

Trendy v oblasti zabudovaných systémov

Príležitosti a výzvy pre technológie typu System-on-Chip (SoC) a zosieťované zabudované systémy v priemyselnej automatizácii.

Grant Martin
Richard Zurawski



Zlepšenia v technológiách spracovania údajov a dostupnosť nových nástrojov na navrhovanie rozširujú dosah zabudovaných systémov od implementácie skupiny čipov na jednej doske až po skupinu modulov na jednom integrovanom obvode. Systémy typu „všetko na jednom čípe“ (System-on-Chip; SoC) sa v súčasnosti presadzujú a sú inštalované do systémov priemyselnej automatizácie, čo umožňuje vytvoriť komplexné inteligentné prevádzkové prístroje. Uvedený trend sprevádza aj nástup metódy návrhu založený na platforme, ktorá umožňuje vykonať návrh a odskúšanie komplexných SoC prostredníctvom rozsiahleho znovupoužitia autorsky chráneného hardvéru a softvéru. Ďalším dôležitým aspektom evolúcie zabudovaných systémov je trend smerom k zosieťovaným zabudovaným uzlom využívajúcim špecializované sieťové technológie, najčastejšie označované ako zosieťované zabudované systémy (Networked Embedded Systems – NES).

SoC reprezentujú revolúciu v štruktúre integrovaných obvodov (IO), a to vďaka pokroku v technológiách ich výroby, ktoré umožňujú integráciu hlavných komponentov a subsystémov elektronických produktov na jeden čip alebo do skupiny integrovaných obvodov, ktoré vzájomne spolupracujú [1]. Takýto vývoj s nadšením prijali vývojári zložitých integrovaných obvodov, pretože umožnil najvyššiu možnú úroveň integrácie, ktorá priniesla rastúci výkon, zníženú spotrebu energie a výhody z hľadiska veľkosti a ceny. V procese vývoja sú to skutočne dôležité faktory a využitie SoC je, pravdepodobne, jedným z kľúčových argumentov pri vývoji zabudovaných systémov pracujúcich v reálnom čase.

SoC možno definovať ako zložitý (komplexný) integrovaný obvod alebo integrovanú skupinu mikročipov, ktorá združuje hlavné funkčné prvky alebo subsystémy kompletného výsledného produktu do jednej entity. Najprepracovanejšie SoC produkty v súčasnosti obsahujú najmenej jeden programovateľný procesor a veľmi často kombináciu najmenej jedného RISC (reduced instruction set computing) riadiaceho procesora a jedného signálneho procesora (DSP). Súčasťou je zabudovaná komunikačná štruktúra – procesorová zbernica/zbernica, zbernica/zbernica prídatných zariadení a v niektorých prípadoch vysokorýchlostná systémová zberni-

ca. Pre SoC procesory je dôležité usporiadanie interných pamäťových jednotiek, ako aj pripojenie na externé pamäťové jednotky. Pre väčšinu aplikácií určených na spracovanie signálov je k dispozícii nejaká forma hardvérových jednotiek na zrýchlenie výkonu určitých funkcií, ktoré nemožno porovnateľne rýchlo vykonať softvérovou. Výsledkom je nielen vyšší výkon, ale aj nižšia spotreba energie. SoC používajú na spojenie s okolitým svetom niekoľko blokov na obsluhu periférií pozostávajúcich z analógových aj číslicových rozhraní (napr. smerom k systémovým zberniciam na matičnej doske alebo doske pripojení s konektormi). SoC budú možno v budúcnosti obsahovať aj snímače a akčné členy na báze MEMS (micro-electro-mechanical-system) alebo LOC (lab-on-a-chip; zariadenia, ktoré integrujú laboratórne funkcie na jednom čípe s rozmermi od niekoľkých štvorcových milimetrov až po centimetre) (obr. 1).

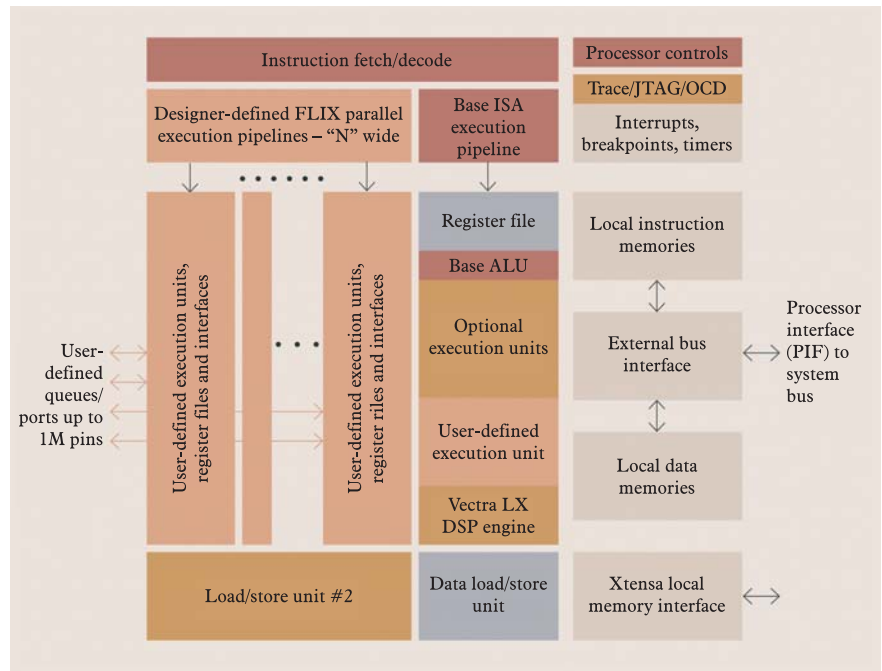
Najzaujímavejšie SoC riešenia obsahujú hardvérové aj softvérové komponenty. Súčasťou sú programovateľný procesor, operačný systém reálneho času a ďalšie softvérové prvky závislé od použitého hardvéru. Takže návrh a použité SoC nie je len vec hardvéru – zahŕňa aj návrh a inžiniering celého systému, spoločné využívanie a pridelovanie hardvéru a softvéru, ako aj návrh architektúry, vývoj a implementáciu softvéru.

Systémy na programovateľných čípech

Oblasti možného využitia SoC sa v súčasnosti výrazne rozšírili. Od implementácií so zákazníkymi integrovanými obvody, cez aplikácie závislé integrované obvody (ASIC) až po integrované obvody pre aplikácie so štandardnými funkciami (ASSP) možno do súčasného prístupu zahrnúť návrh a využívanie komplexných konfigurovateľných logických častí so zabudovanými procesormi. Súčasťou takéhoto jedinečného návrhu sú navyše ďalšie aplikácie orientované, autorsky chránené bloky, napr. procesory, pamäte alebo špeciálne vyvinuté funkcie zakúpené u tretích strán. Tieto zložité FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) ponúka niekoľko dodávateľov, napr. Xilinx (Virtex-II PRO Platform FPGA, Virtex-IV) a Altera (SOPC). Základným princípom stojacim za týmto prístupom tvorby SoC je kombinácia veľkého



množstva konfigurovateľnej logiky spolu so zabudovanými procesormi s cieľom dosiahnuť vyššiu pružnosť a na mieru šité kombinácie hardvéru a softvéru, ktoré bude možné aplikovať vo fáze návrhu. Na zvýšenie rýchlosti hardvéru možno algoritmus obsahujúci významný podiel riadiacej logiky a spracúvania veľkého množstva údajov prideliť do riadiaceho RISC procesora s konfigurovateľnou logikou. Aj keď výsledná kombinácia nepoukazuje v porovnaní so zákazníkmi integrovanými obvodymi či implementáciami na báze ASIC/ASSP najvyšší výkon, najnižšiu spotrebu energie či najnižšiu cenu, prináša zvýšenú flexibilitu pri modifikovaní návrhu v prevádzke a obchádza vysoké náklady na neperiodicky sa opakujúci inžiniering spojený so zmenami v prevádzke. Takýmto spôsobom možno nahradiť nové aplikácie, rozhrania a vylepšené algoritmy do produktov momentálne pracujúcich v prevádzke. Výrobky z tejto oblasti obsahujú aj ďalšie jadrá na spracovanie a rozhrania. Tie pozostávajú z MAC (multiply-accumulate) blokov pre aplikácie s využitím DSP na spracovanie signálov a obrazu a vysokorýchlostné sériové rozhranie na komunikáciu po drôte, napr. bloky SERDES (serializer/de-serializer). Z tohto hľadiska systémy vybudované na programovateľných čipoch nie sú celkom závislé od typu aplikácie, ale nie sú

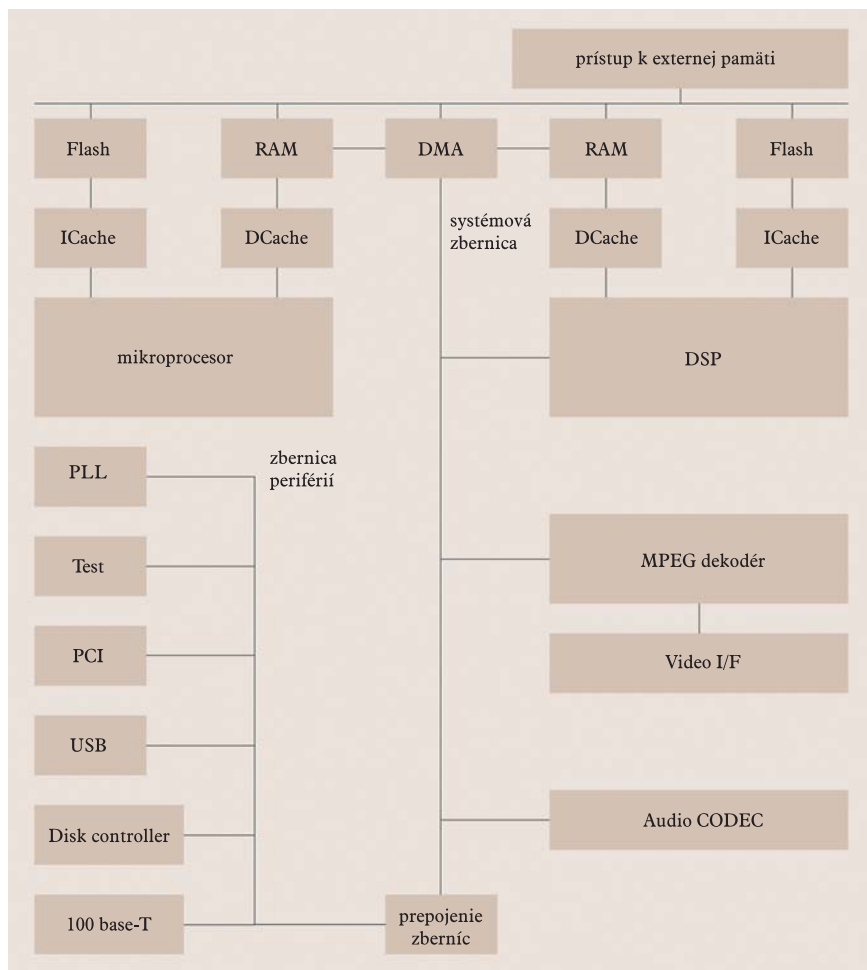


Obr.2 Procesor LX spoločnosti Tensilica

ani úplne všeobecné. Hlavným princípom stojacim za týmto prístupom k SoC je kombinácia veľkého množstva konfigurovateľnej logiky so zabudovanými RISC procesormi. Uvidí sa, či sa systémy na programovateľných čipoch presadia pri vytváraní zákaznických aplikácií s vysokou pridanou hodnotou, alebo či sa zamerajú len na dve hlavné oblasti: rýchle navrhovanie

originálnych koncepcií, čo bude nasmerované do implementácií typu ASIC alebo ASSP; a na koncové, relatívne drahé komponenty komunikačnej infraštruktúry vyžadujúcej flexibilitu, ktoré môžu priniesť aj vyššiu cenovú úroveň a spotrebu energie v kombinácii so zníženým výkonom. Kombinované riešenia, napr. použitie tenkovrstvových kovových programovateľných logických hradlových polí spolu s pevným pamäťovým podsystemom procesora a inými pamätami – aké možno nájsť v „štruktúrovaných ASIC“ z produkcie napr. LSI Logic (RapidChip) a NEC (Instant Silicon Solutions Platform) – reprezentujú kombinované riešenie SoC stojace medzi prístupom vyžadujúcim kompletnú sadu masiek (negatívnych obrazov určujúcich usporiadanie obvodov) a metódou programovateľných hradlových polí.

Charakteristickým znakom takéhoto prístupu je podstatne pomalší proces návrhu (niekoľko týždňov namiesto jedného či niekoľko dní), vyššia miera neopakovateľnosti inžinieringu ako pri FPGA (ale oveľa menšia ako pri ASIC) a lepšia cena, výkon a spotreba energie ako pri FPGA (približne len 15 – 30 % horšia ako pri ASIC). Navyše sa objavujú zaujímavé hybridné riešenia, napr. ASIC/ASSP s vrstvami FPGA na čípe, čo návrhárskym tímom prináša oveľa viac možností. Nanajvyš zaujímavou variáciou je v tomto smere kombinácia programovateľného procesora, ktorý je súčasťou implementovaný v pevnom kremíku spolu s vrstvami FPGA, ktoré možno využiť na rozšírenie inštrukcií a iných hardvérových rozšírení. Spoločnosť Stretch Inc. zaoberajúca sa výrobou polovodičov používa napr. konfigurovateľný procesor Tensilica na implementáciu tejto platformy SoC (obr. 2).



Obr.1 Typický príklad SoC zariadenia pre zákaznicke aplikácie



Platformy a programovateľné platformy

V súčasnosti možno v procese návrhu zložitých SoC pozorovať oveľa integrovanejší prístup, ako aj znovupoužitie virtuálnych komponentov. Takýto prístup sa nazýva návrh závislý od platformy (platform-based design) [1], [2]. Možno ho definovať ako plánovanú metodológiu návrhu, ktorá skraca čas a potrebné úsilie a znižuje riziko spojené s návrhom a verifikáciou zložitých SoC. To možno dosiahnuť širokým znovupoužitím autorsky chráneného hardvéru a softvéru. V protiklade s metódou blok po bloku návrh závislý od platformy spája skupiny komponentov do znovupoužiteľnej architektúry platformy. Táto znovupoužiteľná architektúra spolu s knižnicami vopred odskúšaných, aplikácie orientovaných hardvérových a softvérových virtuálnych súčiastok predstavuje integrovanú platformu SoC. Je niekoľko dôvodov, prečo vzrastá popularita platformového prístupu pre oblasť návrhov v priemyselnej aplikácii. Medzi ne patria predovšetkým produktivita návrhu, zníženie rizika, schopnosť využiť jednoduchú integrovateľnosť virtuálnych súčiastok z iných oblastí a schopnosť znovupoužitia architektúr SoC vytvorených expertmi. Platformy pre priemysel zahŕňajú všetky aplikácie platformy pre špecifické produktové oblasti, napr. Philips Nexperia a TI OMAP [5], predstaviteľné SoC platformy či platformy s centrálnym procesorom. Platformy s centrálnym procesorom, napr. tie, ktoré využívajú viaceré konfigurovateľné a rozšíriteľné procesory Tensilica alebo ARM PrimeXs, vyžadujú zbernicovú architektúru a základnú množinu periférií, spolu s operačným systémom reálneho času a základnými softvérovými ovládačmi. Platformu FPGA a zariadenia SOPC možno označiť za metaplatformu; t. j. platformu na tvorbu platform. Tieto zariadenia obsahujú základný súbor viac všeobecne použiteľných funkcií a autorsky chránených zabudovaných procesorov, procesorových zberníc, špeciálnych, autorsky chránených blokov, napr. MACs a SERDES (konvertor údajov z/do sériového a paralelného reťazca) a množstvo iných autorsky chránených vhodných blokov. Vývojové tímy môžu získať takéto zariadenia napr. od spoločnosti Xilinx a Altera a následne zákazníci prispôbia tieto metaplatformy ich vlastným aplikáciám pridaním špecifických, autorsky chránených knižníc. Takto ich potom možno posunúť ďalším vývojovým tímom.

Sieťové zabudované systémy

Ďalším významným medzníkom vývoja zabudovaných systémov je objavenie sa distribuovaných zabudovaných systémov, často označovaných ako sieťové zabudova-

né systémy, pričom prívlastok sieťové poukazuje na dôležitosť zbernicovej infraštruktúry a komunikačného protokolu. Sieťový zabudovaný systém je množina priestorovo a funkčne distribuovaných zabudovaných uzlov, vzájomne prepojených či už pevným spojením alebo bezdrôtovou komunikačnou infraštruktúrou a protokolmi a spojením s okolitým prostredím (prostredníctvom snímačov a akčných členov) a tiež navzájom. Riadiaci uzol môže byť v rámci systému určený na koordináciu výpočtov a komunikácie s cieľom dosiahnutia stanovených cieľov. Riadiace obvody zabudované v uzloch alebo prevádzkových prístrojoch (napr. v snímačoch a akčných členoch) najčastejšie zaisťujú konverziu signálov priamo na čípe. Stále rastúca funkcionálna, možnosti spracovania a komunikácie riadiacich obvodov boli praktickým prínosom pri presadení sa trendu zosieťovania prevádzkových prístrojov prostredníctvom špecializovaných zberníc, často označovaných ako prevádzkové zbernice (najčastejšie sú číslicové, dvojcestné, s viacbodovým komunikačným spojením [6].)

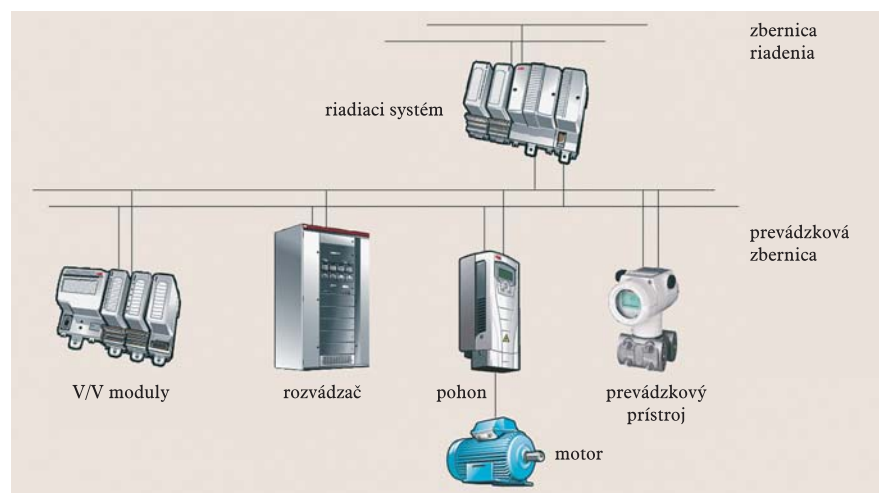
Vo všeobecnosti možno medzi prínosy nasadenia špecializovaných (prevádzkových) zberníc zaradiť najmä zvyšujúcu sa flexibilitu vďaka kombinovaniu zabudovaného hardvéru a softvéru, vyšší výkon systému a jednoduchosť inštalovania aktualizácie a údržby systému.

Sieťové zabudované systémy sa objavujú v rôznych aplikáciách, napr. v automobilovom priemysle, letectve, administratívnych budovách – najčastejšie v oblasti monitorovania a riadenia. Medzi typických predstaviteľov sieťových zabudovaných systémov patria napr. zbernice spájajúce prevádzkové prístroje (napr. snímače a prevodníky) spolu s prevádzkovými regulátormi, napr. programovateľné logické automaty (PLC) v priemyselnej automatizácii alebo elektronické riadiace jednotky (ECU) v aplikáciách pre automo-

bily. Rovnako sa nachádzajú aj v aplikáciách rozhrania človek – stroj (v palubných displejoch, v autách, v SCADA systémoch v oblasti priemyselnej automatizácie ap.). Špecializované zbernicové technológie sa využívajú v rôznych aplikáciách, napr. PROFIBUS, PROFINet alebo EtherNet/IP (obidve podporujúce komunikáciu v reálnom čase) na riadenie v priemysle a automatizáciu, LonWorks, BACnet a EIB/KNX v oblasti automatizácie a riadenia budov, CAN, TTP/C a FlexRay v oblasti automobilových aplikácií a Train Communication Network (TCN) pre oblasť automatizácie vlakov. Rôznorodosť požiadaviek vytváraných rôznymi aplikáciami (soft/hard reálny čas, kritická bezpečnosť, sieťová topológia a iné) vyžadujú rôzne riešenia a použitie rôznych protokolov postavených na rôznych operačných princípoch. Výsledkom tak bolo množstvo zberníc vyvinutých pre špecifické aplikácie [6].

Vzhľadom na charakter komunikačných požiadaviek spojených s rôznymi typmi aplikácií majú prevádzkové zbernice – na rozdiel od sietí LAN – nízky objem prenášaných dát, malé dátové pakety a väčšinou vyžadujú možnosť práce v reálnom čase s deterministickým alebo časovo ohraničeným prenosom dát. Prenosová rýchlosť 10 Mbit/s, charakteristická pre siete LAN, sa však napriek tomu začína čoraz častejšie udomáňovať v prevádzkových zberniciach. Pri prevádzkových zberniciach používaných v priemyselnej automatizácii (na rozdiel od automatizácie a riadenia pre budovy) treba zabezpečiť funkcie smerovania (routing) alebo riadenie na úrovni koncových uzlov. Tak sa využívajú iba vrstvy 1 (fyzická vrstva), 2 (dátová vrstva zahŕňajúca riadiacu vrstvu na prístup k médiu) a 7 (aplikačná vrstva obsahujúca aj používateľskú vrstvu) známe z referenčného modelu ISO/OSI [7].

Garantovanie požiadavky deterministickej reakcie vyžaduje použitie vhodnej



Obr.3 Typický príklad architektúry prevádzkovej zbernice v oblasti priemyselnej automatizácie



metódy časovania, ktorá je často implementovaná v aplikačných, odvetvovo špecifických operačných systémoch reálneho času alebo zákaznických riadiacich programoch reálneho času.

Sieťové zabudované systémy používané v kritických bezpečnostných aplikáciách, napr. x-by-wire, ktoré adoptovali mechanické riešenia s cieľom nahradiť mechanické a hydraulické riešenia elektrickými/elektronickými systémami, musia byť vysoko spoľahlivé, aby zabezpečili systém odolný proti poruche. Príkladmi takýchto zabudovaných systémov sú napr. v lietadlách systémy typu fly-by-wire či v automobilových aplikáciách systémy steer-by-wire, kde by chyba alebo zlyhanie systému mohli ohroziť ľudské životy, majetok alebo životné prostredie. Aby sa takýmto rizikám predchádzalo, treba na základe požiadavky používateľa systému sprístupniť spoľahlivé a bezchybné služby. Napríklad pri systémoch x-by-wire je prevádzková spoľahlivosť jednou z hlavných požiadaviek. Používanie prevádzkových sietí s pevným prepojením je najbežnejšie, avšak bezdrôtové technológie – vrátane hybridných drôtových/bezdrôtových riešení – ponúkajú inšpirácie v mnohých aplikačných oblastiach. Napríklad siete bezdrôtových snímačov/akčných členov môžu zabezpečiť podporu pre vzdialenú prevádzku v prípade mobilných robotov a monitorovanie a riadenie zariadení v nebezpečnom a ťažko dostupnom prostredí. Špeciálnou kategóriou sú siete bezdrôtových snímačov na monitoring.

Možnosti a príležitosti SoC a MPSoC

Existuje niekoľko možností využitia vyplývajúcich z výkonného a bezchybného návrhu SoC a zvlášť viacprocesorových SoC (Multi-Processor System-on-Chip; MPSoC), ktoré kombinujú výhody paralelného počítania so schopnosťou vysokého stupňa integrácie SoC. Medzi oblasti využitia patrí testovanie zabudovaných pamätí v SoC, bezpečnosť zabudovaných systémov, ako aj vývoj bezpečnostných kritických systémov v súvislosti s x-by-wire a mnoho iných aplikácií [8].

Stále rastúca hustota integrovaných obvodov, rastúce prevádzkové frekvencie spolu s využitím návrhov systémov na jednom čípe priniesli enormné množstvo testovacích údajov pre dnešné zabudované integrované obvody. Znižovanie množstva údajov a času sú dve základné výzvy pri testovaní týchto typov integrovaných obvodov. Medzi ďalšie problémy patria: narastajúca rozdielnosť medzi výkonom integrovaného obvodu a výkonom automatického testovacieho zariadenia, pri ktorých je vysokorýchlostné testovanie

veľkým problémom, čoho výsledkom je rastúca strata zisku; vyššia cena manuálne vyvinutých funkčných testov, ako aj rastúca cena vysokorýchlostných testerov. Rastúca spotreba energie ako dôsledok rastúcej hustoty integrovaných obvodov a hodinovej frekvencie mala priamy vplyv na cenu zapuzdrenia a chladenia, ako aj na spoľahlivosť a životnosť. Tieto a ďalšie faktory, napr. napájacie zdroje využívajúce batérie a obmedzenie rozmerov zariadenia (v prípade hand-held zariadení), robia návrh smerujúci k zníženiu spotreby energie v oblasti zabudovaných systémov vysoko prioritným. Metodológie a techniky návrhu sa zameriavajú na zníženie statickej, ako aj dynamickej spotreby energie, čo má zase za cieľ optimalizáciu na úrovni systému/aplikácie, energeticky úsporné systémy spracovania, napr. zmena napätia a frekvencie procesora podľa potreby, dynamické využívanie zdrojov a výber jadra procesora, ako aj energeticky úsporný pamäťový subsystém, napr. hierarchické nastavovanie pamäte, nová vízia horizontálneho a vertikálneho rozdeľovania pamäte a dynamická zmena veľkosti pamäťových prvkov.

Čiastočne obmedzené komerčné zdroje širokopásmového prenosu pre výpočty, pamäť a komunikáciu zabudovaných riadiacich zariadení (napr. prevádzkové prístroje v priemyselnej automatizácii) sa stali zložitým problémom zabezpečenia efektívnych pravidiel bezpečnosti, ktoré sú vo všeobecnosti náročné na zdroje. To obmedzuje možnosť používania odskúšaných kryptografických protokolov. Operačné systémy bežiacie na malých regulátoroch sa inštalujú len so základnými službami a neposkytujú autentifikáciu a riadenie prístupu k chráneným, pre aplikáciu a bezpečnosť kritickým prevádzkovým prístrojom. Rastúce požiadavky na vzdialený prístup k údajom z prevádzky môže vystaviť automatizačné systémy potenciálnym útokom na bezpečnosť elektroniky, čo môže prelomiť integritu týchto systémov a ohroziť bezpečnosť celého podniku. Požiadavku na funkčnosť systému/podniku možno dosiahnuť aktualizáciou bezpečnostných softvérov v momentálne pracujúcich prevádzkových zariadeniach, čo je však nepraktické a príliš riskantné.

Literatúra

- [1] H. CHANG, L. COOKE, M. HUNT, G. MARTIN, A. MCNELLY, L. TODD: Surviving the SoC Revolution: A Guide to Platform-Based Design. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] A. SANGIOVANNI-VINCENTELLI, G. MARTIN: Platform-Based Design and Software Design Methodology for Embed-

ded Systems. IEEE Design and Test of Computers 18 (2001) 6, 23-33.

- [3] M. KEATING, P. BRICAUD: Reuse Methodology Manual for System-on-a-Chip Designs. Kluwer Academic Publishers, 1998 (First Edition), 1999 (Second Edition), 2002 (Third Edition).
- [4] G. MARTIN, C. LENNARD: Invited CICC paper. -Improving Embedded Software Design and Integration for SOCs. Custom Integrated Circuits Conference, May 2000, 101-108.
- [5] G. MARTIN, H. CHANG (Editors): Winning the SOC Revolution: Experiences in Real Design. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [6] R. ZURAWSKI (ed.): The Industrial Communication Systems, Special Issue. Proceedings of the IEEE, 93 (2005) 6.
- [7] ZIMMERMANN, H.: OSI Reference Model: The ISO model of architecture for open system interconnection. IEEE Transactions on Communications, 28(4): 425-432, 1980.
- [8] R. ZURAWSKI (ed.): Embedded Systems Handbook. Taylor & Francis, 2005.

Prevzaté z ABB Review, č. 2/2006.

O autoroch

Grant Martin je hlavným výskumníkom v spoločnosti Tensilica, Inc. Bakalársky a inžiniersky titul v odbore matematika získal na Univerzite Waterloo, Kanada. Skôr, ako v roku 2004 nastúpil do spoločnosti Tensilica, pracoval v Burroughs v Škótsku, BNR/Nortel v Kanade a Cadence Design Systems v San Jose, Kalifornia.

Richard Zurawski je prezidentom ISA Group v San Franciscu. Zastáva výkonné funkcie v niekoľkých spoločnostiach lokalizovaných v priemyselnom parku v San Franciscu, napr. Kawasaki Electric, Tokio, a bol profesorom na Institute of Industrial Science na univerzite v Tokiu. Je autorom série kníh o priemyselných informačných technológiách, ktoré vydalo vydavateľstvo CRC Press/Taylor&Francis. Získal titul inžiniera v odbore elektrotechnika a PhD. v odbore počítačové vedy.

Grant Martin

Tensilica, USA
e-mail: gmartin@tensilica.com

Richard Zurawski

ISA Group, USA
e-mail: r.zurawski@ieee.org

2

