

# Návrh systému řízení válcovací tratě metodou Model-Based Design

K řízení průmyslových systémů a procesů se v současnosti ve velké míře používají programovatelné automaty (PLC). V různých variantách se uplatňují v nejrůznějších řídicích strukturách, od jednoduchých obvodů s jedním vstupem a jedním výstupem až po systémy s mnoha navzájem provázanými řídicími smyčkami a složitou kontrolní logikou. U jednoduchých úloh, jako je řízení samostatným PID regulátorem, lze zavést algoritmus PID regulace a nastavit jeho zesílení přímo za chodu zařízení. Složitější situace nastává u rozvětvených řídicích struktur. Zde je třeba stanovit hodnoty mnoha parametrů a zajistit, aby všechny části řídicího algoritmu fungovaly společně podle zadaných požadavků. Ladění složitého řídicího algoritmu přímo na reálném prototypu stroje nebo technologickém zařízení není jen časově náročné, ale nese s sebou též značné riziko poškození řízené soustavy.

Řešením bez uvedených nedostatků je návrh a verifikace komplexních řídicích algoritmů při použití simulačních modelů. Z ověřených modelů lze následně automaticky vygenerovat program pro PLC (*Programmable Logic Controller*) v podobě strukturovaného textu podle normy IEC 61131 (*Structured Text – ST*). Metoda nazvaná *Model-Based Design* je založena na softwarových nástrojích Matlab® a Simulink® od firmy MathWorks®.

Program Matlab je interaktivní prostředí pro technické výpočty, vývoj algoritmů, analýzu dat a vizualizaci. Nástroj Simulink je nadstavba programu Matlab poskytující grafické prostředí pro modelování a simulaci chování dynamických systémů. Modely jsou vytvářeny ve tvaru blokových schémat reprezentujících matematický popis soustavy. Nástroj Simulink umožňuje modelovat, simulovat a analyzovat široké spektrum objektů, mezi nimi také řídicích systémů a fyzikálních soustav.

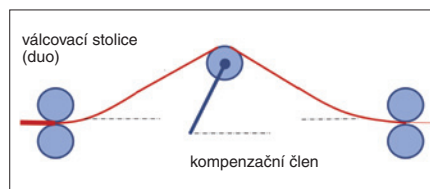
Článek představuje postup návrhu metodou Model-Based Design (MBD) na příkladu průmyslové válcovací tratě pro výrobu ocelových plechů.

## Válcovací trať – cíle řízení

Výstupem z válcovací tratě je ocelový plech konstantní tloušťky, získaný postupným zmenšováním tloušťky výchozího polotovaru (předvalku). Válcovací trať se principiálně skládá z několika válcovacích stolic. Plech v každé z nich prochází mezi dvěma válci (duo) přitlačovanými k sobě potřebnou silou. Mezi válcovacími stolicemi jsou umístěny kompenzační členy, které udržují konstantní napětí v materiálu a zabraňují vzniku trhlin nebo prověšení plechu (*obr. 1*).

Pro simulaci válcovací tratě byla nejprve namodelována jediná válcovací stolice (řízená soustava) a navržen vhodný algoritmus jejího řízení. Obecnější konfigurace byla ná-

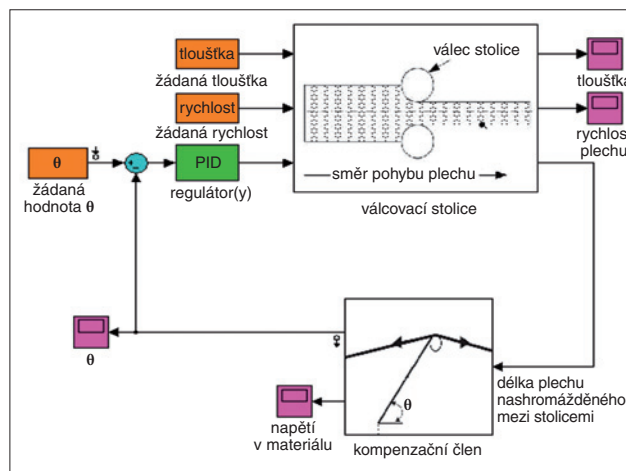
sledně získána propojením několika válcovacích stolic za sebou do válcovací soustavy, tvořící spolu s příslušným řídicím systémem válcovací trať.



Obr. 1. Principiální schéma válcovací tratě se dvěma válcovacími stolicemi

Základní požadavky na válcovací trať a její řídicí systém jsou v uvažovaném případě stanoveny takto:

- tloušťka plechu na výstupu z válcovací tratě  $8 \pm 0,1$  mm,
- propustnost (rychlost plechu) na výstupu válcovací tratě  $1 \pm 0,1$  m/s,
- konstantní podélné mechanické napětí v materiálu mezi sousedními stolicemi  $1,75 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>,



Obr. 2. Model válcovací stolice společně s kompenzačním členem v prostředí Simulink

- detekce poruch snímačů a akčních členů s následnou automatickou korekcí nebo bezpečným zastavením tratě,
- nejdelší doba do ustálení výstupních veličin na požadovaných hodnotách po spuštění tratě nebo po korekci poruchy 100 s.

## Model řízené soustavy

Návrh řídicího systému byl zapačat tvorbou dynamického modelu válcovací soustavy, poté využitého při vývoji a ověřování řídicích algoritmů. Modelování probíhalo ve dvou krocích, když nejprve byly namodelovány jednotlivé válcovací stolice a následně kompenzační členy mezi nimi. Součástí válcovací stolice je hydraulický akční člen, který přitlačuje válce k sobě, a tím způsobuje kompresi tvářeného materiálu. Válci otáčejí připojený elektrický pohon, který pomáhá regulovat rychlost průchodu materiálu.

K namodelování mechanických, elektrických a hydraulických prvků válcovací stolice byly použity nadstavby nástroje Simulink pro fyzikální modelování (knihovny SimMechanics, Simscape a SimHydraulics), které obsahují hotové modely základních fyzikálních komponent, jako jsou mechanická tělesa, hydromotory, potrubí, elektromotory apod. Nebylo tedy třeba manuálně odvozovat matematický popis soustavy.

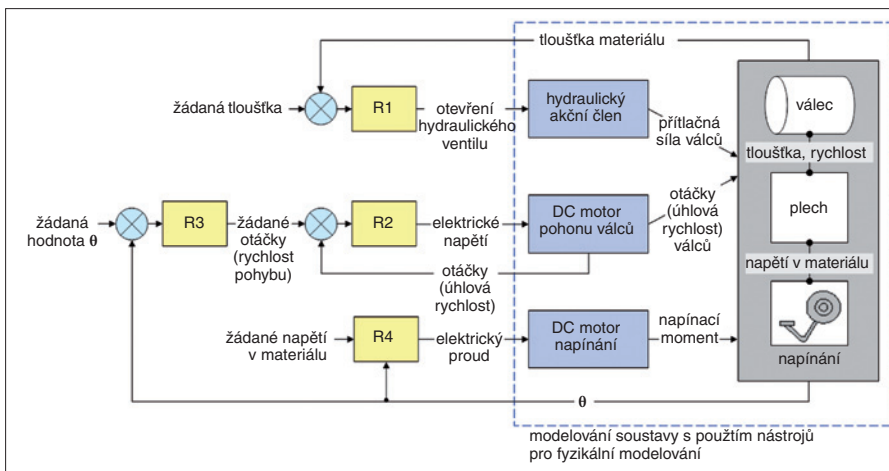
Obdobně byl vytvořen i model kompenzačního členu, v němž jsou propojena tři mechanická tělesa reprezentující jednotlivě napínací prvek a zpracovávaný ocelový plech před prvkem a za ním. Následně byly modely

válcovací stolice a kompenzačního členu propojeny do jednoho celku (*obr. 2*).

## Návrh řídicího systému

V dalším kroku byl model válcovací stolice s jí příslušným kompenzačním členem využit k návrhu řídicího systému této dílčí soustavy. Typický řídicí systém uvedené dílčí soustavy (popř. pak rozvětvený řídicí systém válcovací soustavy s několika stolicemi) obsahuje tyto regulační bloky (*obr. 3*):

- R1: blok řízení otevírání hydraulického ventilu, který ovládá přítlačnou sílu mezi válci a určuje tloušťku vývalku,
- R2: blok řízení napájecího napětí stejnosměrného motoru, který otáčí válci a určuje rychlost pohybu vývalku,
- R3: blok nastavující požadovanou hodnotu rychlosti otáčení válců, a tím nepřímou zajišťující požadované napětí v materiálu; při napětí v materiálu větším než požadované je nastavena větší požadovaná rychlost otáčení válců, dodávajících tak větší množství materiálu, čímž se zmenší napětí v materiálu, a naopak,
- R4: blok řízení proudu motoru napájecího prvku, který udržuje přesnou hodnotu napětí v materiálu.



Obr. 3. Struktura řídicího systému soustavy podle obr. 2 (jako základní stavební blok rozvětveného řídicího systému několikastupňové válcovací soustavy; R1, R2, R3, R4 viz text)

Lze si povšimnout, že regulační smyčky jsou navzájem provázány. Například hydraulický akční člen řízený regulátorem R1 ovlivňuje nejen tloušťku vývalku, ale také rychlost jeho pohybu. Regulátory R2 a R3 pracují v součinnosti tak, aby udržely požadované napětí v materiálu i rychlost jeho průchodu stolicí.

Bylo již uvedeno, že algoritmus řízení byl nejprve navržen pro jednu válcovací stolicí. Nelineární model stolice byl automaticky linearizován při použití nástroje Simulink Control Design. S použitím linearizovaného modelu byly v grafickém prostředí nastaveny konstanty PID regulátoru. Ladicí algoritmy automaticky vypočetly hodnoty jednotlivých konstant podle požadované odezvy. Konečné doladění bylo provedeno s původním nelineárním modelem při použití optimalizačních funkcí obsažených v nástroji Simulink Design Optimization, takže systém vykazoval správné chování i za přítomnosti nelinearity. Kompletní návrh algoritmu byl prověřen mnoha simulacemi s nelineárním modelem řízené soustavy. Model soustavy tak posloužil ke dvěma účelům: linearizovaný model byl využit k nastavení regulátorů a úplný nelineární model k verifikaci navrženého algoritmu řízení při simulaci regulace v uzavřených smyčkách.

### Modelování a simulace chování úplné válcovací tratě

Vytvořené modely válcovací stolice a kompenzačního prvku s navrženou regulací byly dále využity jako komponenty k sestavení celkového modelu třístupňové válcovací tratě. Celkový model dále obsahuje také doplňující dílčí modely subsystémů reflektujících další důležité aspekty procesu válcování, jako např. zachování konstantního množství hmoty anebo dopravní zpoždění mezi jednotlivými stolicemi. Časové průběhy proměnných veličin pro všechny tři stolice zjištěné při simulaci s použitím celkového modelu třístupňové válcovací tratě jsou znázorněny na obr. 4. V každé stolici je dosaženo stanovaného úbě-

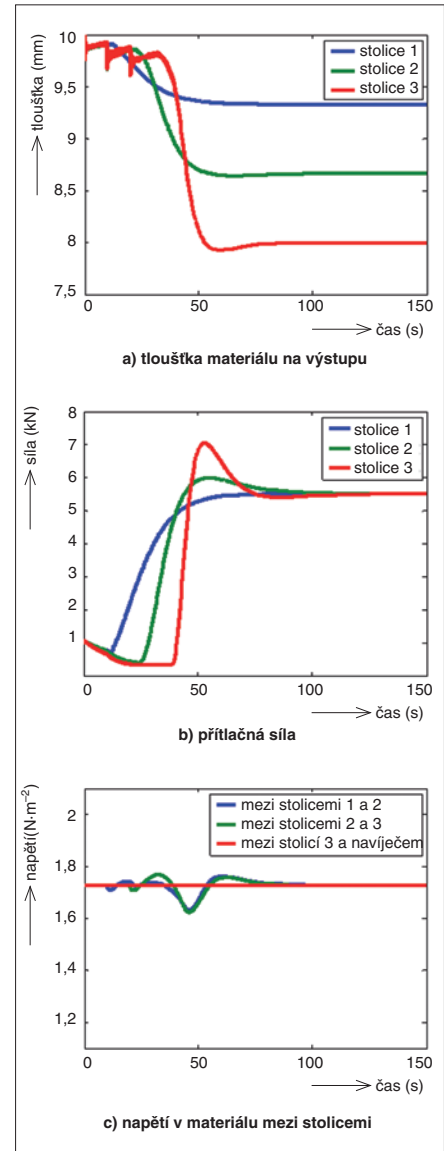
ru tloušťky vývalku tak, aby výsledný plech odpovídal zadaným požadavkům. Současně jsou účinně potlačeny změny napětí v materiálu mezi jednotlivými stolicemi.

### Návrh diagnostického systému

Řídicí systém válcovací tratě musí vedle zpětnovazební regulace obsahovat také podsystémy operátorské a diagnostické logiky pro detekci poruch a zajištění plynulého provozu tratě. Úkolem těchto podsystémů je např. sledovat stav snímačů a akčních členů v řídicím systému. Další text bude zaměřen na podsystém obnovy funkce tratě po poruše, který detekuje poruchy v hydraulických ventilech a reaguje na ně korekčními opatřeními.

Řídicí logika je navržena tak, aby rozkládala celkovou požadovanou změnu tloušťky materiálu mezi jednotlivé válcovací stolice. Selže-li hydraulické přítlačné zařízení některé ze stolic, logika prověří, zda zbývající stolice mohou tento výpadek kompenzovat. Jestliže ano, přepočítají se požadované hodnoty změny tloušťky materiálu pro zbývající stolice tak, aby bylo opět dosaženo požadované výsledné tloušťky plechu. Jestli ne, je chod celé válcovací tratě automaticky bezpečně zastaven.

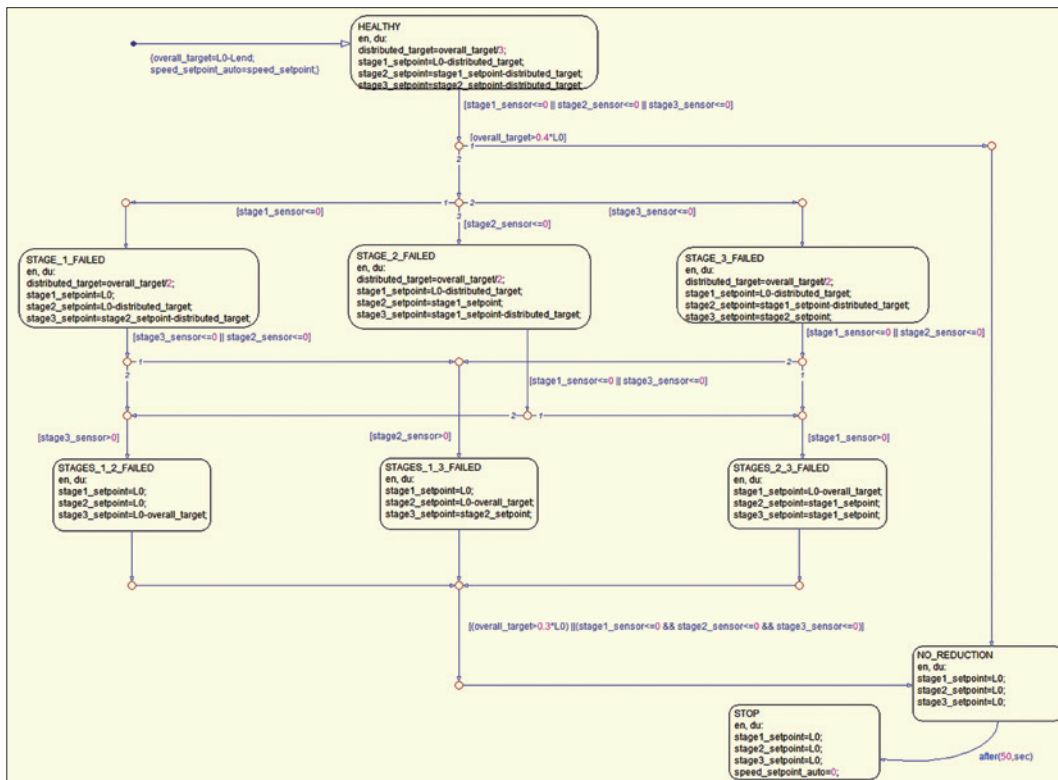
Řídicí logika byla navržena v grafickém nástroji Stateflow, určeném k modelování stavových diagramů, jak ukazuje obr. 5. Je třeba poznamenat, že logika podle obr. 5 reprezentuje zjednodušené řešení logického podsystému obnovy po poruše umožněné přijetím předpokladu, že porouchaná válcovací stoli-



Obr. 4. Výsledky simulace – průběhy vybraných veličin válcovacího procesu

ce nezpůsobuje žádnou změnu tloušťky materiálu a dovoluje jeho plynulý průchod. V reálném případě vychází řídicí logika mnohem složitější.

Funkce logického podsystému obnovy funkce tratě po poruše byla ověřována umělým zavedením poruchy do modelu válcovací tratě v prostředí Simulink. Odezvy modelu tratě na poruchu (výpadek) nejprve jedné a poté i druhé válcovací stolice jsou ukázány na obr. 6. Při výpadku první válcovací stolice (porucha 1) diagnostický podsystém vyhodnotil, že zbývající dvě mohou závadu kompenzovat, a byly stanoveny nové požadované hodnoty změny tloušťky

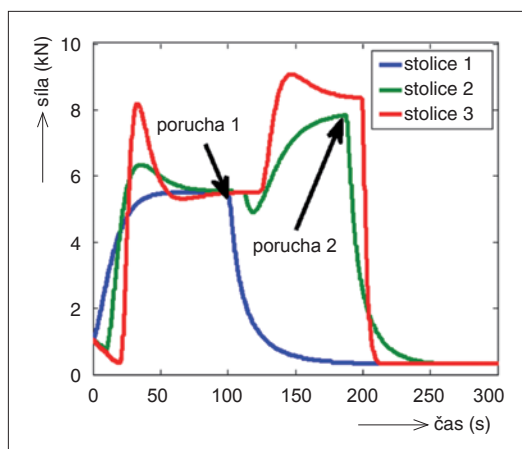


Obr. 5. Diagnostický systém vytvořený v nástroji Stateflow (zjednodušená verze)

materiálu v každé ze stolic. Následující výpadek druhé stolic (porucha 2) již trať nedokáže kompenzovat, protože samotná jedna válcovací stolic nedokáže polotovar přetvořit v celé požadované míře. Nastává tedy fáze bezpečného odstavení tratě z provozu.

### Realizace při použití PLC

Řídicí program navržený při použití nástrojů Simulink a Stateflow byl pomocí nástroje Simulink PLC Coder automaticky převeden do podoby strukturovaného textu podle normy IEC 61131. V této podobě tvaru může být importován do integrovaného vývojového prostředí (Integrated Development Environment – IDE)



Obr. 6. Průběhy přítláčných sil při reakci modelu válcovací tratě na výpadky stolic (kompenzace poruchy/odstavení tratě)

pro programování konkrétního PLC. Generovaný text obsahuje mnoho komentářů, díky nimž lze snadno najít části modelu příslušné konkrétním řádkům.

Automatické generování kódu eliminuje chyby, které mohou vzniknout při jeho ručním přepisu do vhodné podoby. Zaručuje také, že výsledný strukturovaný text zavedený do PLC produkuje numerické výsledky těsně korespondující s výsledky získanými při simulacích. Nástroj Simulink PLC Coder také vytváří doplňkové testovací soubory, které umožňují porovnat výsledky získané pomocí strukturovaného textu spuštěného v IDE s originálními výsledky ze simulací.

### Závěr

Metoda Model-Based Design nabízí přímočarý vývoj systémů od modelování fyzických komponent, přes návrh řídicích algoritmů až po automatické zavedení algoritmů do cílové výpočetní platformy. Již popsaný postup při návrhu systému řízení je možné dále rozšířit o komplexní verifikaci realizovaných systémů při použití simulace HIL. Model fyzické soustavy vytvořený v prostředí Simulink se přeloží do zdrojového kódu v jazyce C, který se zavede do vhodného simulátoru s vlastnostmi reálného času. K simulátoru se připojí řídicí jednotka (PLC) se zavedenými algoritmy a simulací v reálném čase se ověří jejich chování v mnoha nejrizičnějších provozních situacích, včetně reakcí na poruchy, které by na reálné soustavě nebylo možné vyvolat, ať už z finančních či bezpečnostních důvodů.

Ing. Jaroslav Jirkovský,  
Humusoft s. r. o.

krátké zprávy

### ► O bezpečnosti v automatizaci s B&R

Za účelem usnadnit odborníkům ze severočeského regionu přístup k informacím o současných trendech v oboru funkční bezpečnosti strojů a strojních zařízení uspořádala společnost B+R automatizace, spol. s r. o., v Liberci ve dnech 11. a 12. října 2011 setkání s názvem *Bezpečnost v automatizaci 2011*. Vyslechnout si odborné přednášky a zhlédnout výstavku produktů

značky B&R přišlo celkem 37 odborných návštěvníků z osmnácti firem (finálních výrobců – OEM, systémových integrátorů, koncových zákazníků), dvou vysokých škol a dvou časopisů.

Zájem se soustředil především na první den setkání jako jediný, kdy byla vedle přednášek zástupců B&R na programu také přednáška Ing. Zdeňka Buchty, ZAT, a. s., s názvem *Funkční bezpečnost v procesní automatizaci*. V přednáškách zástupců B&R s názvy *Integrovaná bezpečnostní technika*

a *Safe Motion a Safe Robotics*, které byly shodně předneseny v oba dny, byl představen mj. protokol OpenSafety, což je první otevřený bezpečnostní protokol pro systémy průmyslového Ethernetu. Návštěvníci beze zbytku využili i velký prostor, který byl v programu setkání vyhrazen diskusím a konzultacím přímo nad vystavenými produkty. Odcházelí spokojeni, obohaceni o nové poznatky i podpůrné materiály, včetně přednesených prezentací na klíčenice USB. (sk)