

# Mikrokontroléry

# ATMEL AVR

Popis procesoru a instrukční soubor

Vladimír Váňa

Praha 2003



*Mikrokontroléry ATMEL AVR se v poslední době staly spolu s mikrokontroléry PIC firmy MICROCHIP a jednočipovými mikropočítači s jádrem x51 nejrozšířenějšími „jednočipáky“ v řadě amatérských i profesionálních konstrukcí u nás. Z této trojice nejpoužívanějších řad jsou nejmladší a tak dosud neměl český uživatel, programátor či konstruktér možnost seznámit se (s výjimkou informativních časopiseckých článků) podrobně s jejich architekturou a kompletním popisem instrukčního souboru v češtině.*

*Proto si publikace klade za cíl seznámit českého čtenáře především s architekturou AVR a se souborem instrukcí. V části popisující architekturu seznamuje s jádrem AVR MCU, s organizací paměťového systému a adresovacími módy, s I/O prostorem, popisem periferií integrovaných v AVR MCU jako jsou porty, čítače/časovače, SPI, UART, A/D a popisem jejich registrů, což jsou údaje potřebné při programování i pro návrh praktických zapojení. Tato publikace má tedy spíše poskytovat teoretický základ, potřebný při čtení dalších publikací, týkajících se již praktických konstrukcí či programování.*

*Protože je v současné době i nedostatek publikací o AVR zaměřených spíše prakticky, jsou v této úvodní publikaci o AVR zařazeny i ukázky praktických konstrukcí – ISP programátoru s AT90S1200 a jednoduchého vývojového kitu s AT90S8515, včetně obrazce jednostranných plošných spojů a dále i stručnou informaci o potřebném vývojovém software, včetně odkazů na Internetu, kde lze tento software zdarma získat.*

---

Vladimír Váňa

## **Mikrokontroléry ATMEL AVR – popis procesoru a instrukční soubor**

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Vladimír Váňa, Praha 2003

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Vladimír Váňa: Mikrokontroléry ATMEL AVR – popis procesoru a instrukční soubor

BEN – technická literatura, Praha 2003

1. vydání

**ISBN 80-7300-083-0**

# OBSAH

<b>Seznam instrukcí (řazen dle očíslovaných stran v knize) ....</b>	<b>5</b>
<b>Slovo autora .....</b>	<b>7</b>
Mikroprocesory rodiny AVR .....	9
<b>1 Architektura mikrokontrolérů AVR.....</b>	<b>11</b>
<b>2 AVR – řady mikrokontrolérů .....</b>	<b>17</b>
<b>3 Adresovací módy .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Další prvky architektury AVR.....</b>	<b>23</b>
Hlídací obvod Watchdog .....	23
Obvod RESETu .....	25
Čítače/časovače .....	26
Serial Peripheral Interface SPI – synchronní sériový port .....	36
UART .....	40
Analogový komparátor .....	45
A/D převodník .....	47
<b>5 Vnitřní paměť EEPROM .....</b>	<b>53</b>
<b>6 I/O porty .....</b>	<b>55</b>
<b>7 Přerušovací systém .....</b>	<b>67</b>
Instrukční soubor MCU AVR .....	68

<b>8 Příklady konkrétních AVR MCU .....</b>	<b>69</b>
AT90S1200 .....	69
AT90S2313 .....	71
AT90S8515 .....	72
AT90S8535 .....	74
Programování paměti na čipu MCU .....	74
AVR studio .....	79
<b>9 Poznámka na konec .....</b>	<b>83</b>
<b>Příloha 1 – instrukční soubor řady AVR .....</b>	<b>84</b>
Stavový registr (SREG) .....	84
Registry a operandy .....	84
I/O registry RAMPX, RAMPY, RAMPZ .....	85
RAMPD .....	85
EIND .....	85
STACK .....	85
Příznaky (FLAGS) .....	85
Podmínky větvení programu .....	85
Úplný instrukční soubor .....	86
<b>Literatura .....</b>	<b>327</b>

# SEZNAM INSTRUKCÍ

(řazen dle očíslovaných stran v knize)

ADC .....	90	BSET .....	146
ADD .....	92	BST .....	148
ADIW .....	94	CALL .....	150
AND .....	96	CBI .....	152
ANDI .....	98	CBR .....	154
ASR .....	100	CLC .....	156
BCLR .....	102	CLH .....	158
BLD .....	104	CLI .....	160
BRBC .....	106	CLN .....	162
BRBS .....	108	CLR .....	164
BRCC .....	110	CLS .....	166
BRCS .....	112	CLT .....	168
BREQ .....	114	CLV .....	170
BRGE .....	116	CLZ .....	172
BRHC .....	118	COM .....	174
BRHS .....	120	CP .....	176
BRID .....	122	CPC .....	178
BRIE .....	124	CPI .....	180
BRLO .....	126	CPSE .....	182
BRLT .....	128	DEC .....	184
BRMI .....	130	EICALL .....	186
BRNE .....	132	EIJMP .....	188
BRPL .....	134	ELPM .....	190
BRSH .....	136	EOR .....	192
BRTC .....	138	ESPM .....	194
BRTS .....	140	FMUL .....	196
BRVC .....	142	FMULS .....	198
BRVS .....	144	FMULSU .....	200

ICALL .....	202	ROR .....	264
IJMP .....	204	SBC .....	266
IN .....	206	SBCI .....	268
INC .....	208	SBI .....	270
JMP .....	210	SBIC .....	272
LD .....	212	SBIS .....	274
LD (LDD) .....	214	SBIW .....	276
LD (LDD) .....	217	SBR .....	278
LDI .....	220	SBRC .....	280
LDS .....	222	SBRS .....	282
LPM .....	224	SEC .....	284
LSL .....	226	SEH .....	286
LSR .....	228	SEI .....	288
MOV .....	230	SEN .....	290
MOVW .....	232	SER .....	292
MUL .....	234	SES .....	294
MULS .....	236	SET .....	296
MULSU .....	238	SEV .....	298
NEG .....	240	SEZ .....	300
NOP .....	242	SLEEP .....	302
ORI .....	244	SPM .....	304
OR .....	246	ST .....	306
OUT .....	248	STS .....	309
POP .....	250	ST (STD) .....	311
PUSH .....	252	ST (STD) .....	314
RCALL .....	254	SUB .....	317
RET .....	256	SUBI .....	319
RETI .....	258	SWAP .....	321
RJMP .....	260	TST .....	323
ROL .....	262	WDR .....	325

# SLOVO AUTORA

V sedmdesátých letech minulého století, kdy spatřil světlo světa první mikroprocesor a kdy technologie výroby složitých integrovaných obvodů byla v plenkách, byli návrháři touto technologií omezeni a také jim scházely zkušenosti z použití těchto nových prvků. Spolu se zlepšující se technologií a zkušenostmi z nasazení prvních mikroprocesorů se návrhářům dařilo navrhovat stále dokonalejší obvody.

Koncem sedmdesátých let se pak vývoj těchto obvodů rozdělil do dvou směrů.

První směr vedl k stále se zvyšujícímu výkonu mikroprocesorů, větších kapacit i rychlostí paměti, lepších obvodů I/O apod. Objevovaly se 16, 32 a 64bitové mikroprocesory s architekturou RISC i CISC. Příkladem může být intelovská řada používaná v osobních počítačích PC či pracovních stanicích počínajíc typem 8086, přes obvody 80286, 80386 a 80486 po procesory Pentium, ..., Pentium 4. Současně postupoval i vývoj software využívaný těmito mikroprocesory a to jak operační systémy (DOS, UNIX, LINUX, Windows apod.), tak i nástroje pro tvorbu programů počínajíc assemblerem (v těchto počítačích dnes již téměř nepoužívaným), přes vyšší programovací jazyky jako Pascal či C umožňující psát strukturované programy, C++, Java, C# atd. pro objektově orientované programování, rovněž se zlepšovalo prostředí těchto vývojářských nástrojů, což vedlo k nástupu nástrojů RAD (Visual Basic, Delphi, C++ Builder, JBuilder atd.). Objevily se i nástroje CASE. Velké množství zpracovávaných dat vedlo ke vzniku SQL a jeho používání v databázích jako např. MS SQL server či Oracle atd., nástup sítí pak k rozvoji distribuovaných aplikací, koncepci klient/server a později i vícevrstvé architektury. Dalším fenoménem byl rozvoj Internetu a intranetů, koncepce .NET či .COM, e-business atd.

Druhý směr vedl k integraci celého počítače na jeden čip. Na tomto čipu je integrován jak vlastní mikroprocesor, tak paměti i obvody I/O. Většinou je přitom oddělena paměť programu od paměti pro data (Harwardská architektura), na rozdíl od společné paměti pro program i dat u počítačů prvního směru (von Neumanovská architektura). Tyto počítače, umístěné na jednom čipu, je někdy možné rozšířit např. o další vnější paměť atd. Je to umožněno tím, že jejich vnitřní sběrnice je vyvedena na vývody integrovaného obvodu. Těmto prvkům pak obvykle říkáme *jednočipové mikropočítače*. V řadě případů však vystačíme s jedním obvodem, není potřeba rozšiřovat jeho paměť atd. Vlastnosti tohoto počítače k vytvoření jednoduché aplikace bohatě stačí, přitom je potřeba, aby cena tohoto obvodu byla co nejmenší. Toho lze docílit mj. i tím, že se co nejvíce sníží počet vývodů obvodu a není vyvedena sběrnice. Potom obvykle mluvíme o *jednočipových řadičích* (či *mikrokontrolérech MCU*). Hranice mezi jednočipovými řadiči a jednočipovými mikropočítači, jak jsme si ji definovali, není ostrá a jednotlivé produkty ji překrývají. Jednočipové mikropočítače, schopné vytvářet vnější sběrnici, se mohou často omezit na vnitřní paměť programu i dat a mohou tak být použity (při vyšší ceně prvku i spoje) ve funkci jednočipového

řadiče. Někteří výrobci dokonce dodávají levné varianty jednočipových mikropočítačů v pouzdech s malým počtem vývodů, u kterých je vnější rozšíření vyloučeno. Jako příklad si můžeme uvést jednočipový „řadič“ Philips 83C752 (87C572) v pouzdře DIL28 (PLCC28), který je modifikací jednočipového mikropočítače Philips 83C552. Na druhou stranu, řady jednočipových řadičů jsou rozšiřovány o prvky dovolující vytvořit vnější sběrnici. Takové modifikace podstatně zjednodušují vývoj programového vybavení, které se jinak musí opírat pouze o programové simulátory a opakované programování vnitřní paměti EPROM či EEPROM, případně o drahé emulační čipy. Jako příklad rozšíření řady jednočipových řadičů směrem k jednočipovým mikropočítačům si můžeme uvést prvek Microchip 16C71, který rozšiřuje řadu řadičů Microchip 16C5x. Připojení vnější paměti umožňuje i řada AVR mikrokontrolérů ATMEL, jimiž se budeme dále zabývat v této knize.

Doménou jednočipových řadičů jsou hromadně vyráběné řídicí obvody pro domácí spotřebiče, domácí audio-vizuální techniku, zabezpečovací zařízení, telefonní přístroje. Typickými aplikacemi je i obsluha vstupních zařízení počítačů (klávesnice, myši), modemy, řízení zobrazovacích panelů v automobilech, zpracování signálů v inteligentních senzorech a jednoúčelové řízení motorů pro průmyslovou automatizaci. Vzhledem k nízké ceně jsou i vhodnou alternativou k logickým obvodům tam, kde není vyžadována vysoká rychlost (vhodnou alternativou k logickým obvodům v případech, kdy požadujeme vysokou rychlost a současně i možnost jejich naprogramování/přeprogramování jsou např. obvody FPGA; ostatně firma ATMEL má v rodině AVR, o které pojednává tato kniha, i mikroprocesor s programovatelným polem FPGA. Tato kombinace, umožňuje jednak uživateli naprosto volnou definici periférií dle potřeby konstruktéra, jednak redukuje množství různých variant, které musí výrobce vyrábět, aby uspokojil různorodé požadavky zákazníků). Zatímco ještě před pár lety byly jednočipové řadiče typicky 4bitové a jejich aplikační použití se omezovalo na logické řízení, dnes se setkáváme převážně s mikrokontroléry 8bitovými. Pro náročnější aplikace (řízení automobilových motorů, ABS systémy) lze počítat s příchodem jednočipových řadičů 16bitových.

Běžné jednočipové mikropočítače jsou 8bitové, jejich výkon je však nedostatečný pro řadu zajímavých aplikací. Typickým příkladem je řízení vstřikování paliva a řízení zapalování spalovacích motorů nebo ochrana brzdového systému proti zablokování (systémy ABS). V těchto aplikacích je nepostačující i schopnost časovačů měřit časové parametry vstupních signálů a generovat výstupní signály s požadovanou přesností. Požadavky, kladené na tyto aplikace vedly k rozvoji 16bitových jednočipových mikropočítačů, jejichž typickými představiteli jsou mikropočítače řady Intel 8096/80C196.

Šestnáctibitové jednočipové mikropočítače pokrývají současné potřeby řízení v reálném čase. Oblast aplikací, na které již nestačí jednak výpočetní kapacitou, jednak rozsahem použitelné paměti, je zpracování zvukového a obrazového signálu (případně signálů ultrazvukových a rentgenových snímačů ve zdravotnictví či průmyslu, radarových systémů v dopravě a vojenství). Řada těchto aplikací je doménou signálových procesorů vybavenou výkonnou aritmetickou jednotkou. Jiné vyžadují

provést množství operací nad rozsáhlými daty a to je typická doména 32bitových mikroprocesorů a mikropočítačů. Omezujícím faktorem při výběru současných 32bitových mikroprocesorů pro vestavěné (Embedded) aplikace je nutnost vytvoření velmi rychlé a dosti komplikované sběrnice a paměťového subsystému. K tomu, abychom mohli mluvit o skutečných jednočipových mikropočítačích také chybí efektivní obvody rozhraní, které jsme mohli poznat u 8bitových a 16bitových mikropočítačů (čítače a časovače, moderní převodníky A/D).

Pokud jde o 8bitové jednočipové mikropočítače a mikrokontroléry patří u nás mezi nejpoužívanější dvě řady. Jednou z nich je mikropočítač 8051, který pochází z roku 1980 a je vývojově relativně starým. U návrhářů však dosáhl takové obliby, že i v současné době se řada výrobců, včetně firmy Atmel, orientuje na výrobu procesorů s jádrem 8051, které je rozšířené o další periferie. Je to procesor s architekturou jádra CISC.

Druhou řadou jsou mikrokontroléry PIC firmy Microchip s architekturou jádra mající silné prvky architektury RISC. Jsou vhodné hlavně pro jednoduché aplikace. Kromě nízké ceny jsou výhodné i tím, že firma Microchip k nim poskytuje zdarma vývojový software a to jak assembler, tak i jazyk C. Kromě řady x51 a PIC se u nás občas ještě používá např. Zilog Z8 či Motorola 68HC11, popř. další. O jejich hw i vývoji jejich sw vyšlo v nakladatelství BEN – technická literatura dosti publikací, v časopisech jako Amatérské rádio, Praktická elektronika či Rádio plus KTE byla publikována řada konstrukcí zejména s procesory PIC či x51. V poslední době se i u nás v maloobchodním prodeji a v konstrukcích objevují MCU AVR firmy ATMEL. Protože zatím v češtině nejsou AVR příliš popsány, napsal jsem tento text pro potřebu výuky předmětu „Elektronické počítače“ na střední průmyslové škole elektrotechnické s touto specializací. MCU AVR firmy Atmel jsou totiž mj. i dalším, moderním prvkem pro vytváření tzv. embedded aplikací. Je předpovídán velký rozvoj těchto aplikací, zejména v souvislosti s mobilními komunikacemi, propojení s Internetem (jistě jste četli např. úvahy o tom, jak kdejaká lednička bude mít vlastní IP adresu, bude automaticky doobjednávat svůj obsah atd., či o tom, že prvním takto realizovaným zařízením je nějaký topinkovač). Svou příležitost zde nalézají i velké firmy, tvořící původně jen software pro počítače PC a větší. Je to mj. i Microsoft se svými eMbedded Visual Tools či embedded doplňkem k VisualStudio.NET, nebo SUN se svou Javou J2ME.

## Mikroprocesory rodiny AVR

Když firma Atmel viděla, jaký úspěch na trhu zaznamenal Intel se svojí rodinou 80C5x, uvedla kolem roku 1993 svoji inovaci tohoto oblíbeného mikroprocesoru. Tou inovací bylo použití paměti flash jako programové paměti, namísto do té doby používané paměti EPROM. Byl to velmi dobrý tah, neboť do té doby, aby bylo možné do mikroprocesoru nahrát (přeprogramovat) nové programové vybavení, musel být zapouzdřen do velmi drahého keramického pouzdra s okénkem. Po odladění

programového vybavení bylo pak pro větší série možné použít ten samý procesor v laciném plastovém pouzdru, který však neměl možnost přeprogramování, neboť pouzdro nemohlo mít okénko nutné pro vymazání paměti EPROM pomocí UV záření. Díky velmi dobře zvládnuté technologii flash slavila firma Atmel velké úspěchy s tímto mikroprocesorem. To vedlo firmu k uvedení vlastních odvozených typů. Na jedné straně některé aplikace nepotřebují tolik vstupů/výstupů jako má mikroprocesor v pouzdře DIL40, takže se objevil např. v pouzdře DIL20 typ AT89C2051, na druhé straně nárůst složitosti aplikací spolu s častějším používáním vyšších programovacích jazyků donutily výrobce implementovat do mikroprocesoru stále větší paměť programu a v menší míře i větší program dat. Složitější aplikace taktéž vyžadovaly nové a nové periferie. Proto v této řadě mikroprocesorů s jádrem 8051 najdeme obvody s integrovaným obvodem Watchdog, analogovým komparátorem, paměť EEPROM pro konfigurační či kalibrační data, paměť programu až 32 kB, rozhraní SPI, dvojitém data pointerem. I když tyto inovace spolu se zlepšující se technologií přinesly zvýšení hodinového kmitočtu procesoru až na 33 MHz a tím zvýšení výpočetního výkonu až na 2,75 Mips, přece jen potřebám některých aplikací přestaly tyto procesory stačit. Proto se v norském vývojovém centru Nordic VLSI v Trondheimu začátkem devadesátých let minulého století skupina návrhářů hw spolu s programátory rozhodla navrhnout novou strukturu mikrokontroléru tak, aby struktura tohoto mikrokontroléru vyhovovala překladačům vyšších programovacích jazyků, zejména široce používaného jazyka C. Výsledkem práce této skupiny bylo optimalizované jádro nové řady mikroprocesorů s Harwardskou architekturou nesoící hlavní charakteristiky mikroprocesorů s redukovanou instrukční sadou (RISC – Reduced Instruction Set Controllers). Před několika lety koupila firma Atmel od norských vývojářů tuto koncepci, na které je založena rodina AVR, kterou také uvedla v druhé polovině devadesátých let na trh.

Přes zdánlivou podobnost s jádrem mikroprocesoru 8051 najdeme zde podstatné odchylky. Především je to šíře instrukčního slova zvětšená na 16 bitů. Zvětšení šířky instrukčního slova na jednu stranu zvětšilo požadavky na velikost paměti, na druhou stranu však umožnilo zrychlit načtení mnoha instrukcí, neboť kromě několika výjimek vystačí instrukce s jedním slovem, tj. mikroprocesor je dokáže načíst během jednoho hodinového cyklu. Druhým velkým rozdílem je propojení ALU s polem 32 pracovních registrů. To umožnilo snížit počet hodinových taktů potřebných na provedení téměř všech instrukcí na pouhé dva takty, načtení + dekódování a vykonání. To, že instrukce vystačí s jedním slovem, umožnilo implementaci jednoduchého překrývání instrukcí (pipelining). Počet hodinových taktů potřebných na vykonání instrukce typu registr-registr se tímto snížil na pouhý 1 hodinový takt, tj. na 1 MHz hodinového kmitočtu připadá výkon 1 Mips. Srovnáme-li toto se základním instrukčním cyklem řady 8051, vidíme, že jádro nové řady mikroprocesorů AVR dokáže poskytnout až 12× větší výpočetní výkon při shodném hodinovém kmitočtu.