u_h(t) i_k(t) \right] dt = \sum_h U_h I_h \cos \varphi_h = \sum_h P_h$$

kde činný výkon (představovaný nenulovou hodnotou DC složky  $p$ ) mohou nést pouze napětí a proudy stejných frekvencí. Tak jako v případě harmonického stavu (12), mohou všechny součiny napětí a proudů stejných frekvencí, v závislosti na vzájemném úhlu, obsahovat i jalové výkony:

$$Q = \sum_h U_h I_h \sin \varphi_h = \sum_h Q_h . \quad (23)$$

Je zřejmé, že pro jednotlivé harmonické řádu  $h$  platí stejné vztahy jako pro základní případ se sinusovými proudy a napětími, neboť ty představují základní harmonickou složku o sítové frekvenci. Přesto může i soulad matematický, ukazující sumu harmonických výkonů (22), (23), znamenat nesoulad fyzikálně-interpretací. Konkrétně v případě, že jednotlivé harmonické výkony nemají stejné znaménko/směr. Vzájemné aritmetické zápočty z jednotlivých frekvencí opět nejsou v souladu se skutečným využitím systému, odběr energie na jedné frekvenci nemá být kompenzován dodávkou na jiné.

Ostatní součiny napětí a proudů různých frekvencí v (22) mají vždy za periodu systémové frekvence nulovou střední hodnotu, tedy nenesou žádnou činnou energii, ale podobně jako jalová složka zatěžují systém přenosem energie "newattového" charakteru. Odpovídající výkonová složka se nazývá "deformačním" výkonem  $D$  a její velikost lze odvodit z definice zdánlivého výkonu (10), dosazení z (21) a úpravou:

$$S = UI = \sqrt{\sum_h U_h^2} \sqrt{\sum_h I_h^2} = \sqrt{\sum_h U_h^2 I_h^2 + \sum_{h,k \neq h} U_h^2 I_k^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} . \quad (24)$$

Pro vyjádření výkonových a energetických poměrů v 3f síti s deformovanými průběhy napětí a proudů platí stejné vztahy a komentáře odvozené a dedukované pro harmonické průběhy s tím, že (22) až (24) představují jednotlivé fázové hodnoty.

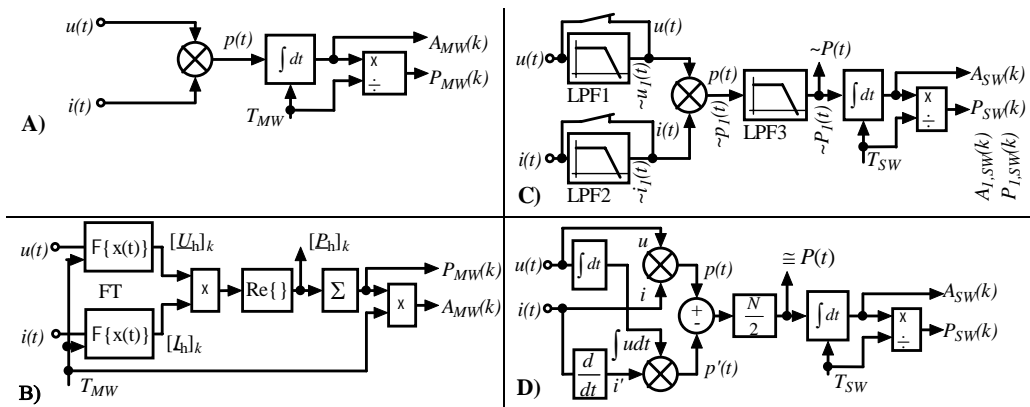
Digitální elektroměry využívají velké množství různých metrik, které do určité míry vyhovují popsané obecně uznávané představě o způsobu měření a interpretaci výsledků. Všechny metriky jsou potom za idealizovaných testovacích podmínek schopny vykazovat očekávané výsledky v toleranci potřebných/požadovaných nejistot měření. V situacích s reálnými signály však mohou být jejich výstupy značně rozdílné, což komplikuje nejen vzájemnou porovnatelnost, koordinaci s jinými měřidly, ale i použitelnost. Vybrané typické metriky elektroměrů v rozdělení podle veličiny jsou ukázány v následujících částech. Při popisu budou používány definice pro spojitě signály, pokud není uvedeno jinak s tím, že implementace v digitálních elektroměrech je v ekvivalentní diskrétní podobě.

### 2.2.1 Metriky činného výkonu a činné energie

Zásadním problémem určení činného výkonu je eliminace kmitajících složek z průběhu okamžitého výkonu, jehož stejnosměrná složka/střední hodnota je rovna činnému, z (22) a (8):

$$p(t) = \sum_h [U_h I_h \cos \varphi_h - \cancel{U_h I_h \cos(2\omega_h t - \varphi_h)}] + \sum_{h,k \neq h} \cancel{u_h(t) i_k(t)} . \quad (25)$$

Čtyři základní techniky/metriky pro dosažení potřebné eliminace jsou pomocí signálových schémat ukázány na Obr. 6.



Obr. 6. Signálová schémata vybraných metrik pro určení činného výkonu a přírůstku činné energie

- A) **"Standardní" metrika.** Odpovídá nejběžnějšímu způsobu určení činného výkonu a přírůstku činné energie. Kmitající složky jsou eliminovány integrací, na základě (8) resp. (22), v synchronizovaném MW o délce nejčastěji 1s resp. 50 period (50p) systémové frekvence, někdy i kratší např. 10p. Čím kratší MW, tím je přesnost citlivější na správnou synchronizaci. Výkon a energie odpovídá sumě jednotlivých harmonických složek dle (22) v rozsahu frekvenčního pásma vstupních signálů
- B) **FT metrika.** Založena na FT (FFT/DFT) vstupních signálů napětí a proudu s délkou měřicího okna nejběžněji 10p v souladu s [30]. Charakteristické pro analyzátoři kvality elektřiny, jejichž funkcionalitu integrují některé vyšší řady SM elektroměrů. Činný výkon a energie za MW jsou určeny výpočtem z parametrů jednotlivých harmonických složek napětí a proudu v souladu s (22). Rozsah jednotlivých harmonických složek v celkovém výkonu/energii je možné selektivně určovat.
- C) **Filtreační metrika.** Využívá pro eliminaci kmitajících složek okamžitého výkonu, ze součinu signálů napětí a proudu, dolno-propustný filtr (LPF, Obr. 6-LPF3) nebo i Notch filtr - pásmová zadrž na dvojnásobku systémové frekvence. Výstup LPF3 odpovídá průběhu okamžitého činného výkonu, nicméně z důvodu konečného útlumu filtru na frekvencích kmitů, největší zbytková složka bývá na dvojnásobku systémové frekvence, je nutné výstup výkonu vyhladit integrací s počtem vzorků vyšším než jedna. TSW může být od 20 ms výše (opět v násobcích času periody). Dynamika výstupu je však značně omezena jednotkovou odezvou použitého filtru. Pokud je součástí úpravy signálů LPF1 a 2, lze redukovat šířku frekvenčního pásma výstupního výkonu. Při odfiltrování všech harmonických napětí a proudů vyšších řádů, může výstupní výkon a energie odpovídat pouze přenosu na základní harmonické. Tuto techniku lze kombinovat i s metrikou A).
- D) **Manipulační metrika.** Vychází ze záměrné matematické manipulace se signály, kombinace jejich integrace a derivace, která umožní eliminovat kmitající složky. Pro případ harmonického průběhu napětí a proudu je proces následující:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

$$p'(t) = \int u(t) dt \cdot \frac{di(t)}{dt} = -\frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)]$$

$$\rightarrow p_s(t) = \frac{p(t) - p'(t)}{2} = UI \cos \varphi. \quad (26)$$

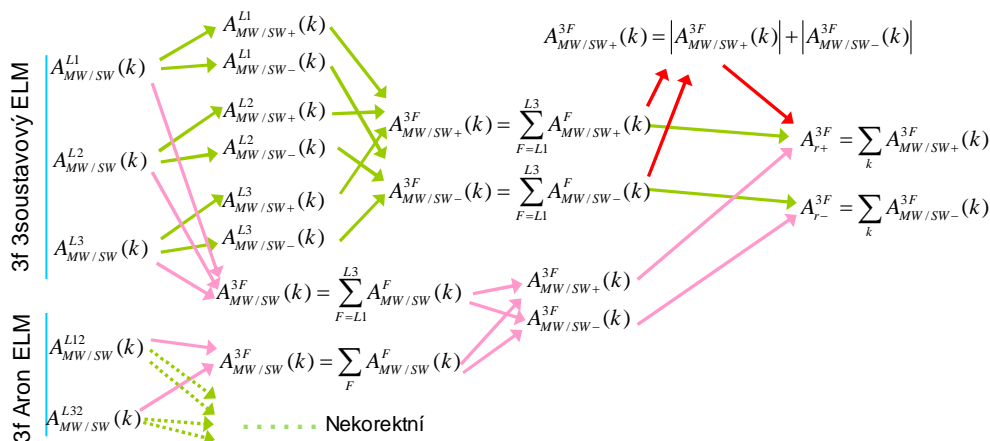
Teoreticky je výstup roven okamžitému činnému výkonu a přírůstek energie může být určen za nejkratší možný čas - vzorkovací interval -  $T_{SW}=T_S$ . Takto rychlá registrace je však citlivá na přesnost procesů, možnou a dost pravděpodobnou saturaci VF rušením (~1-10 kHz) ve vstupních signálech při derivaci.



Způsoby třídění a kumulace změřených přírůstků činné energie do kumulativních registrů jsou u 3f elektroměrů tři, Obr. 7, dané výše popsanou sumační logikou hodnot z jednotlivých fází.

1. Nejprve jsou sečteny přírůstky ze všech soustav a výsledek je následně roztržíděn do kladného či záporného registru a kumulován (emulace 3f indukčního ELM se spřažením přes kotouč).
2. Nejprve provedeno roztržídění z jednotlivých soustav na kladné a záporné a ty jsou následně sečteny (kladné zvlášť, záporné zvlášť) a uloženy do příslušného registru (emulace šesti 1f indukčních ELM), v souladu s Vyhl. č. 82/2011 Sb. (stejně např. v Polsku, Litvě).
3. Roztržíděné přírůstky energie jsou sečteny absolutně a uloženy/akumulovány do jednoho registru.

U jednofázových jedno-soustavových elektroměrů je možnost třídění a kumulace pouze jedna.



Obr. 7. Způsoby třídění kumulace změřených přírůstků činné energie do registrů

Proces agregace výkonů do agregovaných hodnot, u elektroměru např. typicky 15 minut po sobě jdoucí hodnoty, z nichž jsou obdrženy 15 minutové výkonové profily, vychází z popisu OBIS kódů příslušných registrů, které uvádějí průměrnou hodnotu za daný interval. Činné a jalové energie z měřicích intervalů MW nebo SW jsou kumulovány v cyklických registrech po dobu agregáčního intervalu  $T_{AGG}$  a následně poděleny tímto časem. Výsledek odpovídá aritmetickému průměru za daný interval  $T_{AGG}$ . Stejný popis v OBIS je i u agregovaného zdánlivého výkonu, a elektroměry běžně implementují stejný postup vedoucí na aritmetický průměr. To je však v rozporu s definicí zdánlivého výkonu, neboť z fyzikální podstaty by měl být použit průměr kvadratický.

## 2.2.2 Metriky jalového výkonu a jalové energie

Pro složky výkonu je referencí vlna napětí, pokud je proud ve fázi a stejného průběhu, je výkon složen pouze z činné složky, a problém přechází do roviny určení její velikosti, viz (25). Uvedené teze lze využít i pro estimaci jalové složky. Tedy pokud vlnu napětí uměle posuneme v čase o  $90^\circ$ ,  $u(\omega t + 90^\circ)$ , bude referencí pro jalový výkon, a jejím vynásobením s  $i(\omega t - \varphi)$  dostaneme funkci " $q(t)$ ", která je ekvivalentem okamžitého výkonu  $p(t)$  (25). Stejnoseměrná složka/střední hodnota z této funkce je pak evidentně rovna velikosti jalového výkonu. Výsledně používané metriky jalového výkonu a energie jsou však ještě rozmanitější než v případě činných složek a lze je rozdělit obdobným způsobem.

- a) "**Standardní**" metriky. Vychází z oknové integrační metriky činného výkonu dle A) pro  $q(t)$ . Problémem je způsob posunutí napětí, nebo i zástupně proudu, o  $90^\circ$  na všech frekvenčních složkách zároveň. Realistickými možnostmi jsou integrace jednoho ze signálů  $u$ ,  $i$ , fixní posun

o časový interval o délce púlperrody systémové frekvence, nebo i posunutí horno-propustným filtrem (HPF) [24], [43], [44]. Všechny tři možnosti jsou postupně vyjádřeny v (27) až (29) s označením metrik a1) až a3).

$$a1) \quad Q_{MW} = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_0^{N_{PER} \cdot T_{PER}} \omega_1 \left( - \int u(t) dt \right) \cdot i(t) dt, \quad (27)$$

$$Q_{MW} = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \dots = \sum_h \left( \frac{Q_h}{h} \right)$$

$$a2) \quad Q_{MW} = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_0^{N_{PER} \cdot T_{PER}} u(t) \cdot i \left( t - \frac{T_{PER}}{4} \right) dt, \quad (28)$$

$$Q_{MW} = Q_1 - Q_3 - Q_5 - \dots - P_2 + P_4 - P_6$$

$$a3) \quad Q_{MW} = \frac{1}{N_{PER} \cdot T_{PER}} \int_0^{N_{PER} \cdot T_{PER}} u(t) \cdot \mathcal{L}^{-1}(F_{HP}(s)) \cdot i(t) dt. \quad (29)$$

Zcela očekávaně, integrační posun a1) bude působit na každou harmonickou složku vyššího řádu s jiným zesílením ( $1/h$ ) a tedy oproti referenci (23), jalové výkony na jednotlivých harmonických frekvencích jsou započteny se zesílením  $1/h$ . Fixní časový posuv pro dle a2) naopak povede k jalovému výkonu na základní harmonické, od kterého jsou odečteny jalové výkony všech vyšších řádů, navíc v mixu se složkami činných výkonů vyšších řádů. Při použití filtru dle a3) bude výsledek záviset na přenosu filtru na jednotlivých harmonických frekvencích. Výsledek se ale bude určitě lišit od (23).

Jalová energie za interval  $T_{MW}$  je následně podle vztahu:

$$R_{MW}(k) = Q_{MW}(k) \cdot T_{MW}. \quad (30)$$

- b) **FT metrika.** Základ metriky je shodný s B). Jalový výkon za MW je určen výpočtem z v souladu s (23). Rozsah jednotlivých harmonických složek v celkovém výkonu/energii je možné selektivně určovat, tedy je možné vybrat pouze komponentu  $h=1$ . Jalová energie je vypočtena shodně s (30).
- c) **Filtrační metrika.** Ve shodě s C) je jalový výkon možné učit LP filtrací  $q(t)$  s tím, že posuvu lze dosáhnout jedním ze způsobů popsaných v a). Ovšem výsledný průběh okamžité hodnoty jalového výkonu je postižen stejnými metodickými odchylkami. Jalovou energii za následný vyhlazovací integrační interval  $T_{SW}$  dostaneme integrací průběhu okamžité hodnoty jalového výkonu.
- d) **Manipulační metrika.** Je založena na stejném principu jako D), Obr. 6 D) - (26), ovšem pro dosažení výstupu v podobě jalového výkonu je nutná rozdílná kombinace integrovaných a derivovaných signálů s původními vstupními. Vlastnosti jsou potom shodné a jalovou energii za interval  $T_{SW}$  dostaneme integrací průběhu okamžité hodnoty jalového výkonu.
- e) **Doplňková metrika.** Vychází z geometrického součtu složek výkonu tvořících výkon zdánlivý (24), kdy při znalosti zdánlivého a činného výkonu můžeme dopočítat výkon jalový, jak předpokládáno pro harmonický stav (14), přitom lze použít párové hodnoty z kteréhokoliv typu metriky:

$$Q_{MW/SW}(k) = \sqrt{S_{MW/SW}^2(k) - P_{MW/SW}^2(k)}, \quad (31)$$

V případě deformovaných průběhů, ale vypočtená hodnota nepředstavuje pouze jalový výkon (23), ale celkový "newattový" výkon zahrnující i deformační výkon. Jalovou energii potom dostaneme vynásobením dobou  $T_{MW}$  nebo  $T_{SW}$ , podle typu.

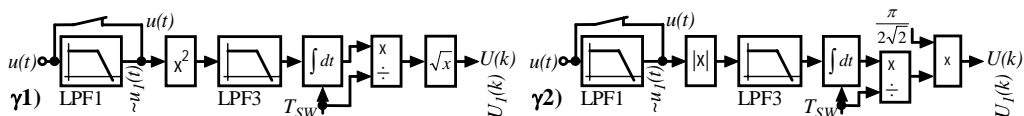
Třídění a kumulace přírůstku jalových energií do registrů podléhá stejným kritériím jako v případě energií činných. U 3f elektroměrů je standardně používána metodika 1. - Obr. 7. Agregace jalových výkonů do profilů je popsána v kap. 2.2.1.

Pro odchylku měření v jalovém výkonu či energii od očekávaných hodnot, z důvodu systematické chyby, není u některých metrik v zásadě limit. Experimenty provedené v [24] referují odchylky metrik a1) a3) a d) od referenční b) na úrovních od 10 do 100 %.

### 2.2.3 Metriky velikosti napětí a proudu

Metriky pro měření velikosti napětí a proudu lze v souladu s předchozím rozdělit do třech používaných typů.

- α) **"Standardní" metrika.** Je plně v souladu s definicí efektivní hodnoty (6).
- β) **FT metrika.** Efektivní hodnoty jednotlivých harmonických složek napětí a proudu jsou přímým výstupem FT. Výpočet celkové efektivní hodnoty je v souladu s (21).
- γ) **Filtreační metriky.** Vychází z předpokladu, že signálově je kvadrát okamžité hodnoty napětí či proudu v definičním vztahu (6) obdobný součinu vln napětí a proudu dávající okamžitý výkon  $p$  (25), navíc ve fázi, s rozdílem pouze odmocniny. Lze tedy využít signálové schéma Obr. 6 C) s tím, že na oba vstupy je přivedeno napětí či proud a že výstup je nutné odmocnit, Obr. 8 γ1). V některých implementacích [35], ve snaze uspořít výpočetní výkon, je ale rms výpočet pro  $U$  nahrazen detekcí velikosti usměrněné střední hodnoty, vynásobené přepočtení konstantou na rms velikost, která ale platí pouze pro harm. průběh, Obr. 8 γ2). Vedle ostatních zdrojů chyb, vnáší tento postup další systematickou chybu, která při běžných deformacích napětí (zvláště v NN DS) může znamenat příspěvek k nejistotě výsledku  $\pm 1-2$  %.



Obr. 8. Signálová schémata filtračních metrik rms velikosti napětí

Proces agregace rms hodnot v čase, u elektroměru např. typicky do 15 minutových po sobě jdoucích hodnot, vychází z popisu OBIS kódů příslušných registrů, které uvádějí průměrnou hodnotu za daný interval. Interpretace u naprosté většiny výrobců vede k výpočtu aritmetického průměru. To je však v rozporu s definicí rms hodnoty, neboť z fyzikální podstaty by měl být použit průměr kvadratický, jehož výsledek představuje tepelný ekvivalent za interval  $T_{AGG}$ :

$$U(g) = \frac{1}{T_{AGG}} \sum_{k, t_0}^{t_0+T_{AGG}} U(k) \text{ vs. } U(g) = \sqrt{\frac{1}{T_{AGG}} \sum_{k, t_0}^{t_0+T_{AGG}} U^2(k)} \quad (32)$$

Pokud by byla velikost napětí a proudu v čase konstantní, není mezi výsledky výpočtu podle (32) žádný rozdíl. Ten začne narůstat s časovou dynamikou. Lze si představit, že enormní význam nastane zejména u proudu. Avšak i v případě napětí je správná agregace důležitá. Z hlediska hodnocení kvality napětí, jeho velikosti, jsou důležité ekvivalentní 10 minutové hodnoty, které musí být v NN v intervalu  $\pm 10$  % od jmenovité hodnoty [7]. Je prokázáno, že rozdíl mezi agregacemi (32) může při běžném provozu a změnách velikosti napětí v NN vést na nejistotu výsledku až  $\pm 1-2$  %. Což je z mezí  $\pm 10$  % značný podíl.

Měření poskytovaná SM elektroměry jsou chápána jako indikativní. Není účelné a ekonomické po nich požadovat třídu měření na úrovni specializovaných přesných analyzátorů PQ. Na druhou stranu nedostatky používaných metrik a absence minimálních požadavků na přesnost měření za realistických provozních podmínek, prokazující vyzrállost a spolehlivost, značně limituje použitelnost poskytnutých dat.

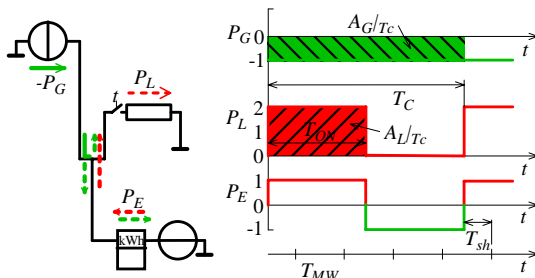
### 3 ODEZVA STATICKÝCH ELEKTROMĚŘŮ V PODMÍNKÁCH AKTIVNÍCH DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV

Vlastnosti současných generací SM elektroměrů jsou dokumentovány na třech vybraných jevech souvisejících s provozními podmínkami v současných distribučních sítích NN s OPM, která provozují paralelně připojené výroby, systémy pro energetický management a řadu dalších výkonových polovodičových měničů.

#### 3.1 ODEZVA ELM NA RYCHLÉ ZMĚNY SMĚRU TOKU ČINNÉ ENERGIE

V novodobých DS mohou na OPM z důvodu integrace nových technologií nastávat rychlé změny v toku činné energie mezi importem a exportem. Za těchto podmínek, žádná z popisovaných metrik ELM pro měření činné energie, s běžnými parametry, není schopna korektního měření v souladu se skutečným množstvím energie v obou směrech. Změny ve směru toku energie mohou vznikat přirozeně z důvodu provozu DER nebo BESS, ale také za přítomnosti systémů s rekuperací energie. Kromě náhodného/nezáměrného původu změn s nízkou četností přechodů mezi odběrem a dodávkou, velmi četné a záměrné změny směru toku jsou typické pro domácí systémy energetického managementu, které pro bilanci vyrobené činné energie v OPM (typicky z fotovoltaických (FV) výroben) využívají řízené spínání dedikovaných zátěží s fixním příkonem. Tyto strategie obvykle implementují pulsně-šířkovou regulaci (PWR) o specifické spínací funkci s velmi krátkou dobou spínacího cyklu [21].

Situaci dokumentuje Obr. 9. Při uvažování oknové metriky ELM s časem integrace TMW je zřejmé, že při každém přechodu bude v okně vlivem průměrování docházet chybě měření. Rozhodujícími invariantními parametry cyklování ve vztahu k měření elektroměrem jsou  $T_C/T_{MW} \in (0; \infty)$ ,  $T_{ON}/T_C \in (0; 1)$ ,  $T_{sh}/T_{MW} \in (0; \infty)$  a  $A_L/A_G \in (0, \infty)$ , kde  $T_C$ ,  $T_{ON}$ ,  $T_{sh}$  jsou doby

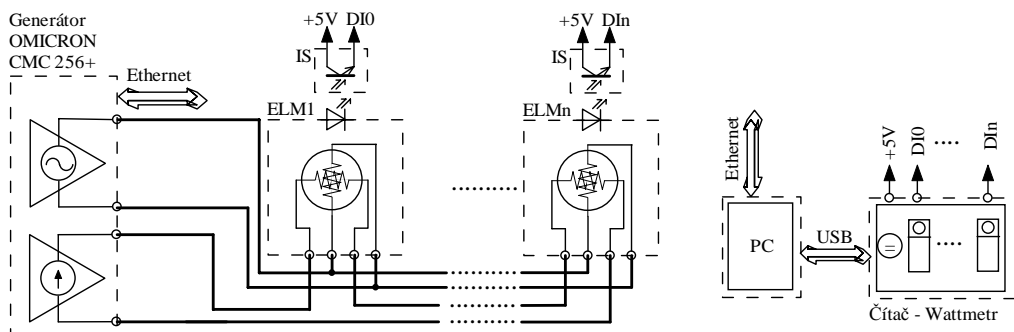


Obr. 9. Toky činné energie v systému s mikro-zdrojem a PWR rezistivní zátěží

spínacího cyklu, zapnutého stavu zátěže a posunu spínacího cyklu vůči MW, a dále  $A_L$ ,  $A_G$  jsou skutečné energie odebrané a dodané v cyklu s výkonem zátěže a zdroje  $P_L$  resp.  $P_G$ . Energeticky vyvážený stav na ELM v cyklu nastává, pokud platí:  $A_L|_{T_C} + A_G|_{T_C} = (P_L \cdot T_{ON} + P_G \cdot T_C)|_{T_C} = 0$ . Typické záměrné spínací funkce PWR mají cyklus 3, 4 či 5 půl-period systémové frekvence [21]. Běžné cykly spotřebičů s PWR regulací (varná deska, mikrovlnná trouba) jsou v  $\sim 10$  s.

Vhodný způsob testování odezvy metrik elektroměrů na uvedené změny je vedle numerických simulací [22] testování s buzením měřicích vstupů odpovídajícími signály. Kromě možnosti měření v reálných provozech je potom výhodné použít přesný generátor zkušebních signálů už jenom proto, že referenční měřič není k dispozici. Dále, systematické testování má potenciál určit použitý typ metriky a její nastavení. Schéma testovacího systému je na Obr. 10. Testovacími signály v jednofázovém obvodu byly zvoleny synchronizované napětí a proud harmonického průběhu s frekvencí 50 Hz a s velikostí 230 V a 20 A. Základní fázový posuv mezi napětím a proudem byl  $0^\circ$  při simulaci zátěže a  $180^\circ$  při simulaci výroby. Simulované spínací cykly realizované změnou úhlu proud mezi 0 a  $180^\circ$  při průchodu proudu nulou, byly voleny jako sudé násobky periody systémové frekvence  $N_C = \{2, 4, 8, \dots, 300\}$ , od 2, s fixním poměrem  $T_{ON}/T_C = 0.5$ . Tím pádem byl pro každý testovací bod poměr mezi vyrobenou a spotřebovanou energií za cyklus

vyvážený,  $A_L/A_G=1$ . Test na každém testovacím bodě z množiny NC byl tak dlouhý, aby bylo dosaženo nejistoty odečtu z registrů elektroměrů nižší než 0.5 %.

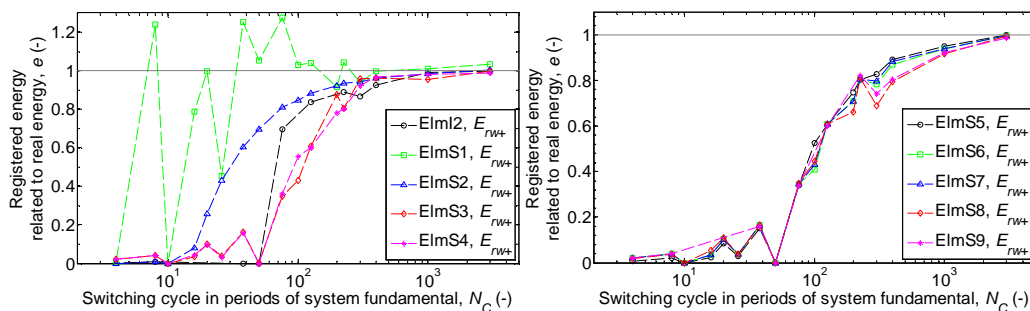


Obr. 10. Schéma testovacího systému

Výsledky testování souboru elektroměrů jsou zpracovány na Obr. 11 (pouze pro registry odběru, vzhledem k energetické vyváženosti cyklů jsou výsledky v dodávkových registrech totožné) ve smyslu relativní registrované energie v registrech činné importované i exportované energie:

$$e_{rA+} = \frac{A_{r+}(t_0 + T_T) - A_{r+}(t_0)}{A_{ref+}}; e_{rW-} = \frac{A_{r-}(t_0 + T_T) - A_{r-}(t_0)}{A_{ref-}} \quad (33)$$

kde  $T_T$  je doba testu na testovacím bodě s konkrétním  $N_C$  a  $A_{ref}$  je referenční množství energie určené výpočtem z přesně generovaných signálů za stejnou dobu.



Obr. 11. Srovnání odezvy elektroměrů na rychlé symetrické změny směru toku činné energie, výsledky pouze z registrů dodávky

Z 10 prezentovaných elektroměrů je 9 digitálních a 7 z nich (ElmS3-ElmS9) vykazuje chování standardní oknové metriky podle A) (viz kap. 2.2.1). Podle průběhu registrace a dosažení první 0 (zprava, se zkracováním cyklu) [22] při  $N_C=50$ , je možné dedukovat, že metriky všech těchto elektroměrů mají délku měřicího okna 1 s (resp. 50 period systémové frekvence). Jejich postupné ztlumování registrace se zkracováním doby cyklu je dáno interakcí oken cyklů a měřicích oken. Nabídnuté srovnání s klasickým indukčním elektroměrem (ElmI2) ukazuje, že tlumení elektromechanického ústrojí také ukončí registraci při cyklech kratších než 1 s. Naproti tomu digitální elektroměry ElmS1 a S2 mají metriku odlišnou a v případě S2 poukazující na nasazení filtrační metriky C). Přechody mezi směry toku jsou vyhlazovány jednotkovou odezvou použitých filtrů s ukončením registrace při délce cyklů pod cca 16 period systémové frekvence. Lze také odvodit, že při nezáměrném cyklování, například mikrovlnnou troubou s dobou cyklu 20 s, bude chyba registrace 1s oknové metriky - 5 %.

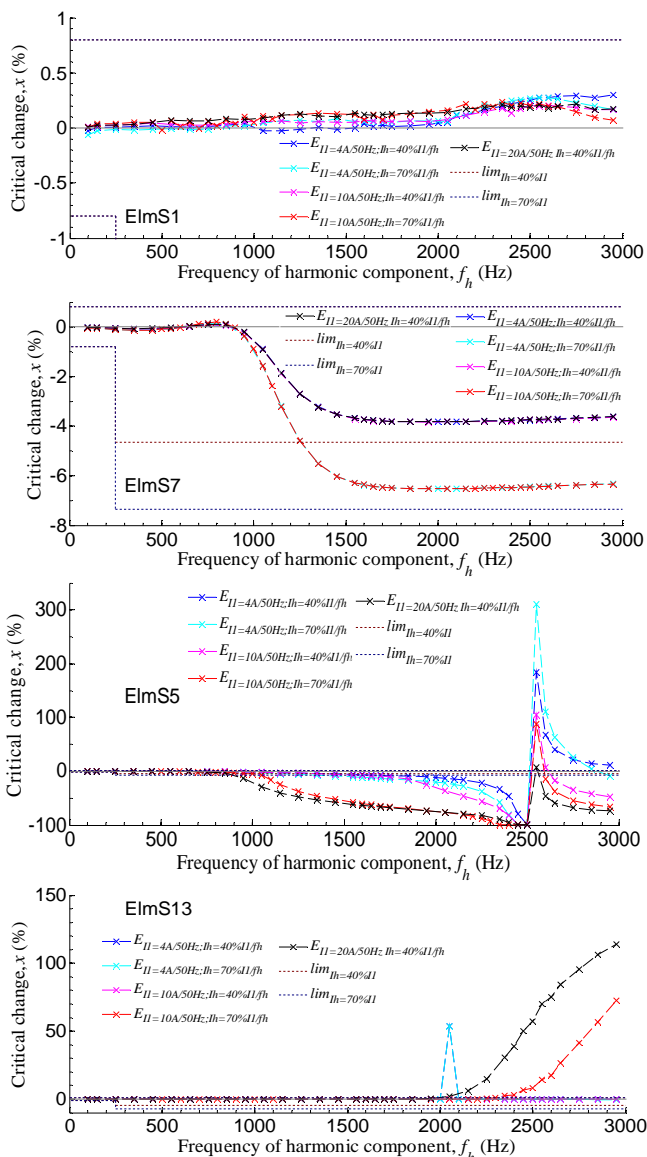
### 3.2 FREKVENČNÍ ODEZVA ELM V MĚŘENÍ ČINNÉ ENERGIE

Součástí typových zkoušek ověřujících odezvu/odolnost v měření energie na ovlivňující jevy dle [16]-[20] je také měření přenosu energie elektroměry na harmonických frekvencích v energetickém pásmu do 2 kHz, které vznikají v důsledku provozu nelineárních silových zařízení v DS. Fakticky se ověření provádí pomocí kombinovaných signálů napětí a proudu, které obsahují vedle základní systémové složky o referenční velikosti, jednu další frekvenční složku o poměrné velikosti a na  $h$ -té harmonické frekvenci, shodné pro napětí i proud. Očekávaný měřený činný výkon (a odpovídající energii) je možné určit z (22), a je  $P_T = P_{50\text{Hz}} + P_{x\text{Hz}}$ . Konkrétně je

požadován test pouze pro  $h=5$ , s velikostmi na páté harm.: 10 % referenční velikosti napětí na základní harm. (230 V) a 40 % určené velikosti proudu na základní harm. (50 % max. proudu ELM). Všechny vzájemné úhly napětí a proudů mají být  $0^\circ$ , tedy obě složky činného výkonu jsou kladné. Přitom kritická změna měřené energie nesmí být větší než  $\pm 1\%$  pro třídu přesnosti A až  $\pm 0.5\%$  pro třídu C.

Požadavky de-facto říkají, že elektroměr má měřit a registrovat energii přenášenou na  $h=5$ . Rovněž lze dovodit, že by měl totéž i pro harm. frekvence nižší. Ale není nikterak ošetřeno, jak se má chovat na frekvencích vyšších. Dalo by se předpokládat, že přídavnou energii nesenou harm. řádu  $>5$  měřit nemusí, ale určitě by měl stále správně registrovat energii základních harmonických.

Pro účely ověření chování v širším frekvenčním rozsahu byly provedeny testy na vybraném souboru elektroměrů [23]. Nasazený testovací systém odpovídá Obr. 10. Sada testovacích signálů zahrnovala variaci řádu přidaných harm. složek od  $h=2$ , s krokem 1, až do 60, pro různé kombinace velikosti základní a přidané harmonické proudu. Velikosti harmonických napětí byly při zkouškách shodné s [17].



Obr. 12. Závislost kritické změny na frekvenci harmonických složek pro variantní velikosti injektovaného proudu

Výsledky měření byly vyhodnoceny v podobě kritické odchylky, která je rozdílem chyby měření s přidanými harmonickými řádu  $h > 1$  a chyby měření v případě pouze základních harmonických složek napětí a proudu:  $x = (e_{xHz} - e_{50Hz}) \cdot 100$  (%). Kde obecně  $e = (A_{ELM} / A_{REF}) - 1$ ,  $A_{ELM}$ ,  $A_{REF}$  jsou činné energie změřené elektroměrem a referenční hodnota určená výpočtem z přesně generovaných signálů.

Pro vybrané elektroměry jsou výsledky v grafické podobě na Obr. 12. Společně s datovými body jsou v grafech vyneseny meze (čárkovanou čarou), které vymezují oblast, ve které by se výsledky měření měly nacházet. Zohledněna je dovolená přidaná odchylka dle třídy přesnosti přístroje a nad  $h=5$  (250 Hz), je připuštěno, že elektroměr nemusí měřit tu část energie příslušející přidáním harmonickým řádu  $h$ . Elektroměr ElmS1 měří a registruje obě injektované složky činného výkonu/energie v celém testovaném frekvenčním rozsahu s malou přidanou odchylkou v mezích tolerance. Druhý prezentovaný (ElmS7), naopak postupně ale strmě eliminuje přidanou složku výkonu, jakmile doplňkový pár harmonických překročí frekvenci 900 Hz (t.j.  $h=18$ ). Což je také v souladu s předpokládaným a možným chováním. Zásadní problém v odezvě vykazují elektroměry ElmS5 a S13. Přestože z počátku, s postupně zvyšující frekvencí/řádem páru harmonických, se oba elektroměry chovají v souladu s požadavky a očekáváním, a vyhovují [17], od jisté frekvence začíná jejich měřicí funkce zásadním způsobem selhávat. Přitom u ElmS5 je to dříve, na nižších frekvencích. Ovlivnění funkce párem injektovaných harmonických vyššího řádu je takové, že u ElmS5 to vede k odchylkám v rozptylu -100 až +300 %. Současně platné minimální požadavky MID standardu [17] evidentně nezaručují jednoznačnost funkce a odezvy elektroměrů.

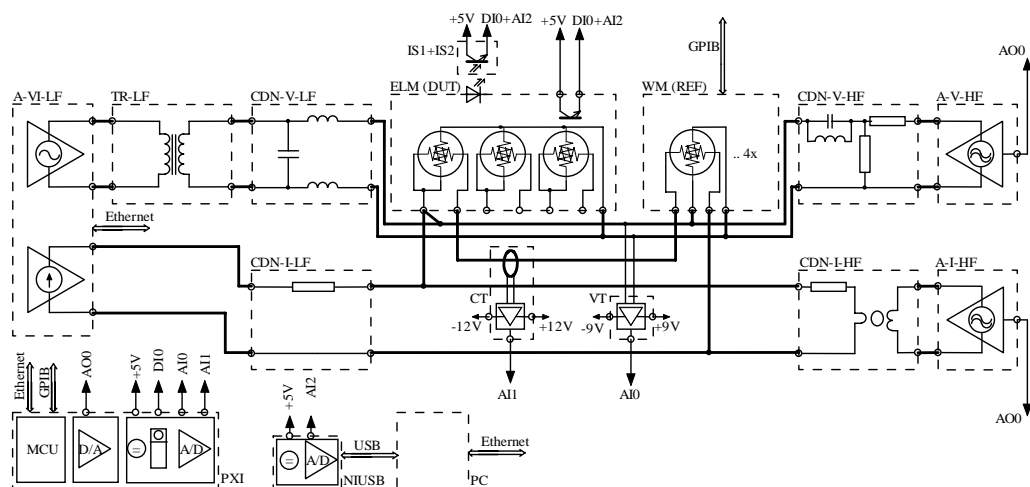
### 3.3 ODOLNOST ELM NA SUPRAHARMONICKÉ V PÁSMU 2 - 150 KHZ

Supraharmonické jsou frekvenční složky proudu a napětí šířící se po vedení nad pásmem běžných harmonických složek, s rozsahem až do ~100 kHz, jejichž původ je spojen především se spínacími procesy polovodičových měničů, ale také například se záměrnou komunikací po silovém vedení (PLC) [12]. Jejich přítomnost je nejvýznamnější v síti NN, s úrovněmi relativně nízkými, které mohou být zesilovány rezonančními jevy, a se značnou dynamikou, která komplikuje možnosti měření [46]. Na druhou stranu, s narůstajícím počtem a výkonem měničů v OPM (např. střídače FV výroben), vzrůstají i úrovně a časově-frekvenční distribuce supraharmonických, a tím přibývá evidencí o elektromagnetické interferenci [12], včetně vlivu na měření elektroměry [26]-[28]. Do jisté míry je situace dána mezerou v související standardizaci, kdy první edice standardu pro ověřování odolnosti na vedená symetrická rušení s částí věnovanou i elektroměrům [25] byla vydána až v roce 2019. Nicméně do současnosti je povinnost testovat odolnost elektroměrů podle std. [25] problematicky globálně vymahatelná, neboť příslušné testy nejsou přímo implementovány v příslušném MID standardu [17].

Standard IEC 61000-4-19 [25] specifikuje: profily zkušebních signálů, testovací úrovně rušivých proudů i napětí, testovací proceduru, včetně specifikací a požadavků na testovací zařízení. Zkušební signál vychází z mono-frekvenční kontinuální složky (CW), obecně napětí a pro elektroměry i proudu, který je přiveden spolu s určeným signálem napětí (proudu) na AC vstupy testovaného zařízení (DUT). V případě elektroměru to znamená, že je buzen signály na systémové frekvenci představující běžnou/referenční úroveň měřené veličiny (činného výkonu) a postupně je do měřicích vstupů superponován rušivý signál. Rušení je injektováno na dané frekvenci a s danou úrovní na min. 3 s a na tak dlouho, jak je potřeba pro ověření funkce. Poté se změní frekvence rušení a proces se opakuje. Rozmítání frekvence rušení je předepsáno od 2 kHz do 150 kHz s krokem 2 %. Což představuje 220 individuálních testovacích bodů. Kromě CW testovacího signálu, je předepsán také signál s pravouhle modulovanými pulsy (MOD), s určenými frekvencemi modulace a střídou 50 %, kdy se frekvence nosného rušení mění shodně s CW. Nadto, je možné použít i jiné testovací signály a jejich profily, založené například na komplexním

parametrizovatelném cyklo-stacionárním Gaussově bílém šumu, či aplikovat speciální proprietární neparametrizovatelné signály emulující konkrétní záznam rušení.

Testovací systém v souladu s požadavky [25] založený na odděleném generování pracovních signálů a rušení s vazbou na elektroměr je schematicky znázorněn na Obr. 13. Jako reference měření parametrů elektrické energie (složek výkonů, energií, atd. v pásnu do ~10 kHz) je použit přesný laboratorní analyzátor s ověřenou odolností, který je vystaven stejným podmínkám s elektroměrem. Odezva testovaného elektroměru je měřena prostřednictvím metrologického optického impulsního výstupu. Kontrolovány jsou ale i ostatní dostupné výstupy. Měření je přírůstek energie v průběhu testovacího bodu, ze kterého je vypočten střední výkon.



Obr. 13. Blokové schéma systému pro testování odolnosti ELM na supraharmonické do 250 kHz, systém testování elektroměrů s nerozpojitelnými napěťovými a proudovými obvody

Záznamy z jednotlivých testů jsou zpracovány ve smyslu vyjádření a vyhodnocení odchylek v měření testovaného elektroměru:

$$\Delta_{P\%}(i) = \frac{P_{ELM}(i) - P_{REF}(i)}{P_{REF}(i)} \cdot 100 - \frac{P_{ELM}(0) - P_{REF}(0)}{P_{REF}(0)} \cdot 100 \quad (34)$$

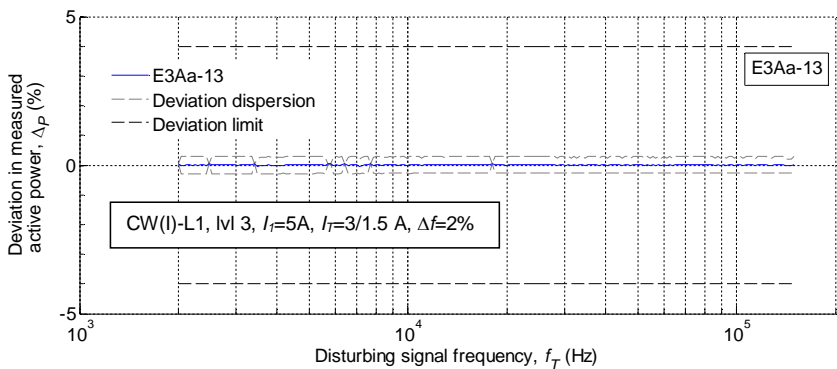
kde  $i$  je  $i$ -tý zkušební bod,  $i=0$  pro testovací bod bez rušení, takto je vyjádřena přidaná odchylka, celkovou odchylku měření tvoří pouze první část (34). Dále  $P_{ELM}$  je střední výkon vypočtený z impulsů elektroměru za dobu dílčí zkoušky na testovacím bodu,  $P_{REF}$  je odpovídající referenční hodnota z analyzátoru.

Příklady výsledků zkoušek jsou na Obr. 14 a Obr. 15. Obr. 14 je příkladem zkoušky elektroměru, který prokazuje dobrou odolnost na daný zkušební signál a jeho profil v celém rozsahu frekvencí, od 2 do 150 kHz. Za vyhovující můžeme považovat střední odchylky od konečně správné hodnoty, které jsou menší než limity v závislosti na třídě elektroměru: A:  $\pm 6\%$ , B:  $\pm 4\%$  a C:  $\pm 2\%$ , navazují na přípustné kritické změny pro elektroměry třídy A, B a C specifikované jako maximální při vlivu dlouhodobých rušení v EN 50470-3 [17].

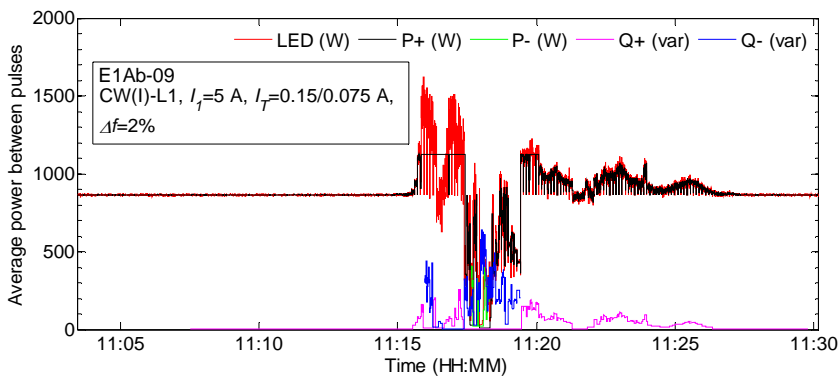
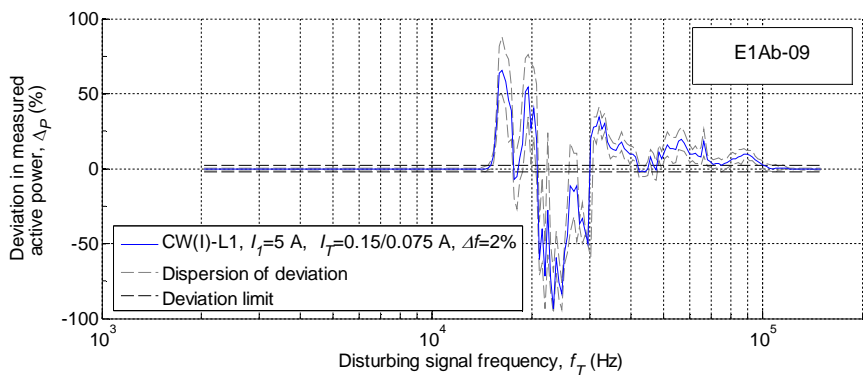
Opakem je příklad výsledku ověření odolnosti na Obr. 15. Z průběhu závislosti na frekvenci rušivého signálu je zřejmé, že měřicí funkce elektroměru selhává a měření je nepřípustně ovlivněno v rozsahu frekvencí rušení od přibližně 14 kHz do 100 kHz, se závislostí na frekvenci rušení nepravidelnou, fluktuující mezi kladnou a zápornou odchylkou měření. Maximální rozptyl středních odchylek měření od správné hodnoty je od  $-90\%$  do  $+65\%$ . V průběhu dané zkoušky byly zároveň monitorovány, a v čase zaznamenávány, signály ze všech dostupných impulsních



výstupů. Z těchto průběhů je patrná korelace průběhu odvozeného činného výkonu (z optického - LED i SO výstupu představující činný výkon v odběrovém směru) s profilem odchylek měření. Zároveň je ale viditelná nenulová odezva na ostatních výstupech (činný výkon v dodávkovém směru a jalové výkony v obou směrech), i když pracovní signály na systémové frekvenci přenášely po celou dobu zkoušky pouze činný výkon v odběrovém směru. Jinými slovy, elektroměr byl ovlivněn tak, že registroval nezanedbatelné množství neexistující vyrobené elektřiny.



Obr. 14. Odchylna měření elektroměru E3Aa-13 při testu odolnosti na rušivý proud (parametry viz legenda)



Obr. 15. (Nahoře) odchylna měření elektroměru E1Ab-09 při testu odolnosti na rušivý proud, (dole) záznam průběhu výkonu z jednotlivých impulsních výstupů v čase, (parametry viz legenda)

## 4 ZÁVĚR

Chytré elektroměry současných generací, jako základ měřicí infrastruktury a důležitá součást budoucích chytrých sítí, jsou předpokládaným celoplošným zdrojem dat, které jsou potenciálním nositelem informace o stavu systému. Dále jsou prostředkem pro realizaci řízení na odběrném místě, v souladu s identifikovanými potřebami distribuční soustavy i zákazníka. Ve výstavbě, provedení a vlastnostech elektroměrů, je ale také nezbytné reflektovat vývoj prostředí, ve kterém elektroměry pracují a které se rychle mění. Především na úrovni sítí nízkého napětí z důvodu integrace nových technologií (od malých a mikro výroben až po nabíjecí stanice elektromobilů či zákaznický energetický management) dochází k dynamické změně. Identifikaci problematických míst ve způsobilosti elektroměrů pro zamýšlené úkoly, a hledání řešení či opatření, se věnuje výzkumný tým na VUT v Brně od roku 2012. V průběhu let byly vyvinuty testovací systémy pro ověřování elektroměrů nad rámec tehdy běžných standardizovaných zkoušek, byly vyvinuty a úspěšně nasazeny analyzátoři pro terénní měření a analýzu specifických rušení, byly zdokonaleny či korigovány metriky elektroměrů, které byly v kooperaci s výrobcí zavedeny do jejich produktů. V neposlední řadě, získané zkušenosti byly využity v rámci konsolidace náplně národních plánů pro přípravu chytrých sítí.

Měření poskytovaná SM elektroměry jsou chápána jako indikativní. Není účelné a ekonomické po nich požadovat třídu měření na úrovni specializovaných přesných analyzátorů kvality elektřiny. Na druhou stranu nedostatky používaných metrik a absence minimálních požadavků na přesnost měření za realistických provozních podmínek, či požadavků na minimální odolnost, prokazující robustnost a spolehlivost provedení, značně limituje použitelnost poskytovaných dat. Ve spojitosti s plánovaným plošným roll-outem chytrých elektroměrů, je ale nezbytné usilovat o dosažení technické zralosti, v dostupném a ekonomicky ospravedlnitelném řešení. Jen v ČR je minimálně 6.4 mil. ks fakturačních elektroměrů [47] a další stovky tis. použitých pro podružná nebo specializovaná měření.

## LITERATURA

- [1] MACHÁČEK, C. *Elektroměry - základ hospodaření elektrinou*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1959, 288 stran
- [2] KNOWLTON, A.E. *Electric Power Metering*. New York:McGraw-Hill Book Company, Inc., 1934, 340 p.
- [3] TOMAN, P.; DRÁPELA, J.; MIŠÁK, S.; ORSÁGOVÁ, J.; PAAR, M.; TOPOLÁNEK, D.; BOK, J.; NOVOTNÝ, J.; ŠKODA, J. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 264 s. ISBN: 978-80-01-04935-8.
- [4] EDISON ELECTRIC INSTITUTE. *Handbook for Electricity Metering*. Tenth Edition. Washington, D.C., 2002, 604 pp., ISBN 0-931032-52-0
- [5] Toledo, F. *Smart metering handbook*. PennWell, USA, 2013, 320 pp., ISBN 978-1-59370-298-4
- [6] WERANGA, K. S. K.; KUMARAWADU, Sisil; CHANDIMA, D. P. *Smart metering design and applications*. Singapore: Springer, 2014. ISBN 978-981-4451-81-9, DOI 10.1007/978-981-4451-82-6
- [7] EN 50160 ed.3:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks
- [8] IEC/EN 62056-6-1 ed.3:2017. Electricity metering data exchange - The DLMS/COSEM suite - Part 6-1: Object Identification System (OBIS)
- [9] MPO ČR. Ekonomické posouzení všech dlouhodobých přínosů a nákladů pro trh a jednotlivé zákazníky při zavedení inteligentních měřicích systémů v elektroenergetice ČR (online). MPO, 2016, cit.: 15.5.2020,

<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2016/11/Ekonomicke-posouzeni-AMM-elektro.pdf>

- [10] CIGRE/CIRED JWG C6/B5.25/CIRED. CONTROL AND AUTOMATION SYSTEMS FOR ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS (EDN) OF THE FUTURE. CIGRE/CIRED, 2017, 67 pp., ISBN : 978-2-85873-413-9
- [11] TLUSTÝ, J., SANTARIUS, P., ŠVEC, J., ŠPETLÍK, J., SÝKORA, T., MÜLLER, Z., KOCUR, Z. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 107 s., ISBN: 978-80-01-04939-6.
- [12] CLC/TR 50627:2015. Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150kHz
- [13] CETINA, Q., ROSCOE, R. A. J., WRIGHT, P. S. Challenges for Smart Electricity Meters due to Dynamic Power Quality Conditions of the Grid: A Review. 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Liverpool, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/AMPS.2017.8078345
- [14] Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on measuring instruments
- [15] Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments
- [16] EN 50470-1:2006. Electricity metering equipment (a.c.) - Part 1: General requirements, tests and test conditions - Metering equipment (class indexes A, B and C)
- [17] EN 50470-3:2006. Electricity metering equipment (a.c.) - Part 3: Particular requirements - Static meters for active energy (class indexes A, B and C)
- [18] IEC/EN 62052-11:2003. Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions Part 11: Metering equipment
- [19] IEC/EN 62053-21:2003. Electricity metering equipment (a.c.) - Particular requirements - Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2)
- [20] IEC/EN 62053-23:2003. Electricity metering equipment (a.c.) - Particular requirements - Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3)
- [21] MORAVEK, J., DRAPELA, J., WASSERBAUER, V., MASTNY, P. Power quality issues related to power flow control in systems with renewable energy micro sources. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, 2016, pp. 283-288, doi: 10.1109/EPE.2016.7521784.
- [22] DRAPELA, J., MORAVEK, J., RADIL, L., MASTNY, P. Performance of Standard Power/Energy Metric under Fast Changes in Active Energy Flow Direction. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Dubai, United Arab Emirates, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177900.
- [23] NOVOTNY, J., DRAPELA, J., TOPOLANEK, D. Frequency response of revenue meters in measured active energy. 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 524-529, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783309.
- [24] Cataliotti, A., Cosentino, V., Lipari, A., Nuccio, S. Metrological Characterization and Operating Principle Identification of Static Meters for Reactive Energy: An Experimental Approach Under Nonsinusoidal Test Conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 5, pp. 1427-1435, May 2009
- [25] IEC/EN 61000-4-19:2014. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-19: Testing and measurement techniques - Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports
- [26] DRAPELA, J., HAVRANEK, Z., JURKA, T. Immunity Issues Related to Revenue Meters (presentation), IEEE PES General Meeting, Denver USA, 2015,

- [https://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/Panel%20Sessions/GM\\_2015/5\\_drapela\\_GMPES2015\\_Panel\\_Harmonics.pdf](https://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/Panel%20Sessions/GM_2015/5_drapela_GMPES2015_Panel_Harmonics.pdf)
- [27] LEFERINK, F., KEYER, C., MELENTJEV, A. Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 49-55, Fourth Quarter 2016, doi: 10.1109/MEMC.2016.7866234
- [28] HAVE, B. T., HARTMAN, T., MOONEN, N., LEFERINK, F. Inclination of Fast Changing Currents Effect the Readings of Static Energy Meters. 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Barcelona, Spain, 2019, pp. 208-213, doi: 10.1109/EMCEurope.2019.8871982
- [29] IEC/EN 61000-4-30 ed.3:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods
- [30] IEC/EN 61000-4-7 ed.2.1:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto
- [31] IEC/EN 62586-1 ed.2:2017. Power quality measurement in power supply systems - Part 1: Power quality instruments (PQI)
- [32] IEC/EN 62586-2 ed.2:2017. Power quality measurement in power supply systems - Part 2: Functional tests and uncertainty requirements
- [33] KOON, W. Current Sensing for Energy Metering (online). Analog Devices, cit. 11.9. 2019, <https://www.analog.com/en/technical-articles/current-sensing-for-energy-metering.html>
- [34] TAN, L., JIANG, J. *Digital Signal Processing* (Third Edition), Academic Press, 2019, ISBN: 978-0-12-815071-9, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815071-9.09995-4>
- [35] ANALOG DEVICES. ADE5169, ADE5569. Single-Phase Energy Measurement IC with 8052 MCU, RTC, and LCD Driver (online). Datasheet, ADE5169/ADE5569 rev.E, 155 pp., cit.: 22.8.2020, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADE5169-5569.pdf>
- [36] STMicroelectronics. STPM10. Programmable single-phase energy metering IC with tamper detection (online). Datasheet, DocID17728 rev.5, 2/2017, 47 pp., cit.: 20.8.2020, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpm10.pdf>
- [37] STMicroelectronics. STPM32, STPM33, STPM34. ASSP for metering applications with up to four independent 24-bit 2nd order sigma-delta ADCs, 4 MHz OSF and 2 embedded PGLNA (online). Datasheet, DS10272 rev.8, 12/2018, 121 pp., cit.: 20.8.2020, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpm32.pdf>
- [38] CZARNECKI, L.S. Power theory of electrical circuits with quasi - periodic waveforms of voltages and currents. *Euro. Trans. Electr. Power*, 1996, pp. 321-328. doi:10.1002/etep.4450060513
- [39] AKAGI, H., WATANABE, E., AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE-Wiley, 2006, ISBN:9780470107614, doi:10.1002/0470118938
- [40] IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions
- [41] A. E. EMANUEL, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. 2010. DOI:10.1002/9780470667149
- [42] BOLLEN, M.H.J., GU, I.Y. H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press, 2006, ISBN: 978-0-471-73168-9
- [43] LANGELLA, R., TESTA, A. A Circular Convolution based Algorithm for Electric Energy Measurement Under Non-Sinusoidal Conditions. 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007, Warsaw, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMTC.2007.379141

- [44] GALLO, D., LANDI, C., PASQUINO, N., POLESE, N. A New Methodological Approach to Quality Assurance of Energy Meters Under Nonsinusoidal Conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 5, pp. 1694-1702, Oct. 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.903607
- [45] FERRERO, A., FAIFER, M., SALICONE, S. On Testing the Electronic Revenue Energy Meters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 9, pp. 3042-3049, Sept. 2009.
- [46] COLLIN, A. J., DJOKIC, S. Z., DRAPELA, J., LANGELLA, R., TESTA, A. Proposal of a Desynchronized Processing Technique for Assessing High-Frequency Distortion in Power Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 10, pp. 3883-3891, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2907755.
- [47] OTE. Statistika, počty OPM dodavatelů v CS OTE, 2020 (online), cit. 8.8.2020, <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/mesicni-zprava-elektrina/pocty-opm-dodavateluv-cs-ote?date=2020-01-01>

## ABSTRAKT

Měření množství a dalších parametrů elektrické energie v předávacích místech mezi obchodními subjekty je nedílnou součástí provozování a využívání střídavé (AC) elektrizační soustavy. Ve spojitosti s ekonomickým významem a hospodařením s elektrickou energií je zásadní znalost správného množství elektřiny, která je předána. V souvislosti s novou generací digitálních elektroměrů pro infrastruktury chytrých sítí a postupnou přípravou plošného roll-outu se však ukazuje, že běžné kategorie elektroměrů vykazují nedostatky ve vlastnostech i provedení. Ty jsou z části dílem používaných metrik, z části důsledkem absence minimálních požadavků na přesnost měření, či požadavků na minimální odolnost.

Přednáška v rámci úvodu do problematiky popisuje vývoj elektroměrů z hlediska historických souvislostí a vymezuje potřebné vlastnosti a výbavu elektroměrů nezbytnou pro řešení předpokládaných úkolů. Následně je proveden rozbor digitálních elektroměrů se zaměřením na měřicí funkci. Jsou popsány používané metriky, jejich vlastnosti a identifikována slabá místa s návrhy řešení. V poslední části jsou demonstrovány odezvy běžných elektroměrů na vybrané jevy spojené s aktivními distribučními sítěmi, s důrazem na kvantifikaci míry závažnosti pro správné měření.

## ABSTRACT

Measurement of the amount and other parameters of electricity at delivery points between commercial entities is an integral part of the operation and use of alternating current (AC) power system. In connection with the economic importance and management of electricity, it is essential to know the right amount of electricity that is transmitted. However, in connection with the new generation of digital electricity meters for smart grid infrastructures and the gradual preparation of a flat roll-out, it turns out that common categories of electricity meters show shortcomings in features and design. These are partly due to the employed metrics, partly due to the absence of minimum requirements for measurement accuracy, or requirements for minimum immunity.

As part of the introduction to the issue, the lecture describes the development of electricity meters in terms of historical context and defines the necessary properties and equipment of electricity meters required for solving the expected tasks. Subsequently, an analysis of digital electricity meters is performed with a focus on the metering function. The used metrics and their properties are described and weaknesses with solution proposals are identified. The last part demonstrates the responses of conventional digital electricity meters to selected phenomena associated with active distribution networks, with emphasis on the quantification of their severity for proper/correct measurement.