

Řízení dopravního systému výrobní linky

Vypracovali: Roman Čapek, Zdeněk Kopřiva, Zdeněk Hanzálek

Úvod

Plnicí linka je soustava propojených zařízení, které plní nějaký přípravek do lahví, ve kterých je dostává spotřebitel. Linka je tvořena stroji, které postupně vykonávají samotné plnění lahví, a dopravníky, které zajišťují přesun lahví mezi jednotlivými stroji a zároveň fungují jako akumulární systémy pro vyrovnávání neplánovaných stopů některých zařízení. Pro zajištění co nejvyšší průchodnosti celé linky je k řízení strojů a dopravníků využito PLC zařízení, která vyhodnocují poruchy a upravují chod linky, tedy rychlosti jednotlivých stojů a dopravníků. Jednotlivá zařízení na sebe mohou v rámci linky libovolně navazovat, tvoří však vždy jednoduchý řetěz s jedním vstupním a jedním výstupním zařízením. Celou linku ovládá operátor z kontrolní místnosti a kontrolní systém, který zaznamenává rychlost průchodu lahví a poruchovost.

Použité termíny a parametry

- **Upstream zařízení** - je zařízení, které se nachází proti proudu linky (proti směru chodu lahví), tedy takové, který je na výrobní lince dříve.
- **Downstream zařízení** - opak upstream zařízení, tedy takové, které se nachází po proudu linky.
- **Stroj** - zařízení, které vykonává určitou výrobní činnost.
- **Dopravník** - zařízení zajišťující přesun lahví mezi dvěma po sobě jdoucími stroji. Jeho délka je udána v metrech.
- **Mean time between failure (MTBF)** - střední doba mezi poruchami, udávaná v minutách. Je měřena pouze v době, kdy je dané zařízení skutečně v provozu; doba výpadku či zastavení na základě chyby celé linky není do MTBF zahrnuta. MTBF udává střední dobu mezi poruchami, které jsou skutečně vyvolány daným zařízením, ne takové, které vznikly na základě propagace chyby v jiném místě linky.
- **Mean time to repair (MTTR)** - střední doba opravy, udávaná v minutách.
- **Kadence stroje** - rychlost, s jakou stroj vykonává svou činnost, udávaná buď v lahvích za minutu [bpm], nebo v bednách za minutu [cpm].
- **Rychlost dopravníku** - určuje rychlost, s jakou se pohybuje dopravník v metrech za minutu [m/min].

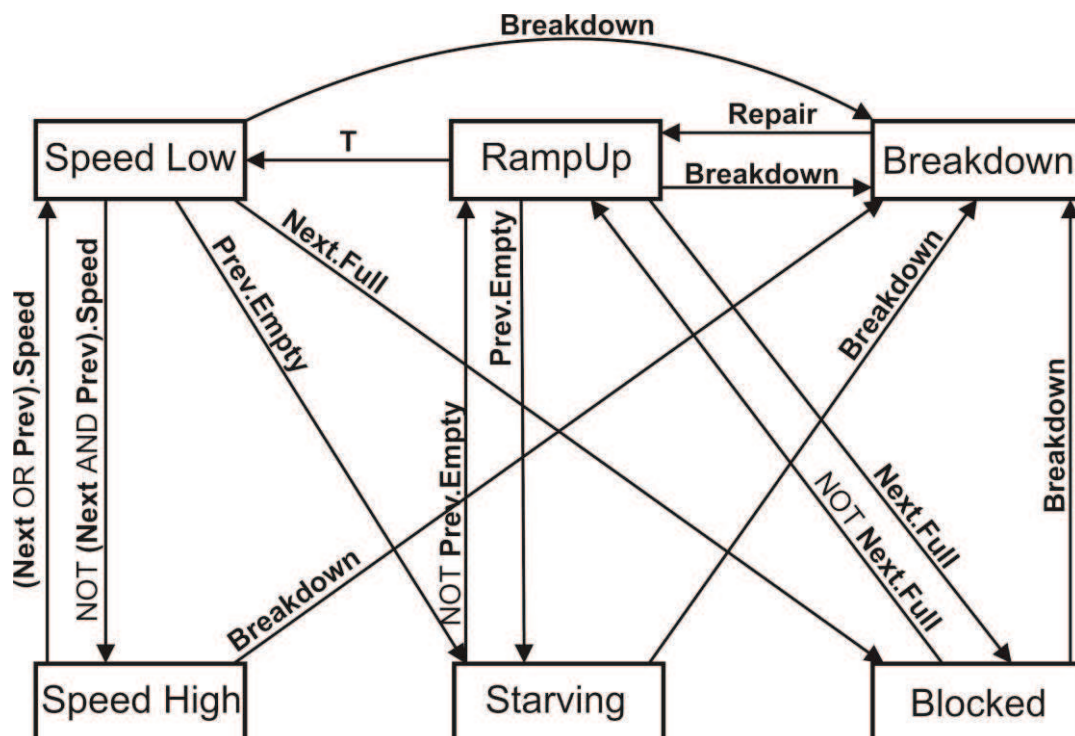
Jednotlivé části linky

Stroje

Celá linka se skládá z mnoha strojů, z nichž každý vykonává nějakou výrobní činnost spjatou s výrobou přípravků a jejich plněním do lahví. Jednotlivá zařízení jsou za sebou v tomto pořadí: řadič lahví (unscrambler), plnička (filler), etiketovačka (labeler), potisk lahví (LINX), balička (case packer), lepička + vážení krabic (case closer + weigher) a paletovačka (palleter).

V rámci výrobní linky se jednotlivé stroje mohou nacházet v jednom z následujících stavů:

- **Manual** - stav, ve kterém je chod stroje řízen ručně.
- **Speed Low** - v tomto stavu je stroj také řízen svým PLC automatem a pracuje s definovanou kadencí.
- **Speed High** - v tomto stavu je stroj také řízen svým PLC automatem, kadence je oproti stavu Speed Low vyšší. Důvodem je buď potřeba rychlejšího odběru lahví z dopravníku, nebo rychlejšímu doplnění lahví na downstream dopravník.
- **Starving** - v tomto stavu je kadence stroje nulová, jelikož nemá dostatek vstupního materiálu.
- **Blocked** - v tomto stavu je kadence stroje také nulová, důvodem je, že downstream zařízení není schopno přijímat další lahve.
- **Breakdown** - zařízení má poruchu, kadence je nulová a je třeba poruchu odstranit.



Obrázek 1 - Stavový automat stroje

Poruchy

Poruchy, které se v systému vyskytují, jsou rozděleny podle příčiny a trvání do tří základních kategorií:

- **Neplánovaná porucha (stop)** - MTBF menší než 10min, MTTR 90-120s. Typickým příkladem je vzpříčená/zaseknutá lahev. Tyto chyby by měly být pokryty akumulací schopností dopravníků a na propustnost celé linky by tak měly mít minimální vliv.
- **Procesní selhání** - MTBF nejčastěji 10-30min, MTTR v rámci jednotek minut. Tento typ chyby vzniká například z důvodu nedostatku materiálu k výrobě (zátky, produkt).
- **Výpadek (breakdown)** - MTBF delší než 30 min. Tyto chyby jsou zapříčiněny například poruchou samotného stroje a jejich odstranění vyžaduje náročnější zásah.

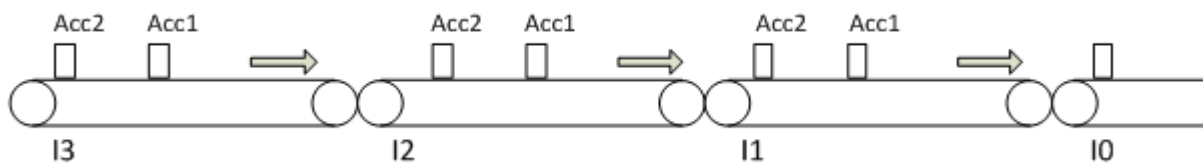
Kromě hodnoty MTBF, což je střední hodnota doby poruch pro konkrétní zařízení, je potřeba ještě druhý parametr a to standardní odchylka (rozptyl) poruch. V případě poruch je rozptyl spíše malý, křivka rozložení poruch je tedy spíše úzká. Naopak pro opravy je rozložení časů okolo střední hodnoty MTTR více roztažené. MTTR pro neplánované poruchy je zhruba 2 minuty, Ovšem dle typu závady může být aktuální doba opravy výjimečně až 10 minut.

Dopravníky

Dopravník je zařízení, které přepravuje lahve mezi jednotlivými stroji. Mezi každými dvěma stroji může být libovolný počet dopravníků, záleží na vzdálenosti. Každý z dopravníků má dva senzory (fotonky), zaznamenávající plnost dopravníku. Jeden se nachází na začátku a druhý na konci (pro přehled si je označíme Acc1 a Acc2 – viz Obrázek 2.

Senzor Acc1 slouží k detekci situace, kdy downstream zařízení neodebírá lahve dle předpokladu (porucha, propagace poruchy). V tom případě je snížena rychlost dopravníku tak, aby nedošlo k nárůstu tlaku lahví na vstupu downstream zařízení. Rychlost je nastavena na takovou hodnotu, při níž je plně využita akumulací schopnost dopravníku, je tedy využito každé místo pro lahev. Po uvolnění senzoru Acc1 se dopravník opět rozjede plnou rychlostí.

Senzor Acc2 detekuje plné dosažení akumulací schopnosti dopravníku. Pokud je z pohledu dopravníku upstream zařízení stroj, dojde v této chvíli k jeho odstavení (přerušení činnosti), jelikož je dopravník lahvemi zcela zaplněn. Stroj je opět uveden do provozu (se sníženou rychlostí) ve chvíli, kdy senzor Acc2 detekuje uvolnění dopravníku.

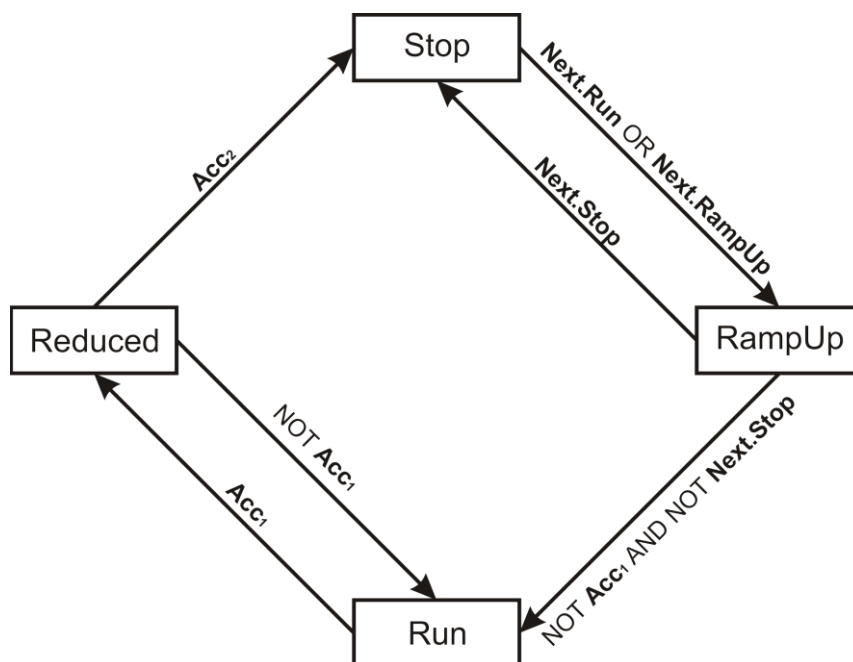


Obrázek 2 - Série za sebou zapojených pásových dopravníků

Pro řízení pásového dopravníku je použit jednoduchý stavový automat obsahující tyto stavy:

- **Stop** - dopravník se nepohybuje.
- **Ramp Up** - dopravník se rozjíždí.
- **Run** - dopravník se pohybuje plnou rychlostí.
- **Reduced** - dopravník se pohybuje redukovanou rychlostí.

Přechody mezi jednotlivými stavy jsou znázorněny na Obrázku 3. Řízení více na sebe navazujících dopravníků je provázané pomocí stavové proměnné Next, která obsahuje aktuální stav dalšího (downstream) zařízení, tedy buď dopravníku, nebo stroje. Pokud je z pohledu dopravníku downstream zařízením stroj, pak je Next.Run potřeba chápat jako (Next.SpeedLow OR Next.SpeedHigh) a podobně Next.Stop odpovídá (Next.Breakdown OR Next.Starving OR Next.Blocked). Proměnné Acc1 a Acc2 jsou výstupy výše popsaných čidel. Ačkoliv je informace o případné poruše stroje v systému rovněž k dispozici, jako vstupní informace pro stavový automat slouží data z čidel Acc1 a Acc2 společně se stavovou proměnnou downstream dopravníku Next.



Obrázek 3 - Stavový automat dopravníku

Akumulační systém

Úkolem dopravníků není pouze přepravovat lahve, ale slouží rovněž jako buffer, neboli zásobník, pro vyrovnávání neplánovaných výpadků zařízení tvořících celou linku. Tím, že se mění rychlost dopravníku, se může měnit i jeho aktuální kapacita, čímž lze zvýšit propustnost linky v případě výpadku některého zařízení následkem poruchy.

Akumulační schopnost linky je dána velikostí mezer mezi lahvemi. Pokud linka jede v ustáleném stavu, pak se mezi dvěma lahvemi vždy nacházejí dvě mezery (mezerou je myšleno místo, kam by se vešla právě jedna láhev). Tudíž můžeme říci, že akumulaci schopnost dopravníku je $2/3$ - jedna třetina je zaplněna standardním provozem, zbylé dvě třetiny jsou připraveny k akumulaci lahví. Dobu, po kterou je dopravník schopen akumulovat lahve, lze spočítat následujícím způsobem: $t = 2/3 * d/l * 1/v$, kde t je akumulaci schopnost dopravníku v minutách, d je délka dopravníku v metrech, l je průměr jedné lahve v metrech a v je kadence upstream zařízení v lahvích za minutu.

Ve chvíli, kdy downstream zařízení z libovolného důvodu nedokáže odebírat lahve s požadovanou rychlostí, je snížena rychlost dopravníku, a tudíž se nevytvářejí mezery mezi lahvemi. Po obnovení funkce downstream zařízení je dopravník nastavena rychlost na standardní a po určitém čase dojde k návratu do ustáleného stavu, tedy 66% akumulaci schopnosti.

Implementace řídicího algoritmu

Následující kapitola popisuje implementaci výše uvedeného stavového automatu pro programovatelný logický automat (PLC). Konkrétně pro automat ControlLogix firmy Rockwell Automation, nicméně návrh implementace byl proveden tak, aby byl na stejném principu s minimem změn přenositelný také na automaty typu SLC.

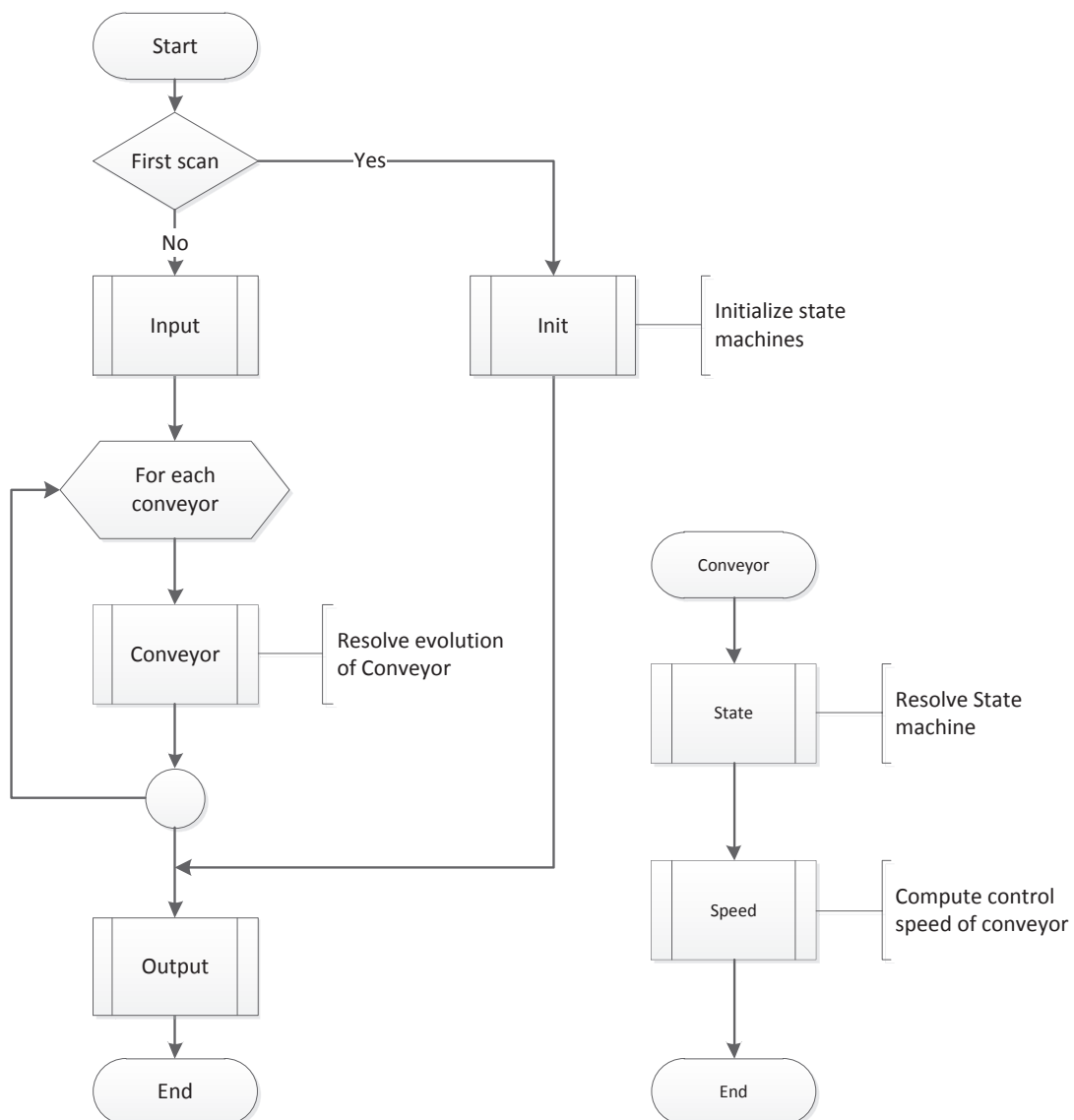
Algoritmus řízení, vzhledem k možnosti řídit každý pásový dopravník samostatně, je koncipován tak, aby nebyl závislý na počtu těchto dopravníků. Počet řízených pásových dopravníků tedy není omezen a ve finální implementaci ovlivňuje pouze počet použitých stavových proměnných a jejich inicializaci a následné uložení výstupů. Pro každý pásový dopravník je nutno použít jednu stavovou proměnnou obsahující všechny informace o stavu.

Stavová proměnná dopravníku obsahuje následující položky:

- **State** – uživatelská proměnná obsahující stav stavového automatu.
- **Acc1, Acc2** – zpracovaný signál z čidla Acc1 (resp. Acc2).
- **T** – časovač pro měření času stráveného ve stavu Reduced.
- **Speed** – uživatelská proměnná s konfigurací rychlostí dopravníku.

Položky stavové proměnné Speed.Nominal, Speed.Stop, Speed.Ramp_Up, Speed.Run, Speed.Reduced a T.Pre je nutné nastavit před downloadem do automatu na výchozí hodnoty na záložce monitor. Tyto hodnoty je také možné potencionálně modifikovat ze SCADA systémů a to i za chodu aplikace.

Celý algoritmus je uložen jako oddělený program. V rámci tohoto programu musí být lokálně deklarovány stavové proměnné pro všechny dopravníky (např. I0, I1, I2, I3, ...). Dále je nutné deklarovat dvě proměnné pro aktuálně zpracovávaný dopravník a dopravník následující (např. Actual a Next). Vývojový diagram programu je uveden na Obrázku 4. Po zapnutí, v rámci prvního scanu, je provedena inicializace stavových proměnných všech dopravníků do stavu Stop. V následujících scan cyklech se nejprve zkopírují vstupy (zpracované signály ze senzorů Acc1 a Acc2) do příslušných stavových proměnných. Poté se periodicky obslouží pásové dopravníky a nakonec se aktualizují vypočtené rychlosti dopravníků.



Obrázek 4 - Vývojový diagram řízení dopravního systému

Subrutina „Conveyor“, určená pro obsluhu pásového dopravníku, se skládá ze dvou částí. První část (subrutina „State“) řeší změnu v rámci stavového automatu. Tato část algoritmu zajišťuje řízení podle výše popsaného stavového automatu. Přechody mezi jednotlivými stavy jsou implementovány tak, že v rámci jednoho scan cyklu je možné přejít pouze do jednoho následujícího stavu. Tímto řešením se vyhneme všem potencionálním problémům s neošetřením stavů. Druhá část zajišťuje výpočet výsledné rychlosti dopravníku. Výsledná rychlost dopravníku závisí na stavu, ve kterém se nachází stavový automat. Každému stavu je v proměnné Speed přiřazena odpovídající rychlost v procentech rychlosti nominální (proměnná Speed.Nominal).