

Měření výkonu v obvodech s pulzně řízenými zdroji napětí

doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., Ing. Martin Novák, Ph.D.
ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky

V článku je věnována pozornost možnostem jednoduché implementace metod pro číslicové měření elektrického výkonu v ustálených stavech a při pomalých přechodných dějích v obvodech napájených ze zdrojů, jejichž výstupní napětí je formováno šířkově pulzní modulací. V článku jsou prezentovány možné koncepce měřících zařízení a výsledky zkušebních měření.

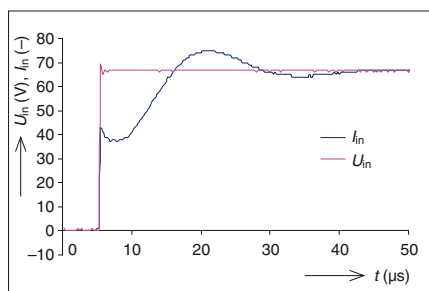
1. Úvod

V současné době se v silnoproudé elektrotechnice uplatňují ve velké míře zařízení pro řízenou konverzi parametrů elektrické energie, která mají výstupní obvody řešeny výkonovými spínacími tranzistory a jejichž výstupní napětí je formováno šířkově pulzní modulací se spínacími frekvencemi přibližně od 1 do 20 kHz. Jde především o měniče frekvence pro střídavé elektrické pohony a o pulzní měniče. Výstupní napětí těchto měničů jsou tvořena úzkými obdélníkovými pulzy se strmými hranami – velkým du/dt . Velká strmota napětí je dána krátkou spínací dobou výstupních tranzistorů měniče, která se pohybuje přibližně v rozmezí od desetin do jednotek mikrosekund. Výstupní napětí měničů jsou proto zatížena nežádoucími vyššími harmonickými složkami. Výstupní proudy měničů jsou zpravidla filtrovány indukčností zátěže a v případě měničů frekvence se první harmonická proudy projevuje podstatně více než první harmonická napětí. V případě pulzního měniče je výrazně vyjádřena stejnosměrná složka výstupního proudu. Lze říci, že v průběhu proudu je vyjádřena užitečná složka jen se zbytkovým zvlněním. Se zvyšující se spínací frekvencí výstupních tranzistorů se zbytkové zvlnění proudu zmenšuje, avšak hodnota spínací frekvence je omezena velikostí střední hodnoty spínacích ztrát výkonových tranzistorů.

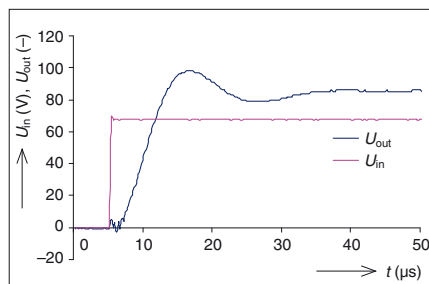
Vzhledem k tomu, že výstupní proud měniče a zejména výstupní napětí měniče obsahují vyšší harmonické složky, nelze obecně použít pro měření elektrického výkonu prostředků a metod, které se používají v sinusově, popř. čistě stejnosměrně napájených obvodech. Některé měřicí přístroje určené pro měření v sinusově, popř. stejnosměrně napájených obvodech lze v obvodech s pulzním napájením použít pro přibližná či orientační měření; některé měřicí přístroje nelze použít vůbec.

Při měření výkonu se obecně ve všech obvodech nejlépe osvědčují přístroje na tepelném principu. Tyto přístroje jsou však méně dostupné, nákladné a velmi citlivé na přetížení. Ručkové wattmetry se systémem elek-

trodynamickým jsou prioritně koncipovány pro měření v obvodech se sinusovými průběhy proudu a napětí, avšak jejich rozsah frekvence je zpravidla větší. V současné době jsou tyto ručkové přístroje také již méně dostupné a cenově nepříznivé. Nicméně jsou-li



Obr. 1. Průběh vstupního napětí a vstupního proudu snímače napětí



Obr. 2. Průběh vstupního napětí a výstupního proudu snímače napětí

k dispozici, lze je zpravidla pro měření v obvodech s pulzním napájením použít, i když bez garance přesnosti dané třídou přesnosti. Nevýhodou ručkových přístrojů je to, že nemají elektrický ani datový výstup.

Ručkové elektrodynamické wattmetry jsou ve stále větší míře nahrazovány elektronickými přístroji. Běžně dostupné a levné číslicové wattmetry, které jsou určeny pro měření v obvodech se sinusovými průběhy napětí a proudů, jsou zpravidla pro měření v obvodech s pulzním napájením zcela nevhodné pro nedostatečnou vzorkovací frekvenci.

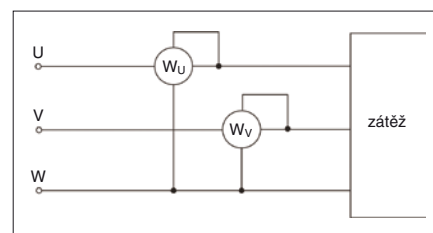
Pro přesná měření v ustálených stavech i při přechodných jevech jsou na trhu k dispozici poměrně nákladné číslicové měřicí

ústředny a analyzátoři sítí i s elektronickými výstupy, které umožňují nejen získat informace o výkonových poměrech, ale i vykonávat analýzy veškerých naměřených průběhů.

Na našem pracovišti se zabýváme metodikou měření elektrických výkonů v ustálených stavech jednoduchými číslicovými prostředky nebo prostředky pro řízení, kde je měření výkonu doplňkovou funkcí. Cílem není dosažení extrémní přesnosti, ale spíše realizace metody implementovatelné na robustním hardwarovém vybavení s komponentami, které jsou standardní v řídicích úlohách, a s možností elektrických či datových výstupů. Popisované prostředky a metody jsou použitelné jako podpora při vývoji a testování systémů pracujících s pulzním napájením. Další oblastí využití jsou jednoduchá měření v ustálených stavech v obvodech se standardními, průmyslově vyráběnými zdroji pulzního napájení. Některé tyto zdroje, např. typicky měniče frekvence pro asynchronní motory, jsou vybaveny diagnostikou poskytující údaje o výstupních veličinách. I v těchto případech jsou však prezentované postupy a prostředky použitelné pro vykonávání nezávislých měření nebo např. pro měření v soustavách s paralelním napájením více elektromotorů z jednoho měniče.

2. Snímače

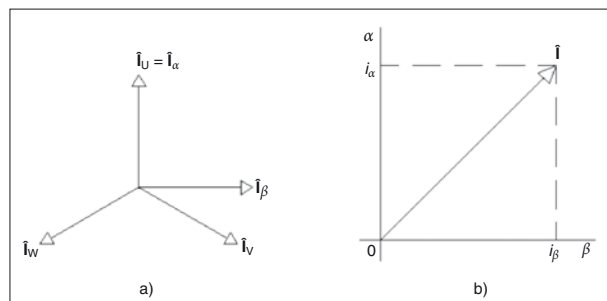
Cílem je tedy zjištění elektrického výkonu při použití robustních hardwarových komponent, které jsou standardní i ve zpětnovazebních řídicích úlohách. Vyhodnocení výkonu se vykonává v číslicových obvodech výpočtem ze vzorků proudů a napětí. Ve zpětnovazebních regulačních soustavách, realizujících elektronické řízení elektrických či elektromechanických systémů, se pro měření napětí a proudů používají velmi často galvanicky oddělené snímače s Halloovou sondou. Tyto snímače pracují na principu kompenzace magnetických účinků měřeného proudu



Obr. 3. Aronovo zapojení pro měření třífázového činného výkonu

či proudu, jenž je úměrný měřenému napětí. V našich zařízeních se osvědčily snímače od firmy LEM. Pro měření proudů a napětí v nízkonapěťových obvodech s výkony asi do 15 kW používáme nejčastěji proudové snímače LA55P a napěťové snímače LV25P.

Snímače proudu LA55P jsou průvlekové, tzn. že počtem průvleků vodiče s měřeným



Obr. 4. Vztah mezi třífázovou soustavou a soustavou α, β

proudem lze měnit rozsah. Jmenovitá okamžitá hodnota proudu je 50 A, měřicí rozsah je ± 70 A. Snímače mají proudový výstup, proudový převod je 1 : 1 000. Při připojení výstupu snímače na napěťový převodník A/D se použije snímací rezistor. Snímač pracuje s napájením typicky ± 12 nebo ± 15 V. Důležitým parametrem je rozsah frekvence. Útlum 1 dB nastává podle údajů výrobce při frekvenci 200 kHz. Vzhledem ke skutečnosti, že ve sledovaných obvodech jsou měřené proudy filtrovány indukčnostmi, a vzhledem k dostatečnému frekvenčnímu rozsahu, kopíruje výstupní signál snímače kvalitně průběh měřeného proudu.

Snímače napětí LV25P, vhodné pro měření v obvodech nízkého napětí, se připojují na straně měřeného napětí přes předřadný rezistor. Tyto snímače jsou konstruovány na principu snímání proudu, který je úměrný měřenému napětí. Napájení a charakter výstupních obvodů jsou stejné jako u snímače LA55P. Převod snímače je 2 500 : 1 000. Na rozdíl od snímačů proudu je vstup snímačů napětí měkký, s vnitřním odporem daným předřadným rezistorem na vstupní straně. Z toho důvodu ovlivňuje kompenzační elektronika snímače magnetické poměry v magnetickém obvodu snímače a odezva snímače je řádově pomalejší než u snímače proudu. Na obr. 1 jsou změřené průběhy vstupního napětí snímače – skoková změna z 0 na 65 V – a vstupního proudu při velikosti předřadného rezistoru 100 k Ω . Velikost výstupního snímacího rezistoru je 286 Ω . Na obr. 2 je průběh vstupního skokového napětí a průběh výstupního napětí na snímacím rezistoru. Podle katalogových listů výrobce je odezva výstupu snímače zpožděna o 40 μ s. Z průběhů na obr. 1 a obr. 2 je zřejmé, že se signál na výstupu snímače ustálí přibližně za 30 μ s. Tato hodnota koresponduje s údajem udávaným výrobcem. Z naměřených průběhů je rovněž zřejmé, že z hlediska přenosu se snímač chová

jako soustava druhého řádu s periodickým řešením charakteristické rovnice.

Snímače LV25P se typicky používají pro měření vstupních napětí střídačů a pulzních měničů. Pro tyto aplikace, kde je měřené napětí stejnosměrné, filtrované kondenzátorem s velkou kapacitou, je použití snímačů bezproblémové. V obvodech, ve kterých se uplatňují zdroje pracující se šířkově pulzní modulací, není možné popisovanými snímači měřit průběh okamžité hodnoty, neboť snímač průběh v podstatě filtruje. Jak však bude uvedeno v dalším textu, jsou snímače použitelné pro vyhodnocování výkonových poměrů v ustálených stavech i ve spojení s běžnými prostředky mikroprocesorového řízení se vzorkovacími frekvencemi vycházejícími z period výpočtů regulačních algoritmů pro řízení výkonových polovodičových měničů.

V obvodech se sinusovým napětím s frekvencemi do 50 Hz jsou snímače LV25P použitelné k měření, nicméně vzhledem ke

zpoždění odezvy však nejsou v těchto obvodech použitelné pro přesnou synchronizaci řízení měničů.

3. Možnosti číslcového vyhodnocení elektrického výkonu

Pro okamžitou hodnotu elektrického výkonu platí známý vztah:

$$p = ui \quad (1)$$

Při statických měřeních v obvodech s nekonstantními průběhy napětí a proudů se nejčastěji pracuje se střední hodnotou výkonu za periodu napětí, popř. proudu, pro kterou obecně platí vztah:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T uidt \quad (2)$$

V případě číslcového vyhodnocení střední hodnoty výkonu přechází integrál v sumu:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} u_i i_i \Delta t \quad (3)$$

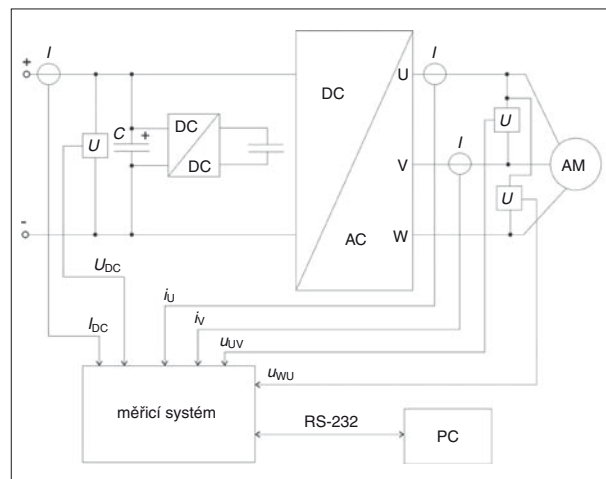
Ve výše uvedených vztazích je u okamžitá hodnota napětí, i okamžitá hodnota proudu, p okamžitá hodnota výkonu, P střední hodnota výkonu, T perioda, t je čas, Δt perioda vzorkování a výpočtu a n počet vzorků napětí, popř. proudu za periodu, za kterou se počítá střední hodnota výkonu – platí tedy: $T = n\Delta t$.

Má-li být číslcové určení výkonu dostatečně přesné, musí být splněn Kotelnikův vzorkovací teorém, tj. proud a napětí musí být vzorkovány alespoň s dvojnásobnou frekvencí oproti frekvenci nejvyšší harmonické složky, která se v průběhu napětí, popř. proudu vyskytuje.

Při vyhodnocování výkonů v obvodech napájených pulzními zdroji, kde jsou napětí nebo proudy snímány snímači na principu Hallovy sondy s elektronickou kompenzací a kde se k výpočtu výkonů používá prostředků mikroprocesorového řízení, tedy jednodušších mikrokontrolérů, je vysoká pravděpodobnost, že Kotelnikův teorém splněn nebude. Může potom docházet k situacím, kdy výpočet poskytuje v jednotlivých periodách rozdílné výsledky, a to i v případě, že jsou reálné poměry v obvodu ve sledovaných periodách totožné. Příčinou je



Obr. 5. Trojice systémů DSP při měření účinností komponent modelu hybridního pohonu



Obr. 6. Měření výkonů na komponentách modelu hybridního pohonu

malá vzorkovací frekvence a možné zkreslení průběhů, především napětí, ale i proudů snímači. V popsaném měřicím řetězci není reálné zjištění správných hodnot výkonu po každé periodě. Statickou hodnotu výkonu je však možné určit výpočtem definičního integrálu, resp. sumy, za dobu několika period základní harmonické napětí a proudu. Pro střední hodnotu potom bude platit vztah:

$$P = \frac{1}{kT} \cdot \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_i \cdot i_i \Delta t \quad (4)$$

Ve vztahu (4) je k počet period základní harmonické napětí, popř. proudu, za které se počítá střední hodnota výkonu. S rostoucí k poroste přesnost výpočtu střední hodnoty výkonu za předpokladu, že nedochází k výrazným interferencím mezi vzorkováním a měřeným průběhem. Jedná se vlastně o zpřesnění střední hodnoty výkonu v ustáleném stavu dané výpočtem jako průměrné hodnoty středních hodnot za k period. V oblasti obvodů s pulzním napájením je použití vztahu (4) aktuální především při výpočtech elektrických výkonů v ustálených stavech v obvodech s pulzními měniči nebo střídači či měniči frekvence. Při výpočtech se zpravidla uplatňuje skutečnost, že vlivem indukčnosti zátěže je v průběhu proudu výrazně vyjádřena základní harmonická. Je známou skutečností, že činný elektrický výkon je vždy vytvářen jen odpovídajícími si harmonickými složkami napětí a proudu. Z toho důvodu se ve výkonu v obvodech s pulzním napětím a s proudy výrazně filtrovanými indukčnostmi uplatňuje v podstatě jen základní harmonická napětí. Při měření výkonů v obvodech s pulzními měniči koresponduje tedy vypočítaný výkon s výkonem stejnosměrných složek napětí a proudu. Základní perioda výpočtu T je u pulzního měniče dána periodou jeho spínání. U měničů se střídavým výstupem poskytuje výpočet výkonu daný první harmonickou proudem a napětím.

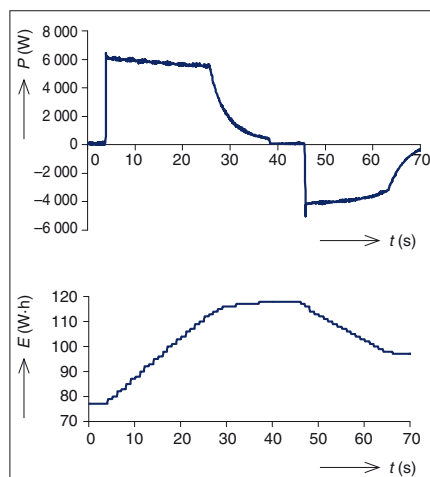
Pro úplnost lze zmínit stručně problematiku vyčíslení střední hodnoty výkonu v obvodech se sinusovými průběhy napětí a proudu. V těchto obvodech platí pro střední hodnotu výkonu vztah:

$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cos \varphi \quad (5)$$

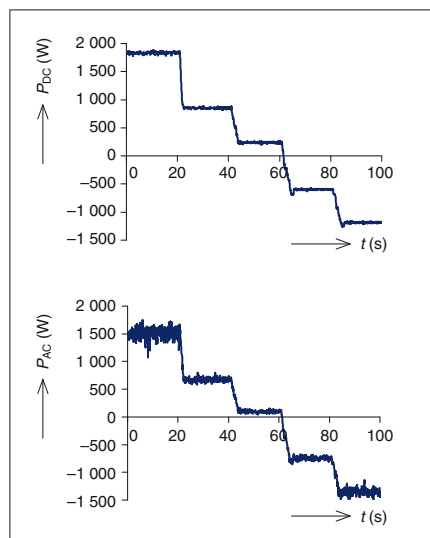
Jde o tzv. činný výkon, který se podle vztahu (5) určí z efektivních hodnot napětí a proudu a z jejich vzájemného fázového posunu φ . Při číselovém výpočtu střední hodnoty výkonu je však zpravidla výhodnější vyjít ze vztahu (3), popř. (4), neboť není nutné zjišťovat hodnotu φ .

Specifickou skupinu úloh tvoří výpočty výkonů v třífázových soustavách s pulzními zdroji napětí. Typicky jde o obvody napájené z měničů frekvence, které pracují s širokové pulzní modulací a které se používají nejčastěji pro napájení regulovaných elektrických pohonů s asynchronními a synchronními motory. Nemá-li měřicí systém informaci o oka-

mžité výstupní frekvenci měniče, je nereálné bez frekvenčních analýz a vysokých vzorkovacích frekvencí uskutečnit jednoduchý výpočet výkonu po každé periodě podle vztahu (3). Možnosti výpočtu statického výkonu jsou v tomto případě, kdy není exaktně známa frekvence první harmonické proudu a napětí a kdy jsou napětí i proud zatíženy vyššími harmonickými složkami, v podstatě dvě.



Obr. 7. Příklady průběhů z měření účinnosti nabíjení a vybití superkondenzátoru



Obr. 8. Příklady výsledků měření elektrických výkonů na vstupní a výstupní straně střídače

První možností je přímá aplikace vztahu (4) v třífázové soustavě. V obvodech s pulzními zdroji není zpravidla vhodné vycházet z předpokladu souměrnosti zdroje a zátěže, a proto je nutné měřit třífázový výkon buď měřením výkonu ve všech fázích, nebo pomocí Aronova zapojení. Při měření ve všech fázích je celkový třífázový výkon dán vztahem:

$$P = \frac{1}{kT} \cdot \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{ui} \cdot i_{ui} \Delta t + \frac{1}{kT} \cdot \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{vi} \cdot i_{vi} \Delta t + \frac{1}{kT} \cdot \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{wi} \cdot i_{wi} \Delta t \quad (6)$$

Ve vztahu (6) jsou indexy u, v, w označeny vzorky proudů a napětí v jednotlivých fázích. Při neznámé hodnotě frekvence první harmonické napětí a proudu je nutné volit dostatečně velkou hodnotu k , aby se ve výsledné hodnotě výkonu v podstatě neprojevila nepřesnost daná výpočtem střední hodnoty na pravděpodobném neceločíselném počtu period. V rovnici (6) je výpočet vykonáván na základě znalosti fázových napětí. Je-li zdrojem napětí třífázový můstkový střídač a je-li zátěž zapojena do trojúhelníku, nejsou fázová napětí přímo měřitelná. V tomto případě je nutné použít zapojení měřicích prvků s umělou nulou nebo, což je vhodné u elektronických měřicích programovatelných systémů, měřit dvě napětí sdružená a z nich fázová napětí dopočítat. Postup přepočtu okamžitých hodnot napětí vychází ze vztahů:

$$u_{uv} = u_u - u_v \quad (7)$$

$$u_{vw} = u_v - u_w \quad (8)$$

$$u_u + u_v + u_w = 0 \quad (9)$$

Z těchto vztahů se jednoduchou úpravou získají vztahy pro výpočet napětí fázových:

$$u_u = (2u_{uv} + u_{vw})/3 \quad (10)$$

$$u_v = (u_{vw} - u_{uv})/3 \quad (11)$$

$$u_w = -u_u - u_v \quad (12)$$

Aronovo zapojení pro měření třífázového činného výkonu vyžaduje měření dvou sdružených napětí, a je tedy přímo využitelné i v obvodech bez středního vodiče i bez vytváření umělé nuly a bez dopočítávání fázových napětí. Pro zjištění třífázového výkonu se používají dva měřicí prvky podle schématu na obr. 3.

Celkový třífázový činný výkon je v obvodu podle obr. 3 dán součtem údajů obou měřicích přístrojů:

$$P = P_{Wu} + P_{Wv} \quad (13)$$

Druhou možností určení třífázového činného výkonu je využití transformací, které se používají při matematickém popisu střídavých elektrických strojů. Jde o metodu použitelnou s výhodou v systémech řízení elektrických pohonů, kde mohou být transformované okamžité hodnoty napětí a proudů k dispozici. Nejsou-li k dispozici transformované hodnoty veličin, lze je vyčísřit podle jednoduchých transformačních vztahů. Výhodou této metody je skutečnost, že v případě dostatečné vzorkovací frekvence a v případě použití snímačů, které přenášejí průběhy proudů a napětí se zanedbatelným zkreslením, není nutné výpočet výkonu vázat na periodu základní harmonické, ale tento výpočet je možné vykonávat průběžně, tj. činný výkon se počítá průběžně, nikoliv podle definičního integrálu, popř. sumy, přes jednu nebo více period základní harmonické.

Princip transformace spočívá v tom, že reálnou třífázovou soustavu nahradíme fiktivní soustavou dvoufázovou se vzájemným fázovým posunem proudů a napětí ve fázích 90° . Takováto soustava se označuje α, β . Vztah mezi oběma soustavami je zřejmý z obr. 4.

Pro transformaci okamžitých hodnot veličin mezi třífázovou soustavou a soustavou α, β platí jednoduché vztahy:

$$i_\alpha = i_u \quad (14)$$

$$i_\beta = \frac{i_v - i_w}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

Stejně vztahy platí pro transformaci proudů i fázových napětí. Měří-li se napětí sdružená, použijí se pro přepočítání na napětí fázová vztahy (10) až (12). Pro činný výkon platí potom vztah vycházející z pravidel skalárního součinu dvou fázorů a poskytující názornou souvislost se známým vztahem pro činný výkon:

$$P = 3/2 \cdot (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) = 3U_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (16)$$

Použití konstanty $3/2$ ve vztahu (16) je podmíněno nutností zachování invariance výkonů mezi oběma souřadnicovými soustavami.

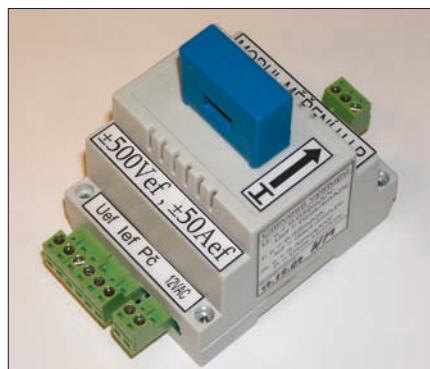
Soustava α, β je výhodná nejen díky možnosti kontinuálního výpočtu činného výkonu bez ohledu na periodu základní harmonické (v případě dostatečně kvalitního měření napětí a proudů a dostatečné frekvence vzorkování), ale i možnosti kontinuálního výpočtu efektivní hodnoty, popř. amplitudy napětí a proudů (také bez ohledu na periodu základní harmonické) pomocí Pythagorovy věty ze složek α, β .

4. Příklad implementace měření výkonu do systému pro řízení výkonových měničů

V Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze byl navržen a opakovaně realizován univerzální systém pro řízení výkonových měničů, především pro elektrické pohony. Systém je založen na použití regulátoru DSP s mikrokontrolérem TMS 320F240 (obr. 5). Jednou z aplikací byla implementace číslicových algoritmů pro měření stejnosměrného a třífázového elektrického výkonu. Zajímavé využití této aplikace bylo při proměňování účinnosti komponent laboratorního modelu hybridního pohonu v laboratoři Katedry elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Na obr. 6 je zapojení části obvodu při vykonávání výše uvedených měření. Na stejnosměrné straně byl obvod napájen ze stejnosměrného dynama. Na této straně byly vykonávány testy účinnosti při přenosu a akumulaci energie v systému superkondenzátor (ultracapacitor) – pulzní měnič (DC/DC). Měřicím systémem byl zjišťován výkon a jeho integrál, tj. energie, při řízeném nabíjení

a vybíjení superkondenzátoru přes pulzní měnič. Elektrický výkon byl určován prostřednictvím definičního vztahu (1). Bylo vyhodnocováno, kolik energie je možné zpětně ze superkondenzátoru odebrat při různých nabíjecích a vybíjecích výkonech. Tato měření byla vykonávána v rámci výzkumu možností rekuperace brzděné energie na vozidlech s elektrickými a hybridními pohony. Na obr. 7 jsou příklady průběhů získaných při tomto měření. Během tohoto měření byl superkondenzátor nabíjen výkonem 6 000 W a vybí-



Obr. 9. Mikroprocesorový modul pro měření výkonu a efektivní hodnoty proudu a napětí – na obrázku je patrný průvlekový snímač proudu LA55P

jen výkonem 4 000 W. Z průběhů je zřejmé, že při nabíjení, akumulaci a vybíjení se ztratí přibližně 50 % energie.

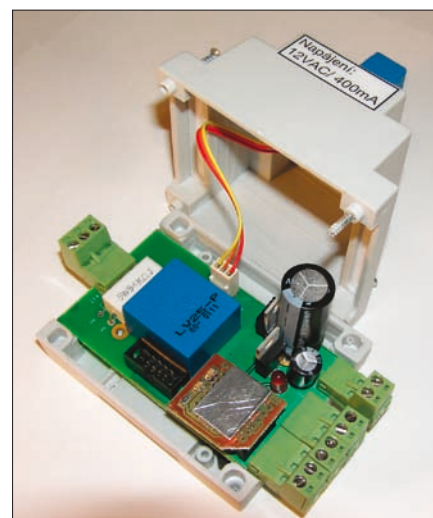
Příkladem dalšího měření bylo zjišťování elektrického výkonu na vstupu a výstupu střídače trakčního motoru modelu hybridního pohonu. Vstupní stejnosměrný výkon byl měřen stejně jako při měřeních se superkondenzátorem. Výstupní výkon byl vypočten ze změřených vzorků dvou výstupních proudů a dvou výstupních sdružených napětí střídače v souřadnicové soustavě α, β pomocí vztahů (14) až (16). Vzhledem k poměrně malé periodě vzorkování a výpočtu 0,5 ms a vzhledem k použitým snímačům napětí LV25P byla hodnota výkonu vypočítaná podle vztahu (16) významně filtrována vlečeným číslicovým filtrem prvního řádu s časovou konstantou přibližně 0,5 s. Tím bylo možné zachytit průběhy výkonu jen v ustálených stavech nebo při pomalých přechodných dějích. Příklady výstupů těchto měření jsou na obr. 8.

5. Elektronické moduly pro měření výkonu a jejich testování na frekvenčně řízeném pohonu

V Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze byly pro účely realizace měřicích bodů v technologickém zázemí laboratoří, pro účely výzkumu a výuky navrženy a realizovány jednoduché mikroprocesorové měřicí moduly pro měření střední hodnoty výkonu a efektivní hodnoty proudu a napětí. Vstupními veličinami modulu jsou jeden proud a jedno napětí. Proud je

snímán snímačem LA55P, napětí snímačem LV25P. Tyto typy snímačů byly voleny zejména z důvodu robustnosti. Modul poskytuje na svém výstupu odpovídající údaj výkonu a efektivní hodnoty proudu. Modul má proudové výstupy s rozsahem 4 až 20 mA. Jako výpočetní člen byl použit mikrokontrolér C8051F300 od firmy Silabs. Vzorkovací perioda A/D převodníku a výpočtu byla 2 μ s. Střední hodnota výkonu a efektivní hodnota proudu a napětí jsou počítány za dobu 2 s. Modul byl cejchován na výpočet výkonu při sinusovém proudu a napětí.

V následující části článku je vybrána skupina výsledků z měření výstupního elektrického výkonu nepřímého měniče frekvence, který napájel asynchronní motor zatížený stejnosměrným dynamometrem. Tato měření poskytla určitou představu o možnostech a přesnostech měření výkonu pulzních napětových zdrojů jednoduchými a dostupnými metodami. Při měření byly porovnávány nezávislé údaje dvou typů ručkových wattmetrů, údaje výše popsaných elektronických modulů, údaj elektronického wattmetru určeného pro měření v obvodech se sinusovým napájením a údaj výstupního elektrického výkonu měniče frekvence.



Obr. 10. Vnitřní část modulu pro měření výkonu se snímačem napětí LV25P

Specifikace komponent použitých při měření a jejich zapojení je následující:

- Měnič frekvence Siemens Master Drives VC, 3x 400 V, výstupní proud 10,2 A, poskytuje údaj výstupního výkonu PFM.
- Asynchronní motor 3x 380 V; 9,6 A; 4,4 kW; 50 Hz; 1 370 min^{-1} .
- P_{02} – elektrodynamický wattmetr Metra Blansko s třídou přesnosti 0,2; byly použity dva wattmetry v Aronově zapojení, proudové okruhy byly připojeny přes měřicí transformátory proudu s třídou přesnosti 0,2.
- P_{05} – elektrodynamický wattmetr Metra Blansko s třídou přesnosti 0,5; byly použity dva wattmetry v Aronově zapojení,

This article focuses on possibilities of simple implementation of methods for digital measurement of electrical power for steady states and for slow transitions in circuits powered with PWM (Pulse Width Modulation) power sources. Mainly power circuits of inverters with voltage inputs and choppers are considered. The article presents basic static and dynamic properties of routinely used robust voltage and current sensors and possible conceptions for measurement based either on direct digital form of definition of electrical power or with a representation of electrical power in transformed coordinate systems used in mathematical descriptions of AC electrical machines. Some examples of implemented measuring devices and examples of their usage in AC and DC circuits are mentioned. Also results from a comparative measurement between classical analogue instruments and some digital instruments are shown to allow a comparison between the methods. The comparative measurement is done on a three phase voltage power inverter. The main goal is not to achieve a precise measurement of powers in PWM supplied circuits or acquisition of data for a harmonic analysis, but a fast and effective measurement of power in herein mentioned PWM circuits and the implementation of these methods on easy available and non exigent hardware and software platforms.

proudové okruhy byly připojeny přes měřící transformátory proudu s třídou přesnosti 0,2.

- P_M – popsány mikroprocesorový měřicí modul s čidly LA55P a LV25P, byly použity dva moduly v Aronově zapojení.
- P_S – elektronický třífázový wattmetr určený pro měření v obvodech se sinusovým napájením, typ PMP3, výrobce ELKO Štoviček, a. s.; proudy ve třech fázích byly měřeny přes měřicí transformátory s třídou přesnosti 0,2.
- Mechanický výkon motoru na hřídeli P_{mech} byl určen z momentu dynamometru a naměřených otáček.

V tabulce jsou uvedeny vybrané výsledky měření, které poskytují představu o vypovídacích schopnostech testovaných metod. V tabulce jsou uvedeny hodnoty výsledných výkonů, které byly zjištěny jednotlivými metodami. Dále jsou z hodnot mechanického výkonu, výkonu změřeného mikroprocesorovými moduly a výkonu udávaného měničem vypočteny účinnosti motoru η_M a η_{FM} . Všechna měření byla vykonána při zatěžovacím momentu 25 Nm. Měření byla vykonána pro různé hodnoty frekvence základní harmonické f a pro různé hodnoty spínací frekvence měniče f_{PWM} .

Při vyhodnocování výsledků měření z tabulky se ukazuje, že ani jednu z naměřených hodnot výkonu na výstupu měniče frekvence nelze považovat za zcela správnou. Jednotlivé naměřené hodnoty byly posuzovány oproti zbývajícím výsledkům měření v témže stavu a proti hodnotě mechanického výkonu, popř. oproti hodnotě účinnosti. Nepoužitelný byl

údaj elektronického wattmetru PMP3; tento údaj kolísal v ustáleném stavu v rozmezí uvedeném v tabulce. Výsledky zbývajících metod spolu v podstatě korespondují s většími či menšími odchylkami. Při frekvenci základní harmonické 40 Hz je možné sledovat vliv spínací frekvence měniče frekvence na naměřené hodnoty. I když byl moment nastaven na stálou hodnotu 25 Nm, měnil se se spínací frekvencí mechanický výkon motoru vlivem malé změny otáček. Tato skutečnost je pravděpodobně dána zvyšujícím se vlivem ochranných dob výkonových tranzistorů měniče při rostoucí spínací frekvenci. Větší četnost ochranných dob má vliv na snížení efektivní hodnoty napětí. Naproti tomu je při rostoucí spínací frekvenci lépe formován průběh proudu, což dává předpoklady k vyloučení ztrát motoru a růstu jeho účinnosti. Údaje mikroprocesorového měřicího modulu odpovídají těmto skutečnostem. Naproti tomu při rostoucí spínací frekvenci klesá účinnost motoru vypočítaná z údaje měniče. To je dáno zřejmě skutečností, že měnič počítá výstupní výkon z idealizovaného průběhu první harmonické napětí bez vlivu šířkově pulzní modulace a ochranných dob. Z toho důvodu nelze považovat ani údaj měniče za zcela správný. Lze konstatovat, že odpovídající údaje spolu v tabulce korespondují, avšak s nepřilíhající velikou přesností, v některých případech s odchylkou nad 5 %. Relace mezi údajem měniče a mikroprocesorových modulů je dána spínací frekvencí, údaje elektrodynamických wattmetrů mají tendenci překračovat údaje mikroprocesorového modulu, avšak tato tendence není jednoznačná.

Tabulka výsledků měření výkonu různými metodami

f/f_{PWM} (Hz)/(kHz)	P_{FM} (W)	P_{02} (W)	P_{05} (W)	P_M (W)	P_{mech} (W)	P_S (kW)	η_M (-)	η_{FM} (-)
30/5	2 737	2 880	2 880	2 789	2 002	2,8 až 3,2	0,72	0,73
30/8	2 864	2 910	2 960	2 765	1 970	2,5 až 3,2	0,71	0,69
40/2	3 549	3 720	3 920	3 850	2 803	3,4 až 4,8	0,73	0,79
40/5	3 650	3 750	3 840	3 617	2 787	3,0 až 4,8	0,77	0,76
40/8	3 711	3 750	3 760	3 578	2 755	3,0 až 4,4	0,77	0,74
40/10	3 802	3 780	3 800	3 453	2 739	3,6 až 4,4	0,79	0,72
50/5	4 461	4 620	4 760	4 664	3 604	4,5 až 5,2	0,77	0,81



Doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 1998 úzce spolupracuje s Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice v oblasti elektrických pohonů a mikroprocesorového řízení v dopravní technice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, testování elektromechanických soustav a mikroprocesorového řízení.



Ing. Martin Novák, Ph.D. dokončil v roce 2003 magisterské studium v oboru přístrojová a řídicí technika na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kde pokračoval doktorandským studiem v oboru technická kybernetika. Od roku 2006 působí jako odborný asistent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Mezi jeho hlavní oblasti zájmu patří použití mikroprocesorů, zpracování signálu, měřicí metody a řídicí systémy.

6. Závěr

Z rozboru je zřejmé, že přesné měření elektrického výkonu v obvodech s pulzními zdroji napětí není triviální záležitostí a při požadavku na dosažení větší přesnosti nelze použít standardní elektrodynamické wattmetry cejchované na sinusové průběhy ani jednoduché prostředky pro elektronické vyhodnocování výkonu. Naproti tomu jsou však tyto prostředky a metody použitelné pro řadu technických měření a indikací s přesností přibližně okolo 5 %. Není-li požadavek elektrického výstupu měřidla, jsou v této oblasti použitelné i ručkové elektrodynamické wattmetry.

Literatura:

- [1] NOVÁK, J.: Programovatelné zařízení pro testování elektromechanických soustav v reálném čase. In: Sborník z XXVIII. z konference o elektrických pohonech, s. 305–310, Plzeň 2003, ISBN 80-02-1563-0.
- [2] NOVÁK, J. – GREGORA, S. – SCEJBAL, V.: Real Time Torque and Power Analyses of Electromechanical Systems. In: Sborník z konference EPE – PEMC 2004, Riga, 2004, CD-ROM A43389, ISBN 9984-32-010-3.