6 STAVOVÉ AUTOMATY

Podkapitoly:

Cíle kapitoly:

Podat přehled poznatků o stavových automatech potřebných k jejich efektivnímu použití v konstrukcích a k jejich implementaci v programovatelných obvodech. Na příkladech tyto poznatky ilustrovat

Stavové automaty jsou sekvenční subsystémy představující zobecnění čítačů. Mohou být synchronní i asynchronní. Zde se budeme zabývat jen synchronními stavovými automaty. Čítače můžeme pokládat za jednoduchý druh (zvláštní případ) stavových automatů. V těchto skriptech se zaměříme na rozšíření poznatků o stavových automatech, které byly stručně uvedeny v kursu impulzové a číslicové techniky, a na jejich aspekty důležité pro implementaci v programovatelných obvodech.

Pokud jde o typy klopných obvodů, programovatelné invertory a podobné prvky, platí zde vše, co bylo řečeno v kapitole o čítačích.

Stavové automaty představují přechod od běžné logiky k mikrokontrolérům. Sekvenční způsob práce mikrokontrolérů (postupné vykonávání instrukcí) dovoluje mikrokontroléry použít v mnoha aplikacích pro řešení nejrůznějších úloh, a propůjčuje jim tedy velkou univerzálnost. Na druhé straně je však příčinou nižší rychlosti reakce, protože pro vytvoření odpovídajících výstupních signálů musí u typického mikrokontroléru proběhnout několik (často velmi mnoho) instrukčních cyklů. Pokud algoritmus vytvoření výstupních signálů není příliš složitý, je obvykle možno stejnou úlohu řešit stavovým automatem, který má strukturu navrženou speciálně pro řešený problém. Tato struktura pak bývá výrazně jednodušší a rychlejší.

Srovnání čítačů, stavových automatů a mikrokontrolérů:

Čítače:

- jejich stavy tvoří cyklus (zpravidla uzavřený), přechody jsou převážně mezi "sousedními stavy" cyklu (inkrementace, dekrementace);
- mají omezený počet vstupů, které ovlivňují chování čítače jednoduchým způsobem (up/down, load, reset...);
- účelem je obvykle počítání událostí (impulsů);
- pro popis jejich funkce obvykle stačí jednoduché slovní vyjádření, případně doplněné tabulkou stavů.

Stavové automaty:

- stavy a přechody mezi nimi mohou být uspořádány zcela obecně, o "sousedních stavech" lze mluvit jen v omezené míře nebo to vůbec nemá smysl;
- vstupů bývá více než u čítačů, ty ovlivňují přechody mezi stavy obecným způsobem, který často nelze jednoduše slovně popsat tak, aby to platilo pro celý automat, popis musí být pro každý stav zvlášť;
- účelem bývá řízení dalších objektů (výtah, křižovatka...), užívají se jako řídicí bloky procesorů, obvodů typu UART, EDAC (*Error Detection and Correction*), arbitrů sběrnic atd.;

- v zásadě lze jakýkoliv složitý číslicový subsystém považovat za stavový automat (včetně mikroprocesorů či mikrokontrolérů);
- stavové automaty se popisují obvykle blokovým schématem a stavovým diagramem, jak bude podrobněji uvedeno dále.

Mikrokontroléry:

- z hlediska principu funkce jsou shodné se stavovými automaty, větší univerzálnost je však zaplacena větší složitostí a pomalejší reakcí na vstupní signály;
- větší univerzálnost dovoluje vyrábět je ve velkých sériích a proto přes jejich větší složitost poměrně levně;
- pro popis struktury a funkce mikrokontrolérů se využívají různé kombinace prostředků jinak využívaných pro popis stavových automatů, tj. blokové schéma, stavové diagramy, podrobnosti funkce jsou však popsány programem. Pro rámcový popis programu se často používají vývojová schémata s vyšší úrovní abstrakce než u programů.

Bloková schémata uváděná pro stavové automaty v dalším textu platí obecně i pro čítače a mikrokontroléry, představují však účelnou pomůcku především pro jednoduché stavové automaty, které jsou schopny vykonávat jednoduchá rozhodnutí. Podobná schémata by v principu mohla sloužit i pro popis mikrokontrolérů, podrobné schéma takového druhu by však bylo velmi nepřehledné, a proto se v tomto případě obvykle používají značně zjednodušená (abstraktní) bloková schémata. Totéž platí i o stavových diagramech.

Popis stavových automatů lze rozdělit do dvou rovin:

- popis struktury (obvodového uspořádání),
- popis funkce (chování).

Pro popis struktury automatu se používá schéma. Důležitým typem je blokové schéma, z něhož vyplývají obecné vlastnosti automatu a možnosti jeho použití.

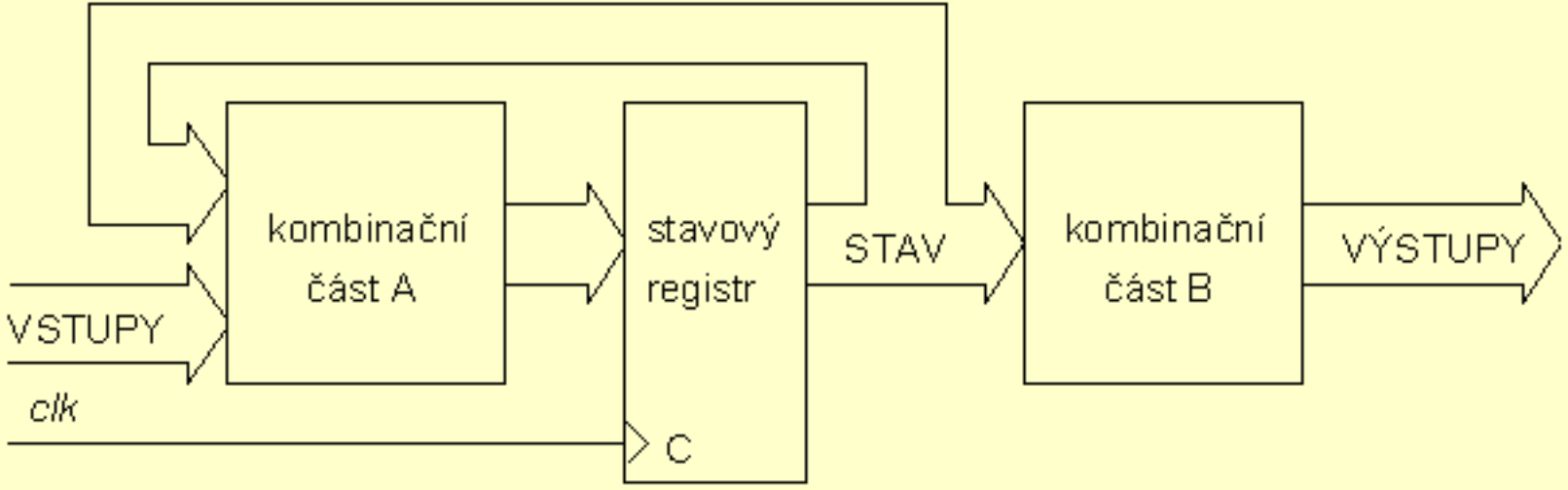
Chování automatu se nejčastěji popisuje stavovým diagramem, z něhož vyplývají podrobnosti jeho funkce.

Chování automatu vyplývá i z podrobného elektrického schématu. Stavový diagram je však pro popis chování automatu zpravidla mnohem přehlednější. Transformaci mezi stavovým diagramem (případně doplněným blokovým schématem) a podrobným elektrickým schématem - tj. syntézu automatu, je možno dnes provést automaticky pomocí návrhových systémů.

Rozlišujeme dva typy stavových automatů:

- stavové automaty Moorova typu, u nichž výstupní signály závisí jen na stavu automatu;
- stavové automaty Mealyho typu, kde výstupní signály závisí i na vstupních signálech.

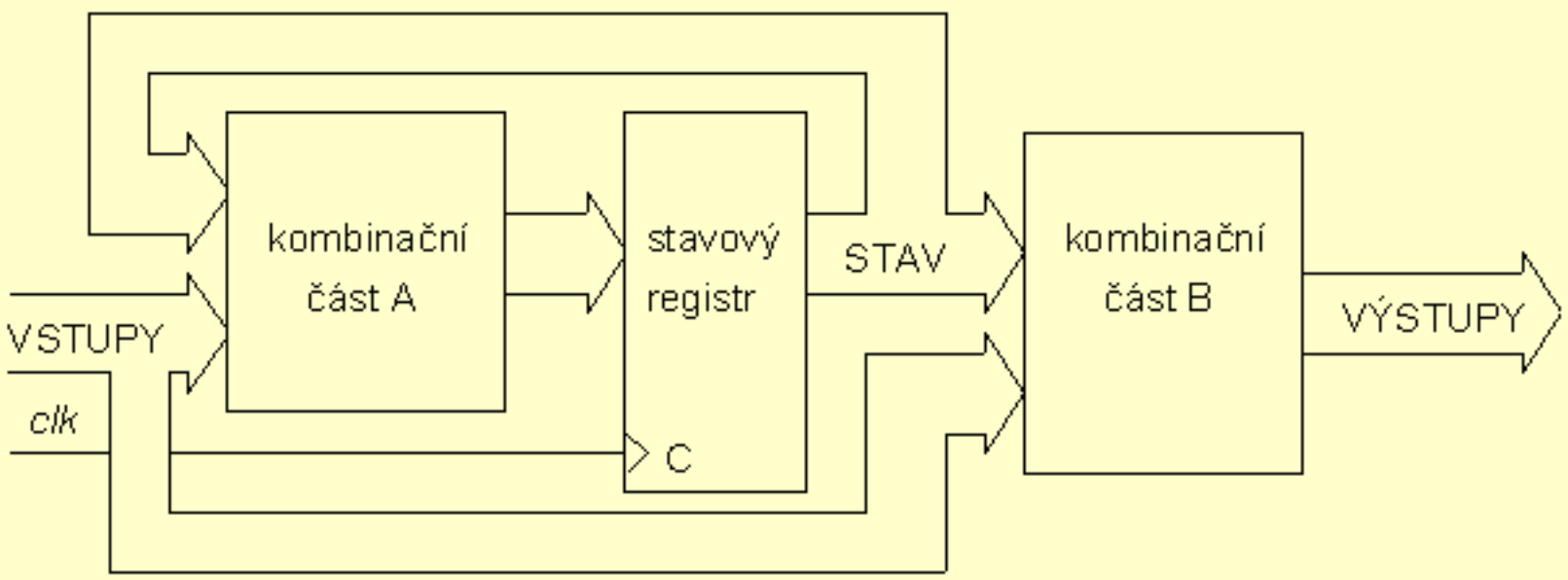
Blokové schéma stavového automatu Moorova typu (***Obr. 6.1***) je stejné jako blokové schéma synchronního čítače:



Obr. 6.1 *Blokové schéma Moorova automatu*

Z ***Obr. 6.1*** je zřejmé, že výstupy nakresleného automatu závisí jen na stavu. Často se kombinační část B redukuje na pouhé propojení, takže výstupem jsou přímo stavové signály, tj. obsah stavového registru. Typickým příkladem jednoduchého stavového automatu Moorova typu je čítač. Je-li jeho výstup využíván přímo, jde o zapojení s výše uvedenou redukcí kombinační části B. Obecnějším příkladem stavového automatu Moorova typu obsahujícího i tuto část může být čítač s dekodérem pro displej.

Stavový automat Mealyho typu (***Obr. 6.2***) je obecnější a jeho blokové schéma je poněkud složitější.



Obr. 6.2 *Blokové schéma Mealyho automatu*

Výstupy stavového automatu Mealyho typu závisí na stavu i na hodnotě vstupních signálů. Příkladem jednoduchého Mealyho automatu může být čítač s dekodérem pro displej, kde je dekodér vybaven dalším vstupem, jehož aktivací se displej po dobu této aktivace asynchronně zhasne.

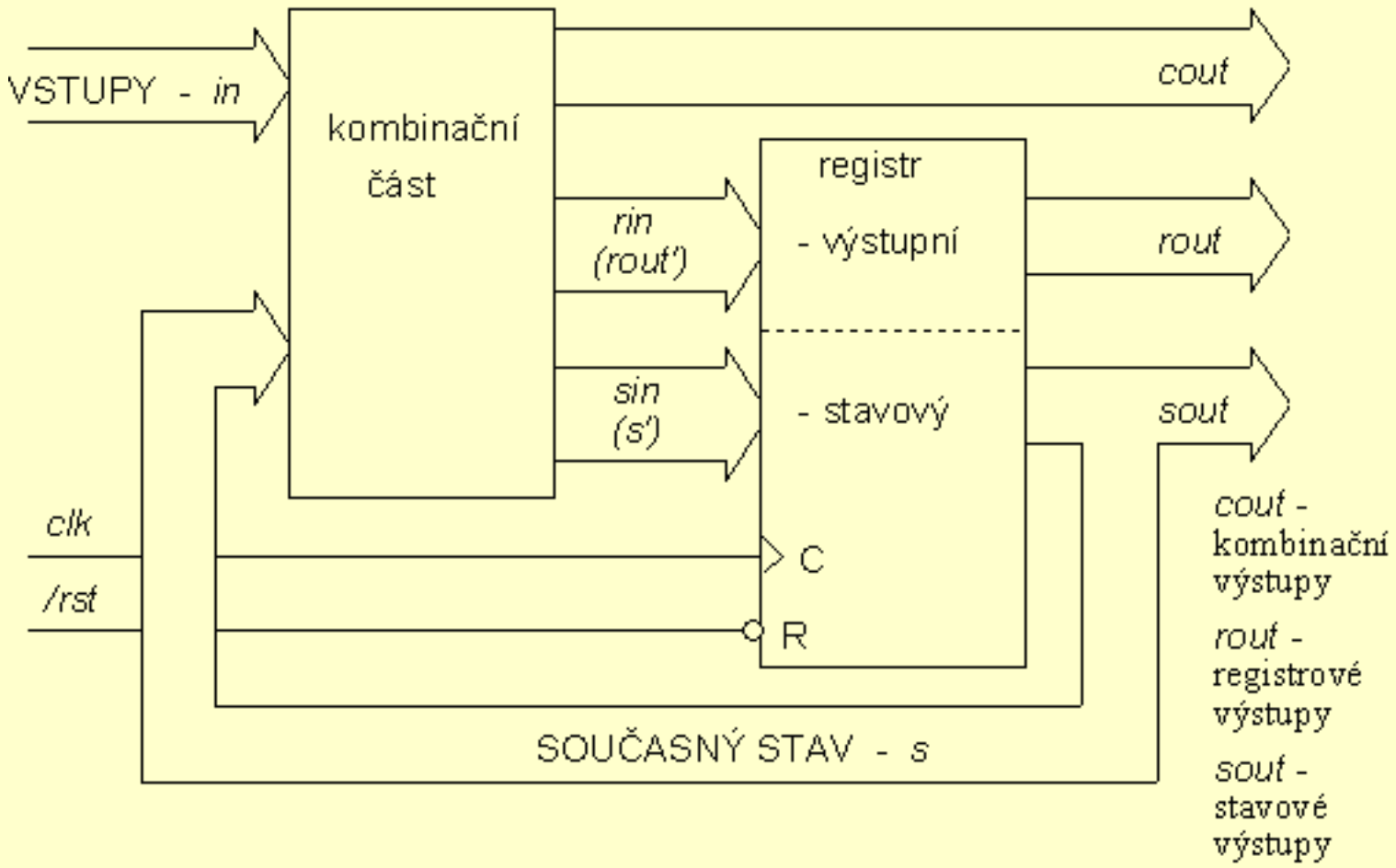
Stavové automaty mohou být i kombinované, tj. část výstupních signálů může záviset na hodnotách vstupních signálů, zbývající mohou záviset jen na stavu. Pak mluvíme o výstupech Mealyho a Moorova typu. Obě kombinační části zobrazené na obrázcích, tedy část A i B, bývají fyzicky realizovány společně, například v obvodech PLD programovatelným polem.

Výstupy stavových automatů Moorova i Mealyho typu mohou být:

- kombinační (uvedené na ***Obr. 6.1*** a ***Obr. 6.2***) - u stavového automatu Mealyho typu takové výstupy reagují okamžitě na změny vstupních signálů, na nichž jsou závislé, a proto se jim také říká asynchronní. Mohou u nich vlivem hazardů v kombinační části B vznikat parazitní impulsy při změnách vstupních a stavových signálů (samozřejmě jen tehdy, je-li v zapojení kombinační části B skutečně hazard nebo mění-li se současně více než jeden z těchto signálů, což však bývá spíše pravidlem než výjimkou);
- registrové - u nich je za kombinační částí B zařazen ještě registr. Tyto výstupy jsou za stavem

zpožděny o jeden takt hodin a na vstupy reagují až při aktivní hraně hodin, jsou však bez parazitních impulsů (případné hazardy v kombinační části B jsou registrem zneškodněny);
- stavové - jsou to signály stavu, které jsou přímo využity jako výstupní signály, a jsou také bez parazitních impulsů. Stavové výstupy jsou zvláštním případem registrových výstupů.

Obecné schéma synchronního stavového automatu je nakresleno na ***Obr. 6.3***. Oba předcházející náčrtky jsou zvláštními případy tohoto schématu. Kombinační část B z ***Obr. 6.1*** a ***Obr. 6.2*** je zde zahrnuta do společné kombinační části. To také odpovídá nejčastějšímu způsobu její fyzické realizace v programovatelném poli obvodu PLD.



Obr. 6.3 *Blokové schéma obecného stavového automatu*

Kombinační část může být vytvořena:

- pomocí logických členů AND, OR (NAND, NOR);
- pomocí paměti PROM;
- programovatelným polem obvodu PLD nebo podobnými prostředky obvodu FPGA;
- dalšími způsoby realizace kombinačních logických funkcí.

- z klopných obvodů typu D - pak mluvíme o registru typu D;
- z klopných obvodů typu T - registr typu T;
- z klopných obvodů dalších typů (RS, JK, DE atd.);
- z kombinace klopných obvodů různých typů.

Je-li registr složen z klopných obvodů typu D, má signál *sin* význam příštího stavu (*s´*) a signál *rin* má význam výstupního signálu v příštím stavu (*rout´*). Jsou-li v registru jiné typy klopných obvodů, je vztah mezi jejich vstupními a výstupními signály dán funkční tabulkou těchto klopných obvodů. Při ruční syntéze stavového automatu musíme tuto skutečnost brát v úvahu. Při syntéze prováděné počítačem s použitím moderních návrhových systémů se potřebné transformace provádějí automaticky, takže pro návrháře zcela stačí zapsat popis automatu s uvažováním klopných obvodů typu D nebo T, podle toho, který z nich je jednodušší.

V dnešních obvodech CPLD jsou nejčastěji k dispozici klopné obvody typu D a T, a návrhové prostředky automaticky provádějí volbu nejvýhodnějšího typu. V obvodech FPGA jsou velmi rozšířené

zejména klopné obvody typu DE.

Vlastnosti výstupů stavových automatů:

Výstupy u stavového automatu Moorova typu se mohou měnit jen v okamžiku aktivní hrany hodinového signálu. Kombinační výstupy Mealyho typu reagují okamžitě na změny vstupních signálů, na nichž jsou závislé. U signálů v kombinačních výstupech mohou vznikat parazitní impulsy (*glitch*), které jsou projevem hazardů, jsou-li tyto v kombinační části. Odstranění hazardů, pokud parazitní impulsy nejsou přípustné, je obecně možné jen tehdy, mění-li se v určitém okamžiku jen jeden ze vstupních nebo stavových signálů. To je často obtížné nebo přímo nemožné zajistit. Kombinační výstupy Moorova typu je však možno přeměnit na registrové zařazením výstupního registru do cesty příslušných signálů. Tím se hazardy zneškodní, proniknutí změn těchto signálů na výstup se ale zpozdí o jeden takt hodin. Toto zpoždění lze vyloučit, pokud se hodnoty signálů na vstupu tohoto registru učiní závislými i na vstupních signálech. Pokládáme-li za výstupní signály automatu signály na vstupu registru, pak se výstupní signály původně Moorova typu přemění na signály Mealyho typu, tj. na signály závislé i na vstupních signálech. To bývá často účelné při syntéze automatu, protože přeměna automatu Moorova typu na automat Mealyho typu může dovolit zjednodušení (zmenšení počtu stavů) automatu. Z hlediska uživatele, který sleduje signály na výstupu registru, se však oba automaty chovají stejně - až na přítomnost parazitních impulsů u původního automatu Moorova typu. Proto se v literatuře často oba typy označují za automat Moorova typu. Přiléhavější označení pro druhý automat však je Mealyho automat s výstupním registrem, přesněji Mealyho automat s registrovým výstupem s předvídáním hodnot výstupních signálů v příštím stavu - v anglické literatuře se někdy setkáme s označením tohoto typu automatu "pipelined Mealy machine". V tomto smyslu jsou tedy automat Moorova typu a automat Mealyho typu s výstupním registrem ekvivalentní. Příklad uvedené transformace bude uveden dále.

Na výstupní registr můžeme pohlížet i jako na část stavového registru. Pak ovšem jsou výstupní signály tohoto registru součástí stavu automatu. Tento pohled podporuje stanovisko, podle něhož jsou stavové automaty Mealyho typu s registrovými výstupy považovány za automaty Moorova typu. Vzhledem k tomu, že zřídka jsou využity všechny možné kombinace hodnot výstupních signálů, vznikne obvykle tímto způsobem jejich interpretace značné množství nepracovních stavů. Z tohoto hlediska bývá naopak účelné rozlišovat mezi stavovým a výstupním registrem. Je tedy zřejmé, že v tomto případě je označení výstupů za výstupy Moorova nebo Mealyho typu závislé na způsobu jejich interpretace. Kombinační výstupy Mealyho typu, které se mohou měnit asynchronně v závislosti na vstupních signálech, však na výstupy Moorova typu pochopitelně nelze převést.

Pro popis funkce stavových automatů se nejčastěji používají *stavové diagramy*. Ty mohou být vyjádřeny graficky, kde je výhodou přehledný záznam, nebo textem, který lze použít jako vstupní text pro počítač. Některé počítačové návrhové systémy zpracovávají i stavové diagramy v grafickém tvaru. Příklady grafické formy stavových diagramů jsou uvedeny na konci této kapitoly.

V grafickém vyjádření stavového diagramu je každý stav automatu zobrazen **uzlem** (kroužkem), v němž je uveden obsah stavového registru příslušný tomuto stavu. U Moorova automatu, kde je obsahem stavového registru určena i hodnota výstupních signálů, se do kroužku zapisuje pod lomítkem i tato hodnota.

Přechody mezi stavy automatu se zobrazují **hranami** diagramu (šipkami). Pokud může automat z jednoho stavu v závislosti na hodnotách vstupních signálů přecházet do více dalších stavů, je nutno vyznačit, při jakých hodnotách vstupních signálů (podmínky přechodu) nastávají jednotlivé přechody. Odpovídající hodnoty vstupních signálů se pak připisují ke hranám představujícím tyto přechody. U synchronních stavových automatů nastávají přechody vždy při aktivní hraně hodinového signálu.

Je-li automat v jistém stavu, pak hodnoty vstupních signálů automatu určují hranu, podle níž se uskuteční následující přechod. U automatů Mealyho typu, kde výstupní signály závisí i na hodnotách vstupních signálů, se k hodnotám vstupních signálů u hran zapisují pod lomítko odpovídající hodnoty výstupních signálů. Změní-li se hodnoty těchto signálů během trvání určitého stavu, je tím vybrána jiná

hrana. Příslušně se změní i hodnoty výstupních signálů. Jde-li o výstupní signály kombinačního typu, nastane změna výstupních signálů ihned po změně vstupních signálů. U registrových signálů se změna projeví na výstupu až po přechodu do nového stavu. Pro hodnoty těchto signálů mají tedy význam pouze hodnoty vstupních signálů v okamžiku aktivní hrany hodinového signálu. Typ výstupních signálů, tj. kombinační nebo registrový, se ve stavových diagramech rozlišuje např. tím, že se hodnoty registrových signálů ke hranám značícím přechody zapisují s čárkou. Jinou možností, často používanou v návrhových systémech, kde čárka nepatří mezi přípustné znaky pro označení identifikátorů, je připojení např. skupiny znaků _r k původnímu označení registrového signálu. Pro srozumitelnost zápisu bývá potřebné připojit k diagramu legendu, kde je vyznačeno, které signály se v diagramu uvádějí na určité pozici.

Stavové diagramy ve formě textu se užívají v návrhových systémech a jejich syntaxe je dána příslušným jazykem HDL. Syntaxe popisu stavových diagramů v jazyku ABEL a popis stavových automatů v jazyku VHDL je popsána v příručce pojednávající o těchto jazycích. V obou těchto případech může být textový popis automatu blízký grafické podobě stavového diagramu, existují však i formy odlišné (například strukturální popis).

Poznámka 1: Někdy se můžeme setkat se způsobem kreslení stavových diagramů, kdy ve stavech a u přechodů nejsou uváděny hodnoty výstupních signálů, ale jejich změny. Není-li pak pro některý výstupní signál uvedena změna, předpokládá se, že jeho hodnota zůstává stejná jako byla v předcházejícím stavu. Změna výstupu nastane v okamžiku, kdy automat přejde do stavu, v němž je změna uvedena, popřípadě v okamžiku vykonání přechodu, u něhož je zapsána. Tento způsob kreslení nemůže přirozeně být užit u kombinačních výstupních signálů Mealyho typu, které se mění okamžitě se změnou vstupních signálů, ale jen u registrových (nebo stavových) výstupů nebo u kombinačních výstupů Moorova typu.

Poznámka 2: Výše uvedená pravidla pro kreslení stavových diagramů nejsou jediná možná, a zejména u návrhových systémů pracujících s těmito diagramy mohou být zavedena syntaktická pravidla poněkud odlišná. Odlišnosti však nebývají zásadní, důležité je, aby nakreslený stavový diagram vystihoval to, co je pro popis automatu důležité. Pokud chápeme problematiku stavových automatů, nemohou nás případné odlišnosti pravidel zaskočit.

Pokračovat na následující podkapitolu: 6.1 Transformace stavového automatu Moorova typu na Mealyho typ a naopak