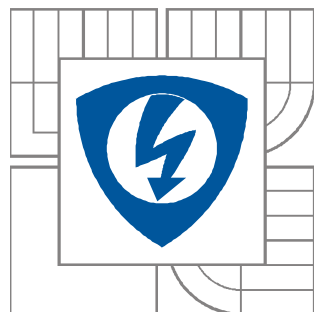


Měření činné energie statickými elektroměry při rychlých změnách mezi odběrem a dodávkou



Centre for Research
and Utilization
of Renewable Energy

Jiří Drápela
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Činná energie

$$E_W = \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} p(t) dt = \int_{t_0}^{t_0 + N_{PER} \cdot T_{PER}} u(t) \cdot i(t) dt$$

Pro běžné potřeby nás zajímá vývoj průchozí energie v čase, odděleně spotřebovaná a dodaná, v třífázovém systému přes jednotlivé fáze

Měřeny jsou nestacionární napětí a proudy, snímány převodníky neideálních parametrů, digitalizovány převodníky konečných parametrů a procesovány metrikou elektroměru zprostředkující základní funkcionalitu v intencích chtěných a očekávaných výsledků.

Konstrukce a metrika elektroměrů v zásadě odpovídá očekávaným vlastnostem (parametrům) vstupních (pracovních) a dalších ovlivňujících signálů

V tomto kontextu jsou elektroměry podrobovány i typovým zkouškám a ověřením

Typové zkoušky ale nezaručují funkční „vyzrálост“ a „správnost“ měření i při jiných než referenčních testech. Problémem je zejména:

- Vhodnost (relevantnost) některých typových testů, které mají prověřit správnou funkci a tedy technicky dobré řešení schopné zajistit spolehlivý výsledek a vlastní funkčnost elektroměru při jiných obdobných, v síti reálných, podmínkách

- Vývoj rušení (typy, úrovně, atd.) v sítích

Přitom značným problémem testování je měřicí schéma elektroměru kdy od vstupu přístroje je první skutečně použitelnou veličinou integrované kvantu energie z impulsních výstupů nebo z displeje

Statické elektroměry v podmínkách aktivních sítí (rozptýlené zdroje se statickými měniči, velké množství polovodičových měničů, řízení spotřeby, atd.,) vykazují odchylku od jejich očekávané funkce, tzn. měření a registrace energie (činné a dalších) v definované toleranci.

Odchylky jsou výsledkem odezvy konstrukce a metriky elektroměrů na signály, které přenos měřené energie v konkrétním místě doprovází.

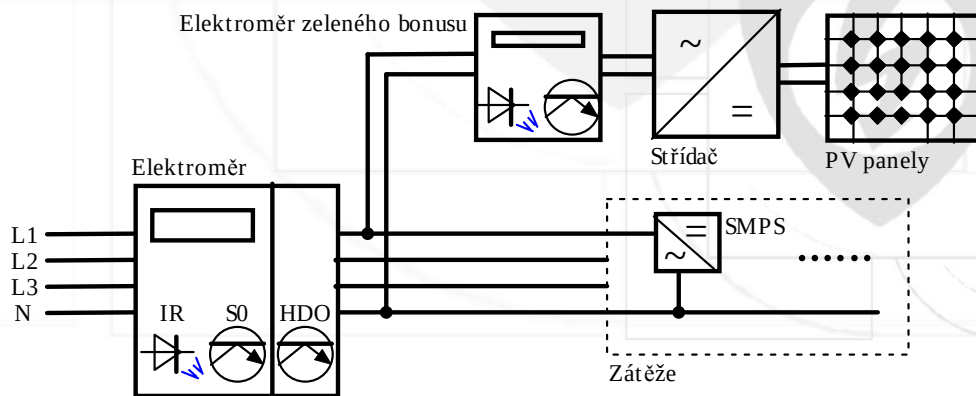
Změřené hodnoty průchozího výkonu a tedy energie se pak v reálných podmínkách mohou lišit více než o „akceptovatelnou“/předpokládanou odchylku od konečně správných hodnot.

Přitom všechny elektroměry jsou dle platné legislativy stanovenými měřidly s platnou typovou zkouškou a ověřením.

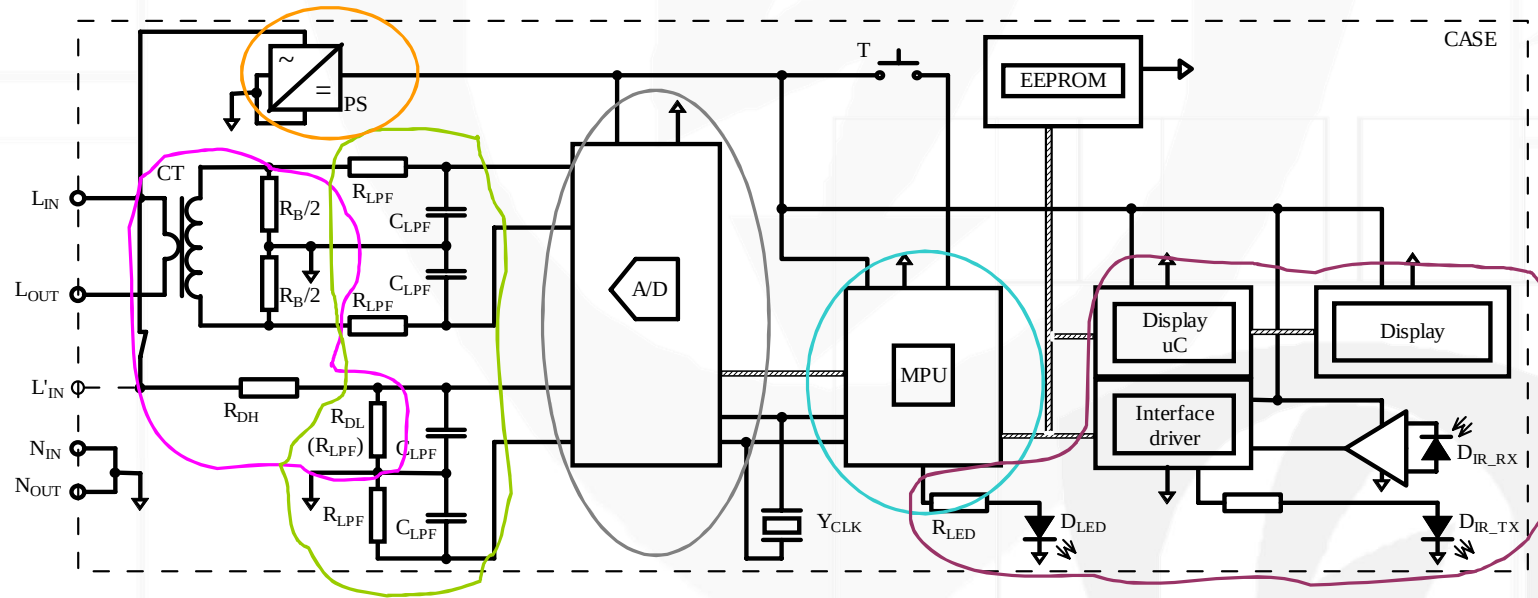
Prezentace je zaměřena na správnost záznamu činné energie do dodávkového a odběrového registru za podmínek, které představují náhodné nebo i periodické přechody mezi odběrem a dodávkou v místech, které realizují výrobu a současně spotřebu elektrické energie.

Odběrná místa na hladině NN provozující zdroj: nejčastěji FVE), typicky v režimu zeleného bonusu, nebo tzv. mikrozdroje připojované na oznámení, které zavádí novela Energetického zákona

S omezením na měření a registraci činné energie ve vazbě na „standardní“ konstrukci a metriku elektroměrů.



Blokové principiální schéma jednofázového statického elektroměru



Napájecí zdroj: Transformátorový s usměrňovačem, dnes obvykle kapacitní s usměrňovačem, výjimečně spínaný zdroj

Převodníky: Převodník napětí: - odporový dělič se vstupním odporem obvykle 1 MW; Převodník proudu: - proudový transformátor s definovanou zátěží, - odporový bočník, - Hallův snímač

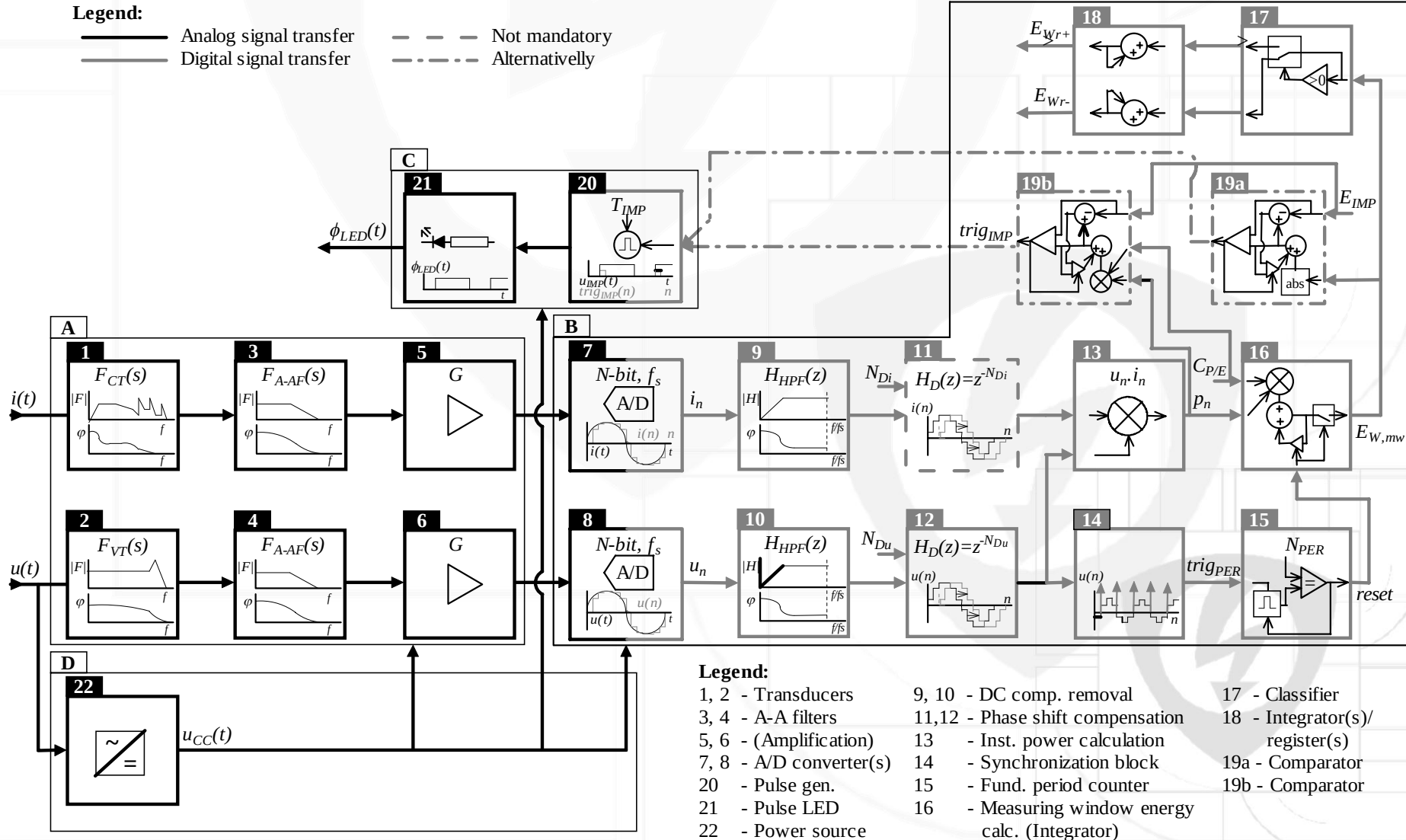
Anti-aliasingové filtry: Shodné pro všechny vstupy; Přizpůsobení frekvenčního rozsahu vstupních signálů vzorkovací frekvenci A/D převodníku; Obvykle filtry 1. řádu

A/D převodník: Digitalizace signálů s pevnou vzorkovací frekvencí Výsledná vzorkovací frekvence v rozsahu obvykle od 1600 do 6400 Hz Mohou být použity i $\Sigma\Delta$ převodníky s řádově vyšší vzorkovací frekvencí a následným down-samplingem

uP jednotka <- metrika elektroměru: Implementována metrika elektroměru; Může být i jako proprietární HW řešení integrující MCU s A/D a některými prvky interface do jednoho obvodu

Interface: Obsluha a provedení optického a elektrického zkušebního výstupu; Obsluha: nezávislé paměti, displeje, komunikačního rozhraní

Signálové schéma jednofázového statického činného elektroměru



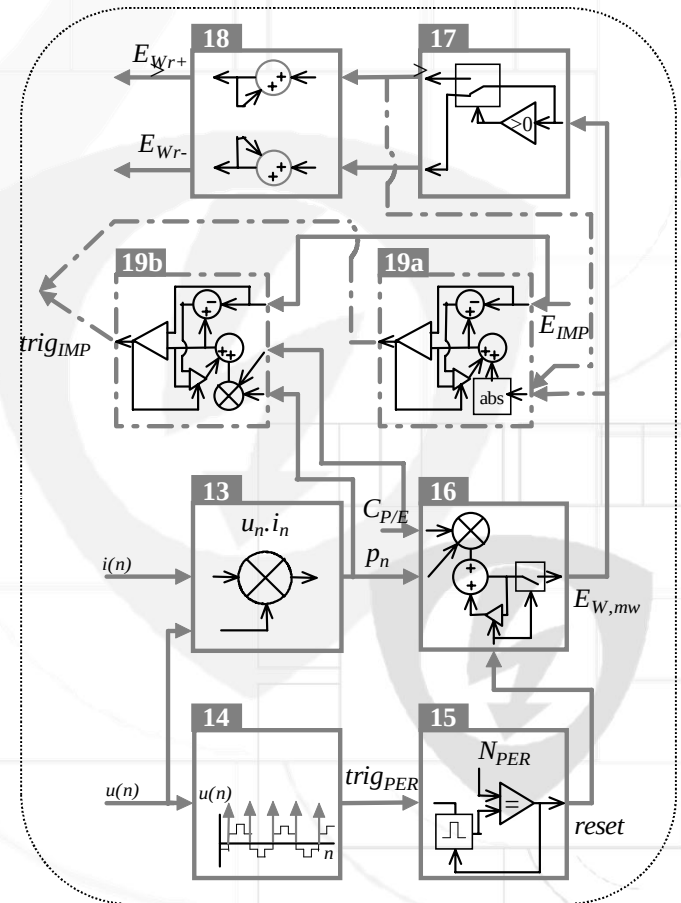
Činná energie měřena postupnou integrací součinu fázově korigovaných napětí a proudu v s frekvencí (periodou) napětí synchronizovaném měřícím okně, které je celistvým násobkem doby trvání periody síťového kmitočtu.

Měřící (integrační) okno je u statických elektroměrů typicky 5-50 period základní síťové frekvence, tzn. přibližně 100 ms až 1 s

V měřícím okně je v podstatě měřen střední výkon, násobený dobou trvání měřícího okna

Činná energie v k-tém měřícím okně je potom

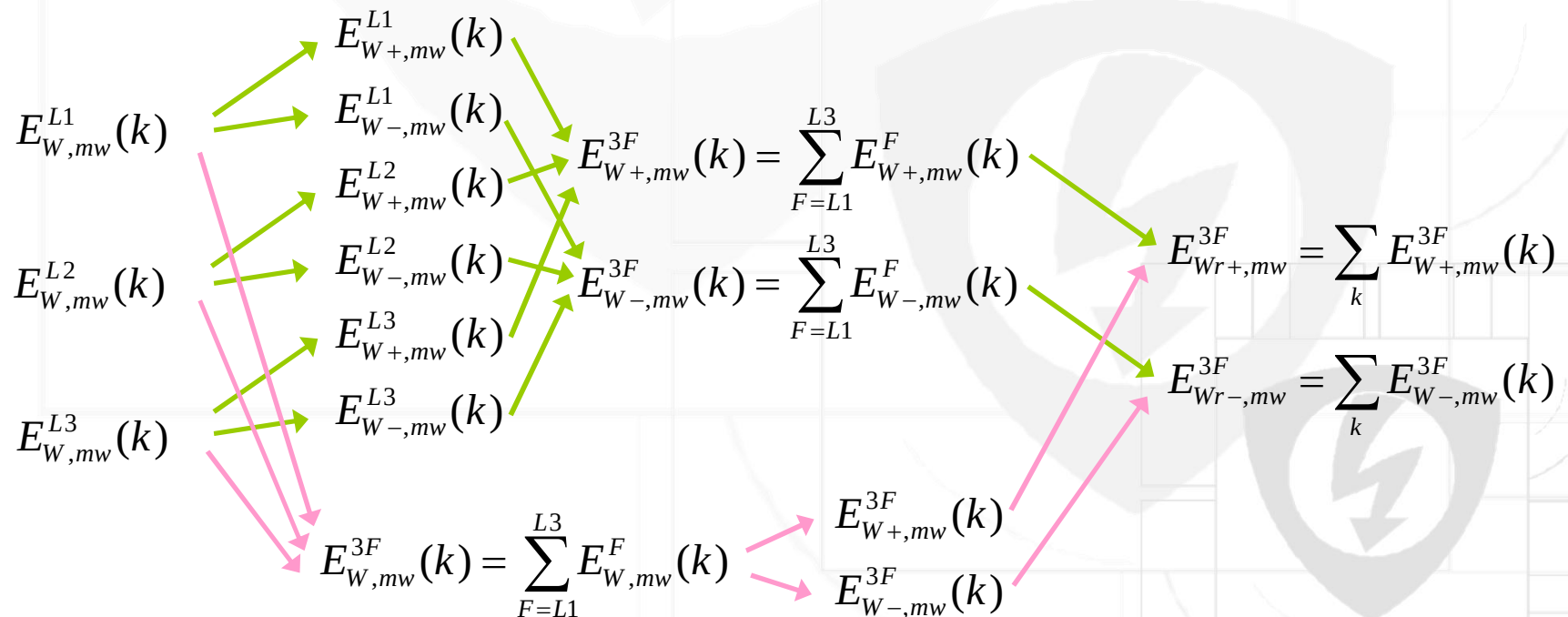
$$E_{W,mw}(k) = \sum_{n=n_1}^{n_1+N_{n/Nper}} C_{P/E} \cdot u_F(n) \cdot i_F(n)$$



Činné energie změřené v jednotlivých měřicích oknech jsou následně třízeny a kumulovány v příslušných registrech odběru a dodávky

U třífázových elektroměrů jsou energie změřené v měřicím okně v jednotlivých fázích:

- 1. nejprve sečteny a výsledek je následně roztríděn do kladného či záporného registru
- 2. nejprve roztríděny na kladné a záporné a ty jsou následně sečteny (kladné zvlášť, záporné zvlášť) a uloženy do příslušného registru



Proces charakterizuje obrázek, uvažováno generování homogenní posloupnosti impulsů

Integrační krok pro porovnání integrované energie s prahovou hodnotou pro jeden impuls

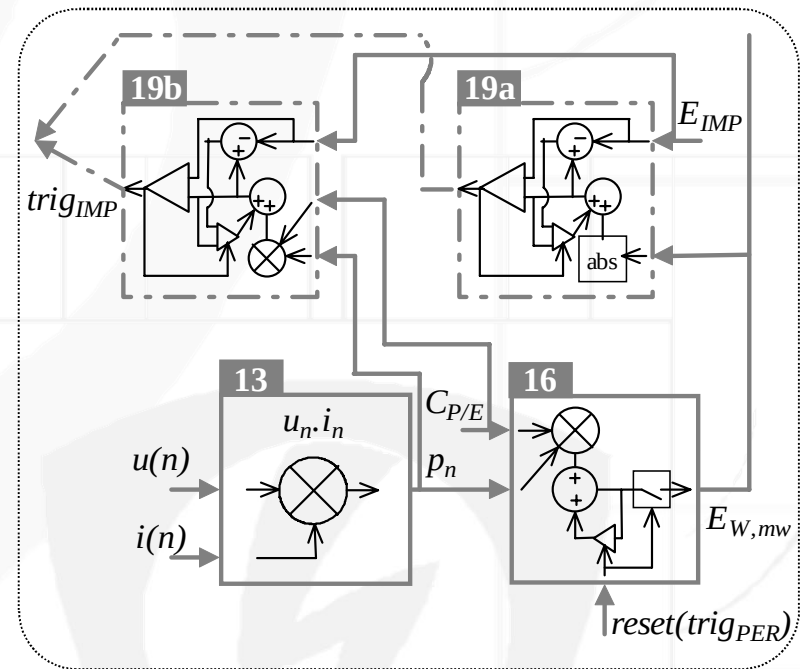
- vzorkovací perioda T_s (blok 19b)
- půl-perioda $T_{1/2p}$
- celistvý násobek periody základního kmitočtu
 - $N \cdot T_{per}$
 - totožný s dobou měřicího okna T_{mw} (blok 19a)

Kladná a záporná energie integrovaná za měřicí interval ($T_{1/2p}$ nebo $N \cdot T_{per}$ nebo T_{mw}) pro impulsní výstup může být agregována a komparována separátně.

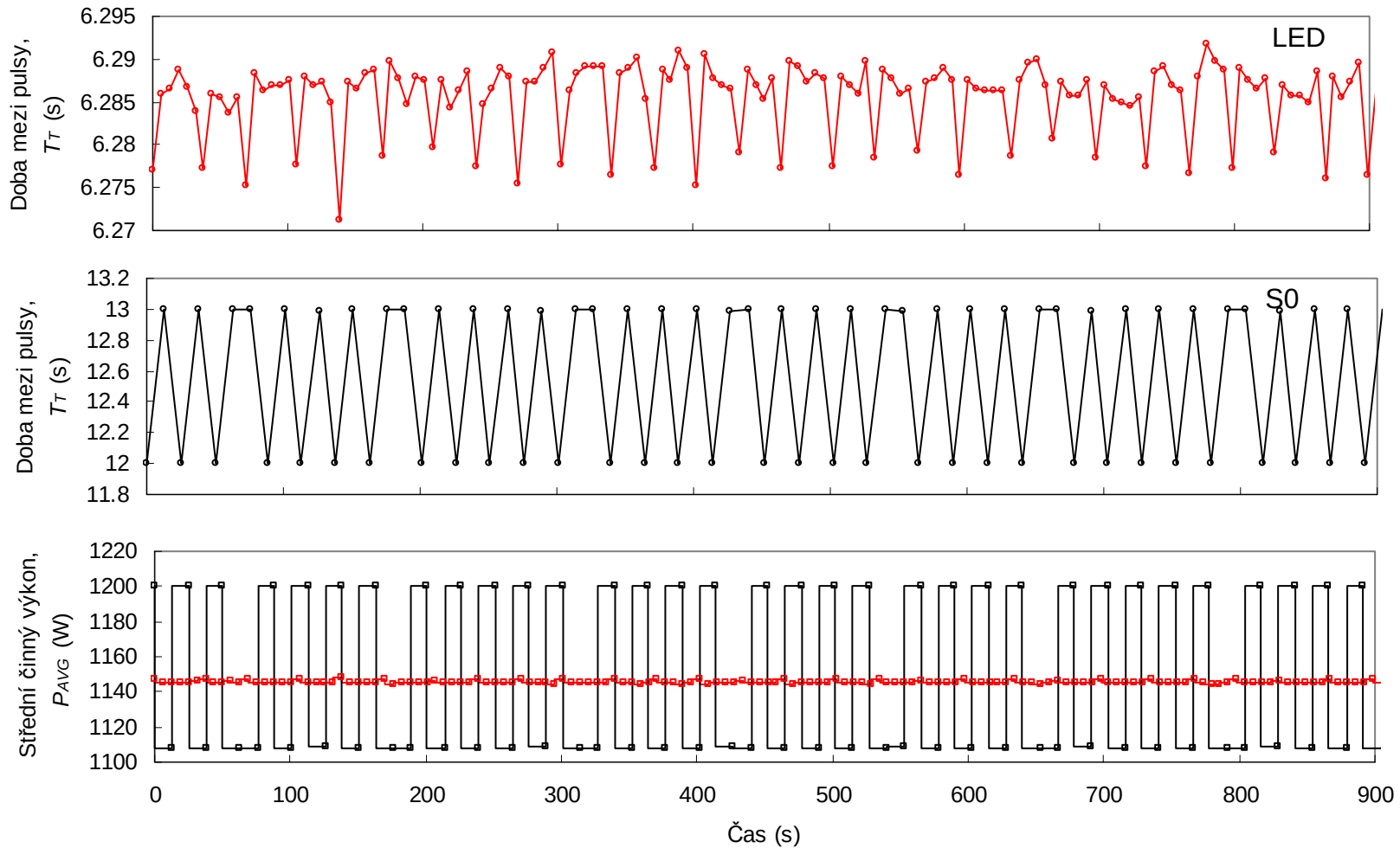
Impulsy odpovídající průběžně agregované odebrané a dodané energii jsou generovány nezávisle

- společně na LED výstup,
- či odděleně na S0 výstupy

Proces generování impulsů může významně ovlivnit (především jejich homogenitu) konkrétní logika převodu energie na frekvenci a řízení přerušení pro obsluhu jednotlivých procesů



Příklad: porovnání LED a S0 impulsního výstupu jednoho elektroměru při referenčních podmínkách



Odchylka činné energie měřená statickými elektroměry při rychlých změnách mezi odběrem a dodávkou

Činná energie odebraná a dodaná je dána časovou integrací přísně odděleného odběrového resp. dodávkového výkonu.

Změny mezi dodávkou a odběrem mohou v důsledku diskrétní oknové integrace vést k nižším registrovaným energiím než skutečným

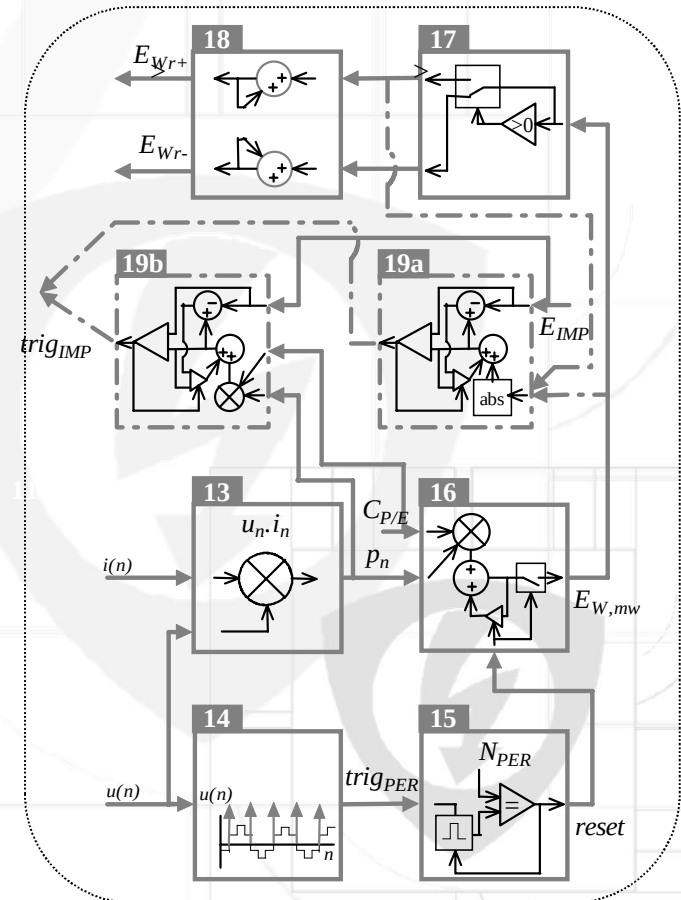
Typicky na stává u odběratelů s výrobou a současnou spotřebou, kdy výkon přechází mezi dodávkou a odběrem, ať již realizovaným záměrně či nevědomě

Ke změně toku výkonů dochází při určitém stupni kontinuální výroby a připojení zátěže, která svým příkonem převyšuje aktuální výrobu, a znovu při odpojení zátěže. Jde tedy o stavy spojené s běžným zapínáním/vypínáním zátěží, s provozem zátěží, které regulují výkon pulzní modulací (žehličky, mikrovlnné trouby, topné spirály, atd.),

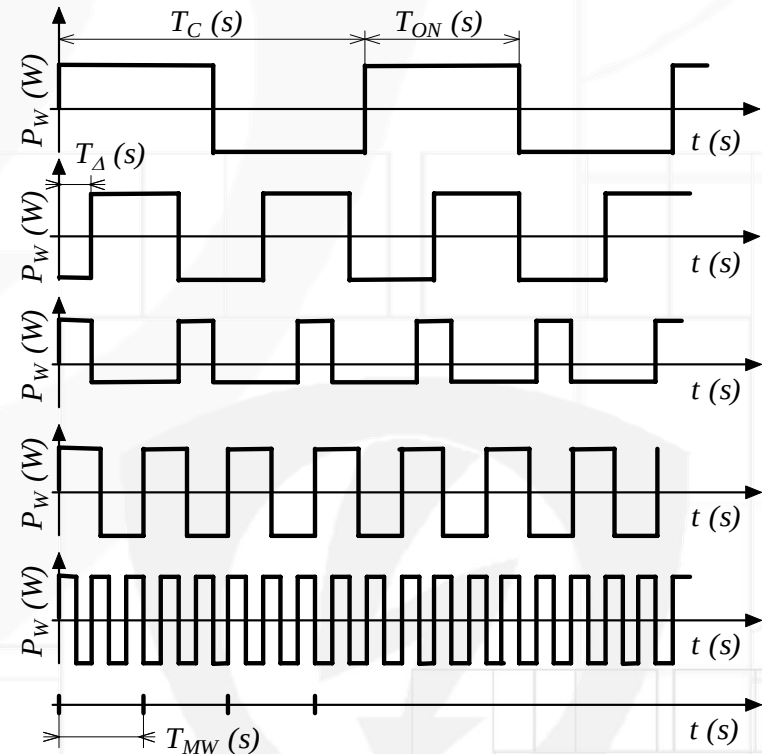
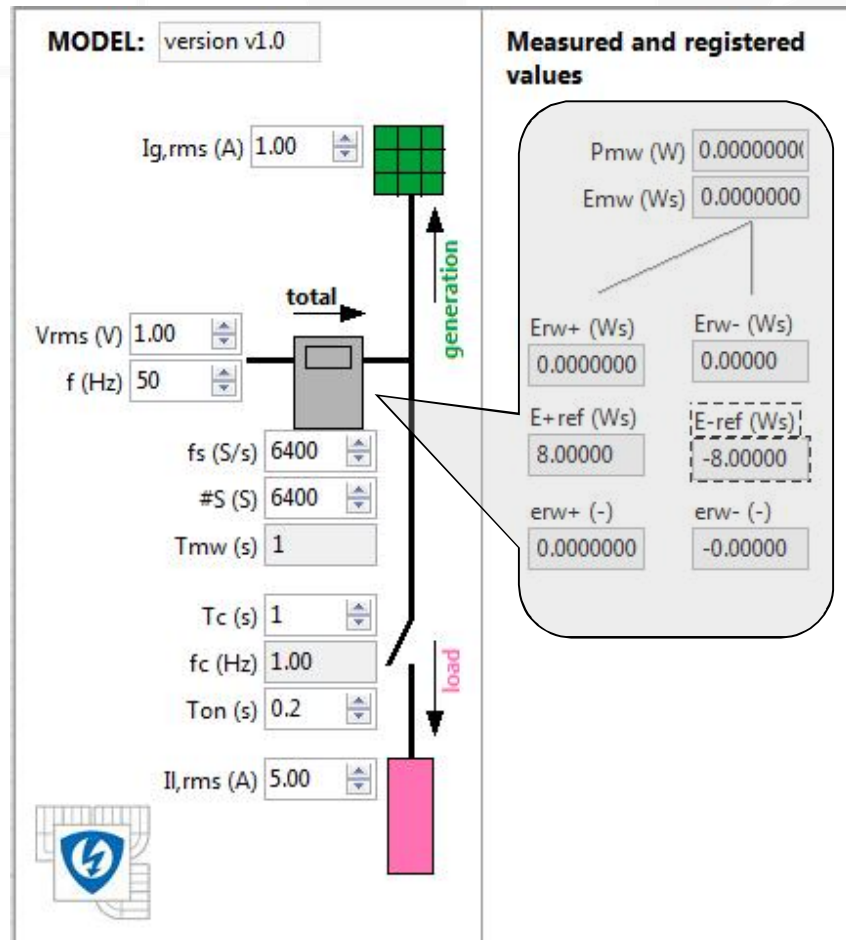
Odchylky změřená a registrovaná energie od skutečných hodnot jsou výsledkem implementované metriky elektroměrů, tj. způsobu výpočtu činného výkonu, resp. činné energie

Dle EN 50470-3: „Funkce ELM implementované softwarově musí být jednoznačně identifikovatelné a jejich činnost musí být dokumentovaná výrobcem.“

Typická odchylka registrované energie od skutečné je 0 až -100%



Modelový případ reverzace výkonu

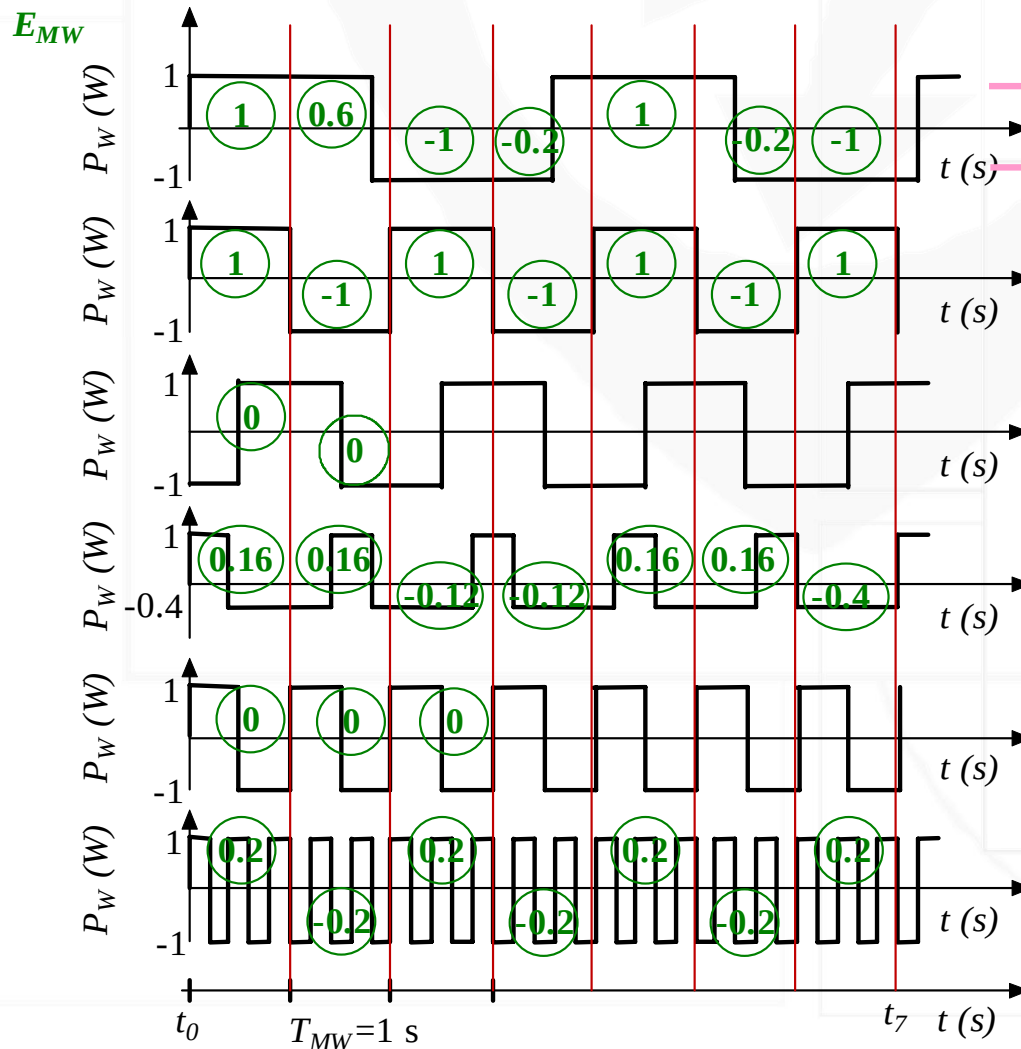


- Měřící okno elektroměru T_{MW} , případně v násobcích doby trvání periody základní harmonické N_{MW}

- Spínání periodické, doba trvání spínacího cyklu T_C , případně N_C
- Doba zapnutí (připnutí) zátěže ve spínacím cyklu T_{ON} , N_{ON} ($T_{ON} \leq T_C$)
- Počáteční posun měřícího okna od spínacího T_Δ
- Energie odebraná ve spínacím cyklu $|E_L|_{T_C}$
- Energie dodaná ve spínacím cyklu $|E_G|_{T_C}$

Příklady výpočtu energie po měřících oknech

Časové průběhy výkonů a energií v měřících oknech



Energie za interval $t_0 - t_7$, tj. za dobu $7 \cdot T_{MW}$

	Registrované E_{rW} (Ws)	Skutečné E_{refW} (Ws)
+	2,6	3,6
-	2,4	3,4
+	4	4
-	3	3
+	0	3,5
-	0	3,5
+	0,64	2
-	0,64	2
+	0	3,5
-	0	3,5
+	0,8	3,6
-	0,6	3,4

Kladné

Záporné

Předpoklady

- Analýza provedena za zjednodušujících (idealizovaných) podmínek
- Reálná omezení (konečná vzorkovací frekvence, regulační krok spínače zátěže, apod.) nejsou v prvním přiblížení uvažována
- Výkon zdroje P_G konstantní
- Příkon zátěže P_L v intervalu T_{ON} konstantní
- Doba spínacího cyklu T_C a doba sepnutí T_{ON} v čase neměnná
- Výsledkem je relativní registrovaná energie v kladném a záporném registru vztažená ke skutečné odebrané či dodané elektrické energii

$$e_{rW+} = \frac{E_{rW+}}{E_{refW+}}; e_{rW-} = \frac{E_{rW-}}{E_{refW-}}$$

Limitní případy

- Vybalancovaná energie výroby a spotřeby ve spínacím cyklu

$$|E_L + E_G|_{T_C} = 0; P_L \cdot T_{ON} + P_G \cdot T_C = 0$$

- Synchronní spínací a měřící okno – $T_{\Delta}=0$ a

$$\frac{T_C}{2} = m \cdot T_{MW} \longrightarrow e_{rW+} = e_{rW-} = 1$$

kde $m \in \mathbb{N}^+$

$$m \cdot T_C = T_{MW} \longrightarrow e_{rW+} = e_{rW-} = 0$$

Vybrané závislosti v řezech

Invariantní parametry

$$T_C/T_{MW}$$

$$T_{ON}/T_C$$

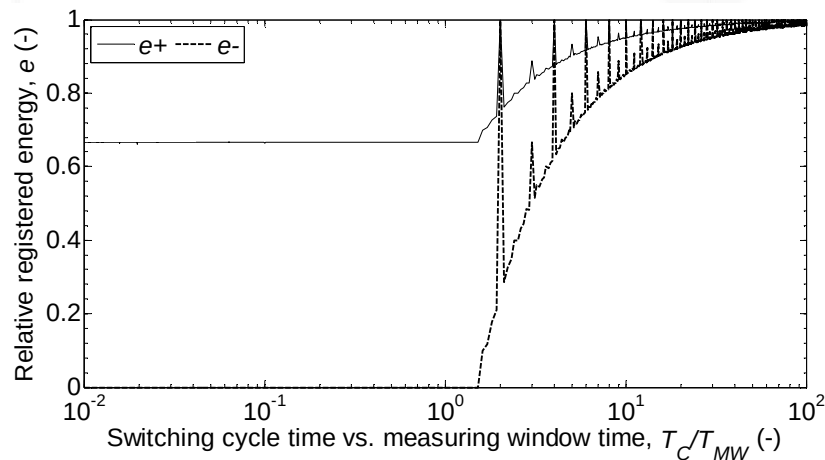
$$E_L/E_G$$

$$T_\Delta$$

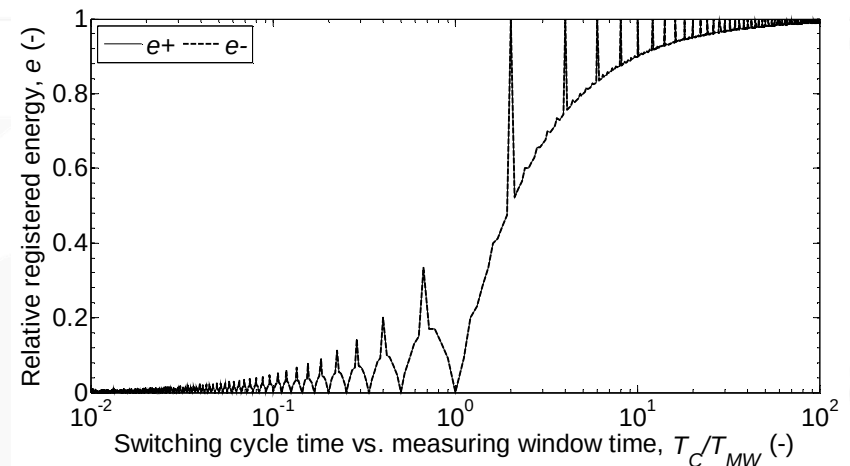
Doba pozorování v případě asynchronního spínacího a měřicího okna

$$T_{PN} = LCM(T_C, T_{MW})$$

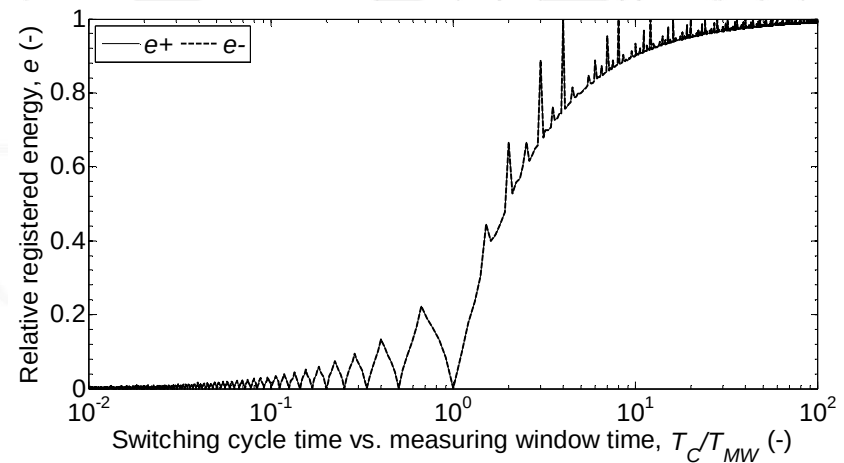
$$T_{ON}/T_C=0.5, T_\Delta=0, E_L/E_G=2$$



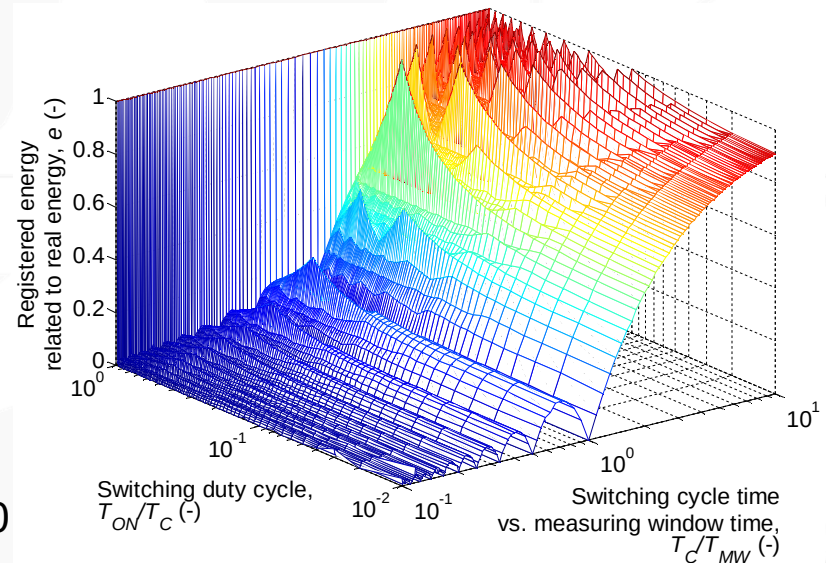
$$T_{ON}/T_C=0.5, T_\Delta=0, E_L/E_G=1$$



$$T_{ON}/T_C=0.25, T_\Delta=0, E_L/E_G=1$$

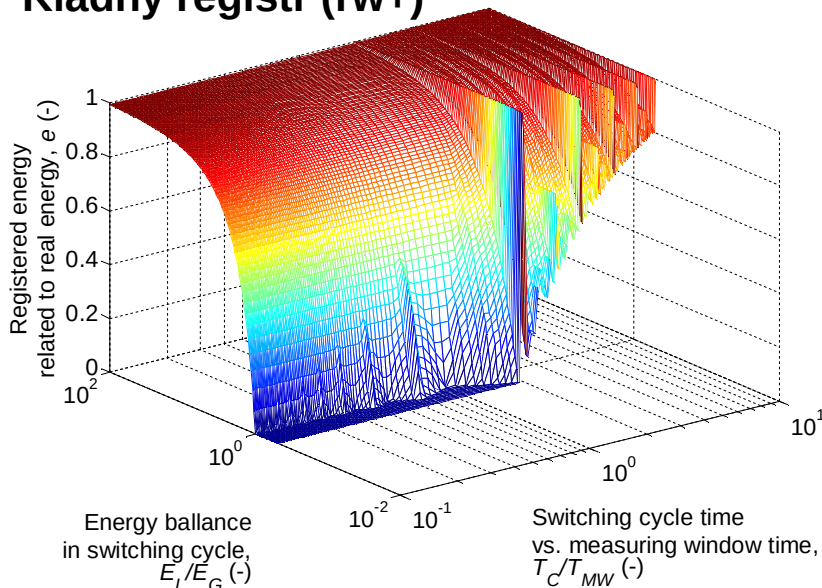


Závislost relativní registrované energie na poměru délky spínacího měřicího okna (cyklu) T_C/T_{MW} a na poměrné době sepnutí ve spínacím cyklu T_{ON}/T_C , pro bilanci energií v měřicím okně $E_L/E_G=1$ a $T_\Delta=0$, **Kladný registr (rw+)** →

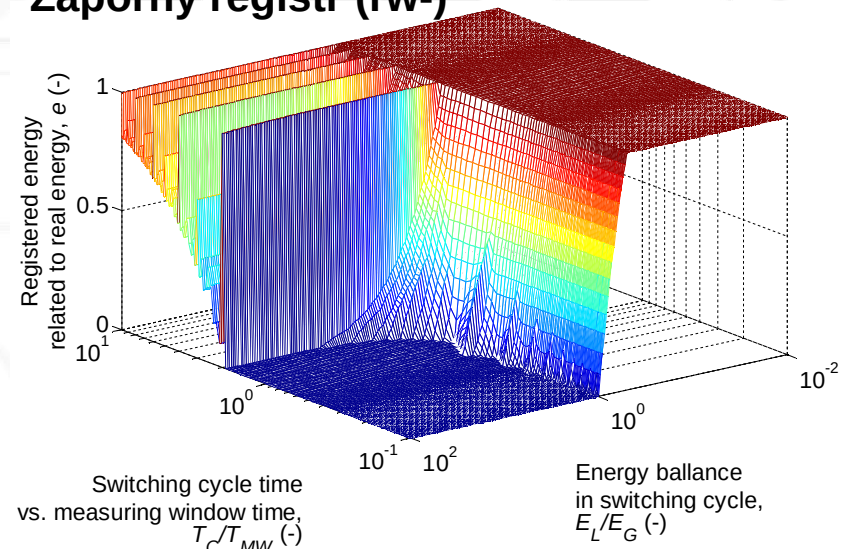


Závislost relativní registrované energie na poměru délky spínacího měřicího okna T_C/T_{MW} a na bilanci energií v měřicím okně E_L/E_G pro $T_{ON}/T_C=0.5$, $T_\Delta=0$

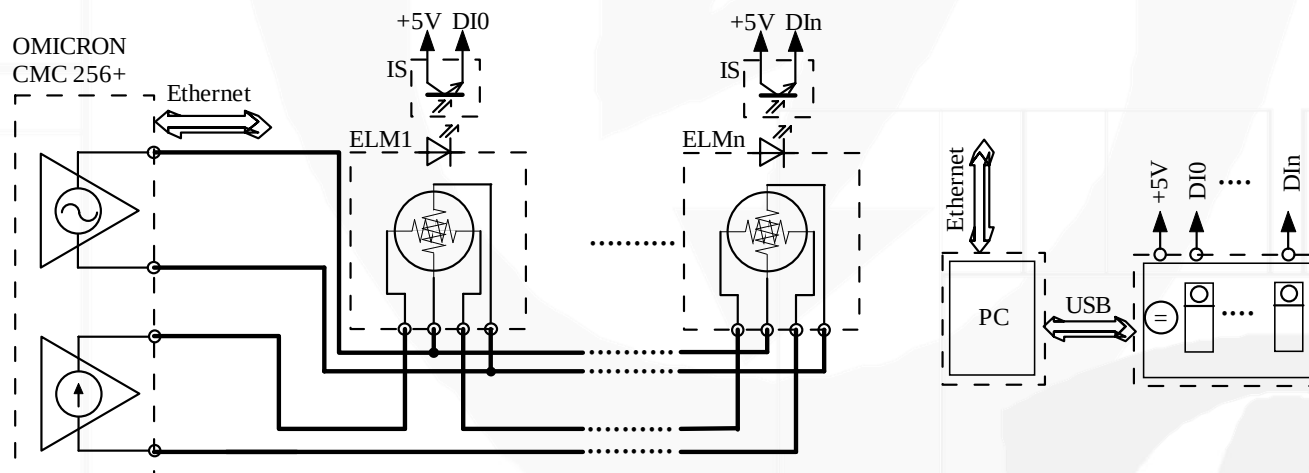
Kladný registr (rw+) ←



Záporný registr (rw-)



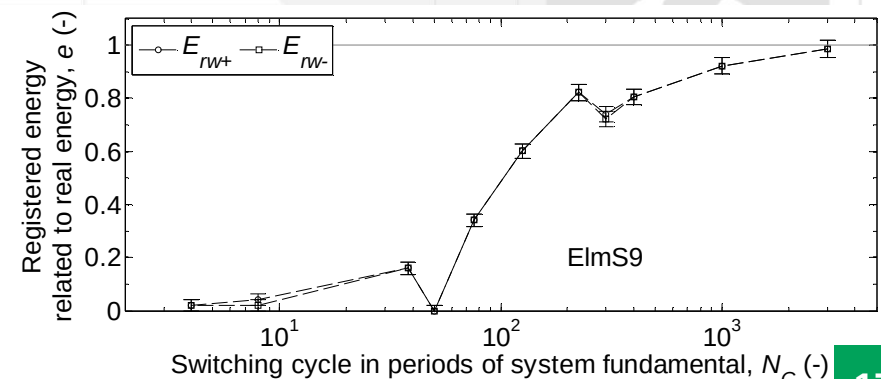
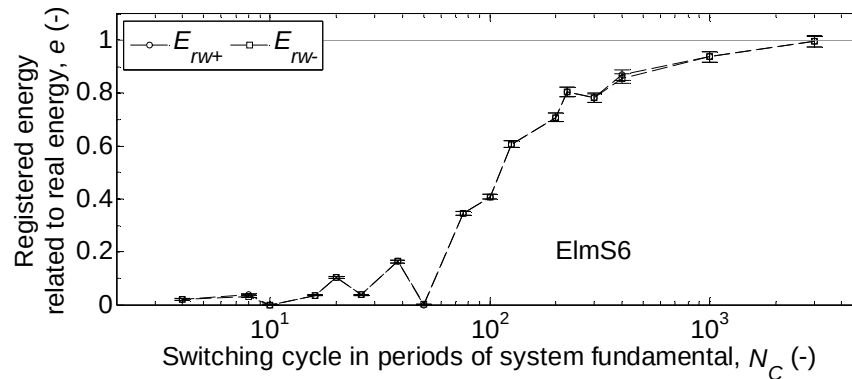
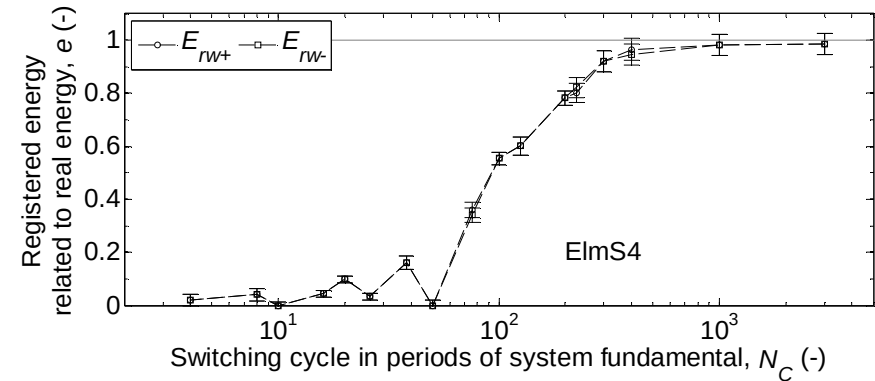
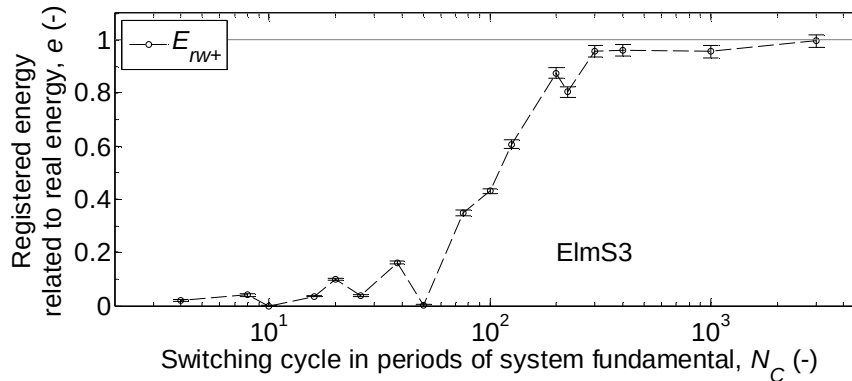
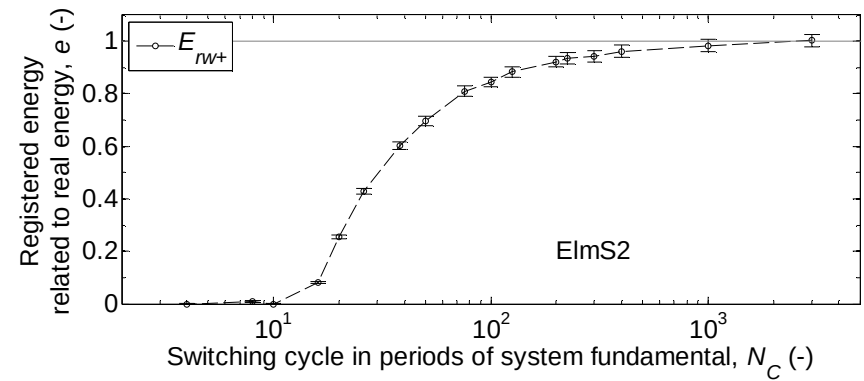
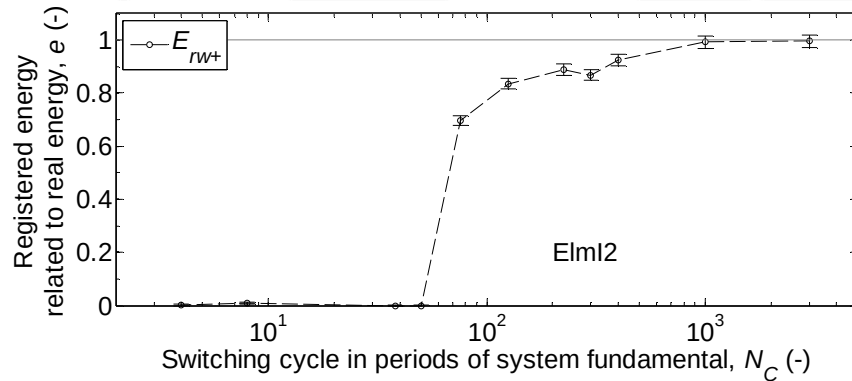
Testovací systém (zjednodušené jednofázové schéma)



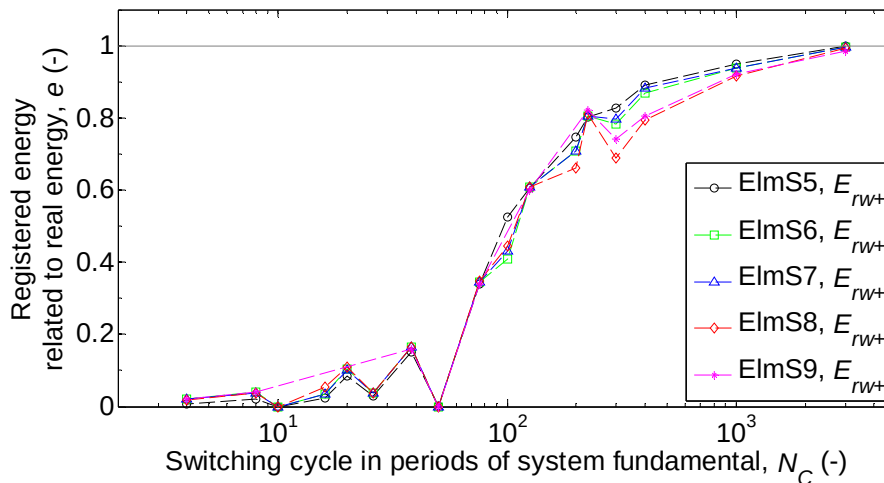
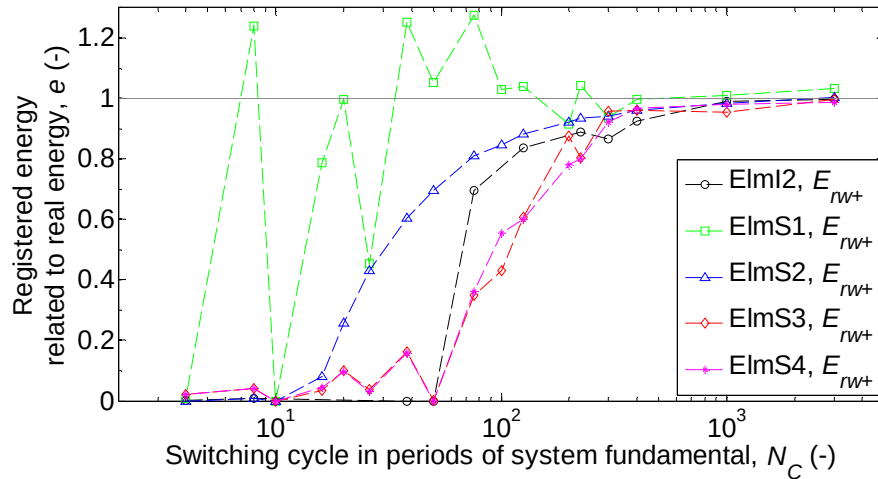
Parametry testů

- **napětí:** průběh harmonický, frekvence 50 Hz, velikost referenční (230 Vrms)
- **proud:** průběh harmonický, frekvence 50 Hz (synchronní s napětím), velikost 15-20 Arms, fázový posuv vůči napětí 0° (odběr), nebo 180° (dodávka)
 cyklování: doba cyklu proměnlivá v sudých násobcích doby periody harmonického proudu, tj. $T_C = 2 \cdot p \cdot T_{PER}$, $p \in \mathbb{N}^+$ resp. $N_C = 2 \cdot p$; střída cyklu je $T_{ON} / T_C = 0,5$ potom odběr (fázový posuv proudu vůči napětí 0°) je po dobu $T_C / 2$, tzn. počet period $N_C / 2$; obdobně pro dobu trvání fázového posuvu proudu vůči napětí 180° ; změna úhlu synchronizovaná s průchodem proudu nulou, velikost proudu při dodávce a odběru stejná $\rightarrow |E_L|_{T_C} = |E_G|_{T_C}$
- doba měření určená nezbytnou dobou pro dosažení nejistoty odečtu z registru lepší než 0.5%; spínací a měřicí cyklus nesynchronizován $T_\Delta = ?$

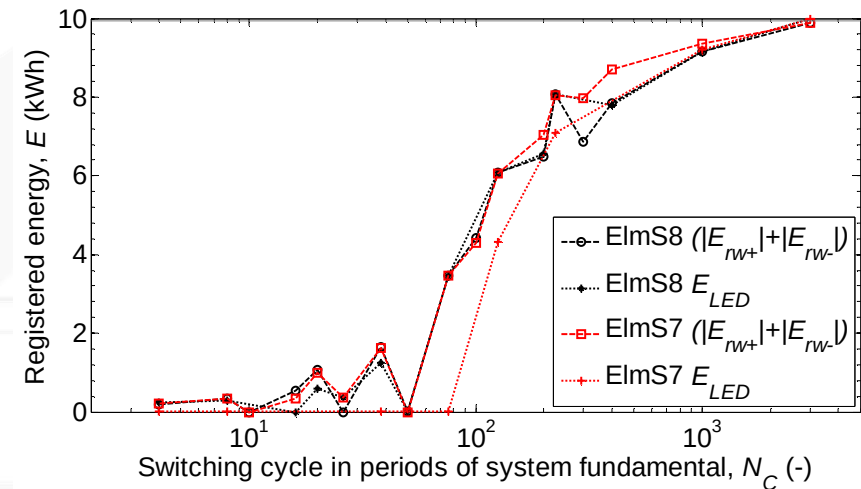
Výsledky měření na elektroměrech, $T_{ON}/T_C=0.5$, $|E_L|_{T_C}=|E_G|_{T_C}$



Výsledky měření na elektroměrech, $T_{ON}/T_C=0.5$, $|E_L|_{T_C}=|E_G|_{T_C}$

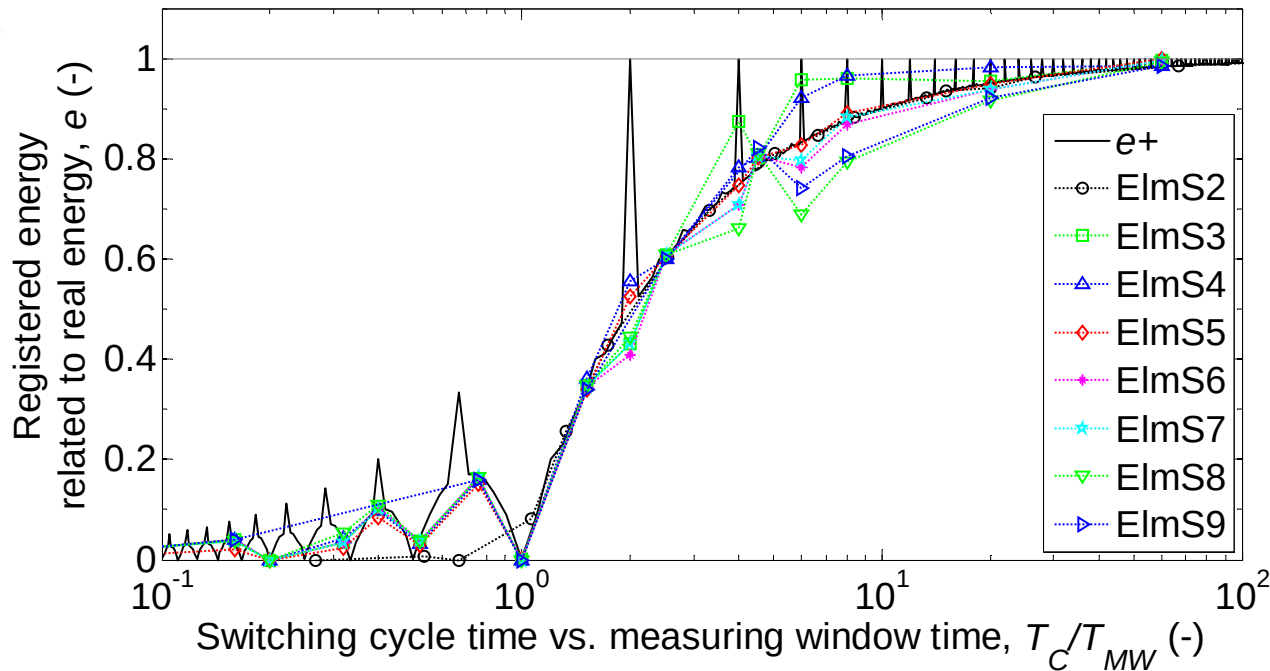


Neshoda registrů s LED



Porovnání měření s výsledky modelu standardní metriky statických elektroměrů

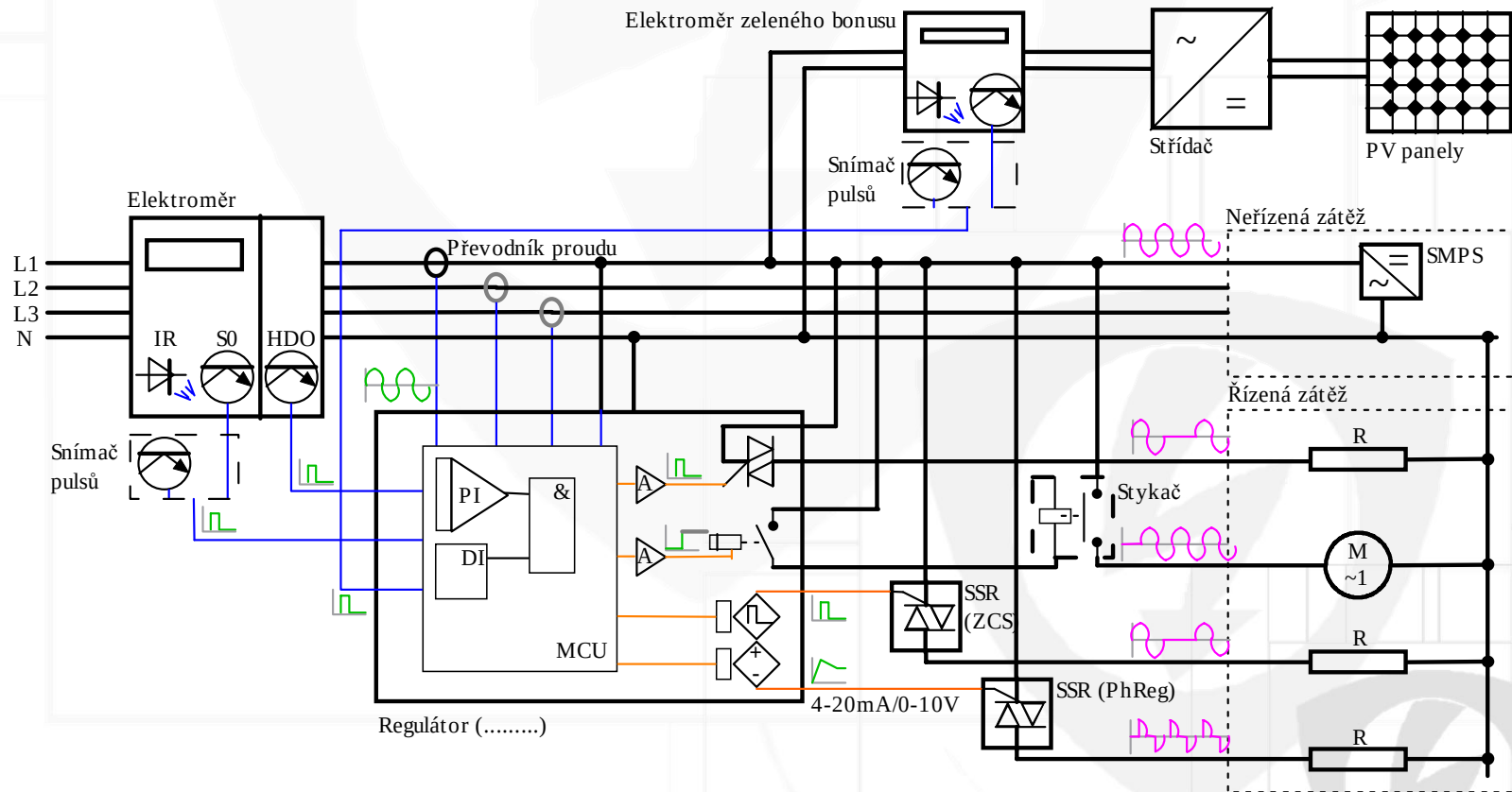
$$T_{ON}/T_C=0.5, |E_L|_{T_C}=|E_G|_{T_C}$$



Je zřejmé, že pokud bude spínací cyklus zátěže, při vybalancování spotřebované a vyrobené energie ve spínacím cyklu ($|E_L + E_G|_{T_C} = 0$), kratší nebo maximálně roven době měřicího okna elektroměru ($T_C \leq T_{MW}$), bude velikost registrované energie výrazně nižší než energie skutečně prošlá. Ideálně bude nulová když $T_C = T_{MW} / m$, kde $m \in \mathbb{N}^+$

Uvedeného faktu (vlastností metriky elektroměrů) využívá i systém řízení „vlastní“ spotřeby regulátory s obchodními názvy: WattRouter, GreenBonO, atd.

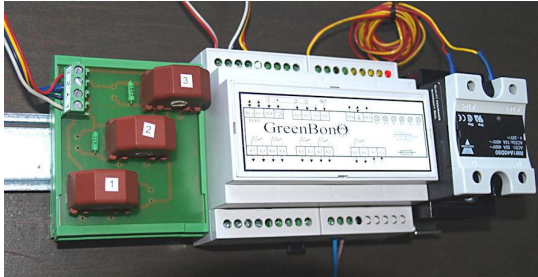
Typické zapojení a vybavení regulátoru



Regulátory standardně podporují a obsahují triakový silový výstup, releový silový výstup a signálový pulzně modulovaný výstup při řízení SSR (Solid State Relay)

Komerční řešení

GreenBonO - YORIX



WATTrouter - WATTprojekt



UDM60 – CARLO GAVAZZI (ENIKA)



ENcontrol Power Balancer - ENcontrol



BEMS – NELUMBO Energy

ETX-ESE - ELTEX ELECTRONIC



Funkce regulátoru

- Cílem regulátoru je vyvážit spotřebu instalace s výrobou provozovanou v režimu zeleného bonusu pro optimalizaci peněžních toků
- Proces je realizován prostřednictvím řízené zátěže, která je regulována podle potřeby tak, aby byla nastolena energetická (výkonová) rovnováha mezi celkovým odběrem a výrobou činné elektrické energie
- Řízený odběr tvoří zátěže, jejichž závislé nasazování nemá vliv na komfort využití, většinou se jedná o spotřebiče s akumulační schopností, jako elektrický ohřev TUV, elektrické akumulační vytápění, klimatizace, atd.
- Současné regulační systémy, s ohledem na jednoduchost, dostupnost, EMC, ad. využívají pulsního řízení příkonu zátěží, nikoliv „plynulé“ řízení jak je často uváděno, tzv. střídání stavu zapnuto a vypnuto
- Přitom je využíváno slabiny elektroměrů, které v současné době používají měřící okno $T_{mw}=1$ s, přesněji 50 period síťového kmitočtu, ve kterém měří průměrný činný výkon
- Spínací cyklus zátěže T_c pro dosažení nulových nebo minimálních registrovaných činných energií (dodaných či odebraných) musí být tedy maximálně roven měřící periodě elektroměru T_{mw} nebo kratší, přesněji m násobně kratší, kde m je celé kladné číslo
- Za zjednodušujících předpokladů lze tedy pro potřebný čas zapnutí T_{on} zátěže s příkonem P_L v periodě T_c při výkonu FVE P_G napsat

$$T_{ON} \cdot P_L = T_C \cdot P_G = \frac{T_{MW}}{m} \cdot P_G \Rightarrow T_{ON} = \frac{T_{MW}}{m} \cdot \frac{P_G}{P_L}$$

Funkce regulátoru (pokračování)

- Pro účely takto rychlého spínání se používají polovodičové spínače – triaky (interní), nebo SSR (Solid State Relay) (externí).
- Pro omezení harmonických a rušení se využívá spínání v průchodu napětí nulou (ZCS – Zero Cross Switching), a s ohledem na funkci je regulace omezena na celé periody.
- Přitom minimální interval zapnutí T_{on} je 1 perioda
- Součtové proudy odběru a dodávky v jednotlivých fázích jsou (zjednodušeně) vyhodnoceny pro každou fázi regulačními členy založenými na PI regulátoru, kdy zadaná hodnota proudu je nulová hodnota
- Regulátor v případě toku výkonu do sítě začne výkon integrovat a zvyšuje střidu (T_{on}/T_c), dobu zapnutí T_{on} v regulačním cyklu T_c , pulzně modulovaného (PM) signálu, který řídí silové SSR. Pokud nastane rovnováha mezi odběrem a dodávkou, regulační odchylka je nulová a střída zůstává konstantní
- Jestliže střída dosáhne 100% a je dodává výkon do sítě, je se zpožděním sepnut releový výstup, připínající další (dlouhodobější) zátěž
- Poté opět spotřeba převyšuje dodávku (odběr výrobu) a regulátor začne snižovat střidu spínání SSR.
- Pokud střída signálu klesne na nulovou hodnotu i když je stále realizován odběr ze sítě, jsou se zpožděním odepínána postupně relé s přiřazenými zátěžemi
- V mezní situaci, kdy je nižší střída a doba zapnutí je právě jedna perioda, dochází v zájmu optimální bilance výkonů k prodlužování doby cyklu T_c

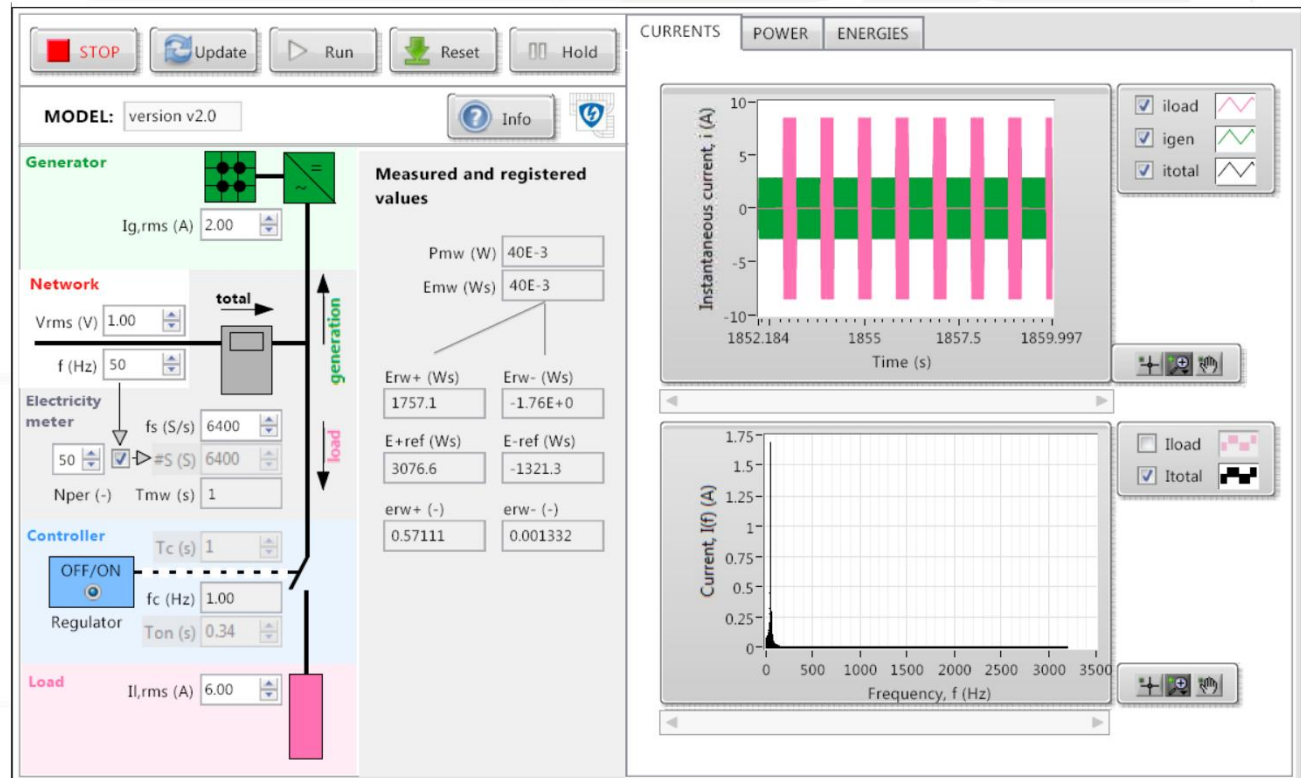
Funkce regulátoru (pokračování)

Řídicí algoritmus regulátoru je „optimalizován“ na použitý elektroměr

Jestliže je použit elektroměr vyhodnocující činnou energii do registrů:

- součtem parciálních energií z jednotlivých fází: je použit zjednodušený algoritmus nerozlišující přiřazení výroby a spotřeby do jednotlivých fází
- separátním součtem kladných a záporných energií z jednotlivých fází (označení elektroměru trojúhelníkem): musí být použit algoritmus řízení po fázích.

Pro účely analýzy interference pulsně řízených zátěží s metrikou elektroměru byl vytvořen a je dostupný SW



Popisovaný děj v žádném případě nevede ke „ztrátě“ energie

Standardní metrika elektroměru nedokáže správně registrovat skutečně prošlou energii (v dodávkovém resp. odběrovém registru) pokud se v průběhu měřicí periody mění směr toku výkonů přes elektroměr.

Jestliže je četnost změn (strmých přechodů z odběru na dodávku) vysoká, mohou být registrované hodnoty energie výrazně nižší, (vždy nižší) než v každém ze směrů skutečně prošlé.

Pokud budeme uvažovat odchylku v registrované energii 2%, pak bude chyba (odchylka) způsobená uvedeným jevem větší než 2%, když bude spínací cyklus kratší než 50-ti násobek doby měřicího okna (při $T_{mw}=1s$ je to $T_c=50 s$) (v případě vybalancovaných energií v T_c)

Dané vlastnosti elektroměrů využívají regulátory pro optimalizaci spotřeby využívané typicky v instalacích s výrobnou provozovanou v režimu zeleného bonusu

Elektroměry tedy neměří správně, nicméně saldo energie je nulové

Síť je v podstatě využívána pro krátkodobou akumulaci energie (cyklus do 1 s)

Avšak tokem energie v napájecí síti vznikají ztráty, na jejichž krytí se ale původce nepodílí, jelikož se podíl odvozuje od registrované energie.

Dopad na chybu měření standardní metriky se může výrazně omezit zkrácením integračního intervalu, limitně na jednu periodu (20 ms) – interval pro třídění energie do registrů, nicméně nelze popisovanou závislost zcela eliminovat, pokud se v základu nezmění systém (definice) měření činného výkonu/ činné energie.

Děkuji za pozornost

Dotazy?

Kontakt:

Jiří Drápela
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky
Technická 3082/12
61600 Brno
tel: +420 541146211
email: drapela@feec.vutbr.cz, drapela@ieee.org