

SIMULAČNÍ STUDIE VHODNÉHO ROZMÍSTĚNÍ OPERÁTORŮ LINKY PRO VÝROBU ELEKTRONICKÝCH ŘÍDÍCÍCH JEDNOTEK AUTOMOBILOVÝCH MOTORŮ

Bronislav Chramcov, Petr Beran
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ABSTRAKT

Príspevek se zabývá problematikou využití počítačové simulace při návrhu výrobní linky výrobního procesu. V našem případě jsou možnosti využití demonstrovány na konkrétním příkladu z průmyslové praxe. Cílem bylo sestavit model současného návrhu výrobní linky výrobního procesu elektronických řídicích jednotek automobilových motorů a navrhnout vhodné rozmístění operátorů v prostoru výrobní linky. Pro modelování a následnou simulaci bylo použito simulačního prostředí Witness. Na základě předem definovaných požadavků provozovatele, byla navržena řada simulačních experimentů, které odhalují úzká místa výrobní linky, popřípadě zlepšují celkovou propustnost výrobní linky. Při těchto experimentech je sledováno vytížení jednotlivých operátorů a celková produkce výrobní linky. Výsledky odhalily produkční možnosti současného návrhu výrobní linky procesu výroby elektronických řídicích jednotek automobilových motorů společnosti Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o.

1 ÚVOD

Prediktivní technologie a simulační metody přitahují stále více pozornosti odborníků z mnoha oblastí. Počítačová simulace je nezbytnou součástí každého většího výrobního procesu a stává se také podpůrným nástrojem v oblasti zefektivňování provozu výrobních systémů. Stále rychleji rostoucí vývoj nových technologií a výrobních postupů klade vyšší nároky na předimplementační fázi zavádění těchto aspektů do reálných podmínek. Rovněž rostoucí tlaky konkurenčního prostředí mají značný podíl na přísnějším sledování výrobních nákladů, jejich cílenému snižování a vyžaduje tak od výrobních společností neustálé změny. V komplexním prostředí výrobních systémů lze jen stěží dosáhnout efektivního provozu pouze sledováním a vyhodnocením dílčích parametrů či úseků výroby. Jejich vzájemná provázanost bývá natolik komplexní, že je potřeba na výrobní systém pohlížet globálně a hledat tak způsoby jeho optimalizace jako celku. To si vyžaduje nasazení takových metod a nástrojů, které umožní komplexní přístup k výrobním celkům už ve fázi jejich návrhu a umožní odzkoušet sérii variant různých řešení ještě před reálným nasazením výrobního systému nebo implementaci zamýšlené změny. To významným způsobem přispívá k minimalizaci rizika nesprávných rozhodnutí. Díky počítačové simulaci reálného prostředí je možné rizika spojená se změnami v procesech nebo jejich zavádění omezit na nejnižší možnou úroveň. S její pomocí je možno provést simulaci reálného prostředí a vysledovat tak vliv provedených změn a reakcí modelu procesu v předem definované škále parametrů ještě před provedením zamýšlené změny přímo v reálném procesu. Cílem tohoto článku je nastínit možnosti simulačního prostředí Witness při ověření funkčnosti návrhu výrobní linky společnosti Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o. a zároveň využít tohoto simulačního nástroje pro návrh různých variant prostorového umístění operátorů ve výrobní lince. Sledovanými veličinami jsou vytížení jednotlivých operátorů a vliv změny na propustnost výrobní linky.

2 POPIS VÝROBNÍ LINKY A DÍLČÍCH OPERACÍ

Pro jednoho ze svých zákazníků připravuje společnost Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o., která má zázemí divize alokováno ve Frenštátě pod Radhoštěm, náběh nové výrobní linky, která bude realizovat sériovou výrobu elektronické řídicí jednotky vstřikování paliva pro vznětový motor.

V době provádění simulační studie byla nová výrobní linka ve stádiu počátečního návrhu schématu. Návrh obsahoval popis dílčích operací, návrh jednotlivých strojů podílejících se na výrobě, jejich prostorové uspořádání a předběžný odhad jak strojového, tak operátorského času pro každou dílčí operaci. Stroje použité ve výrobní lince jsou unikátní, vyráběny a dodány společnosti na zakázku. Dále došlo ke zkušebnímu spuštění linky pro získání představ o propustnosti jednotlivých strojů a potřeby operátorského času. Plný náběh linky byl realizován až po dokončení této studie. To znemožnilo ověření vstupních dat použitých pro

sestavení základního simulačního modelu v této studii, v další části tedy bylo uvažováno s nejlepším možným dostupným odhadem a vstupy, které byly získány experimentálním měřením.

Schéma návrhu linky je v kruhovém resp. elipsoidním uspořádání. Na stejném místě, na kterém výrobek do procesu vstupuje, jej po dokončení výrobního cyklu také opouští. Výrobní linka představuje určitý komplexní celek logického uspořádání jednotlivých pracovních strojů, na kterých probíhá kompletace finálního výrobku. Jednotlivé pracovní operace na sebe logicky navazují a výrobek postupuje po dokončení jedné operace k dalšímu pracovišti, kde je dohotovena další dílčí část procesu. Tento postup tak vytváří určitý logický tok výrobku v kruhovém uspořádání mezi jednotlivými stroji výrobní linky, které obsluhují operátoři výroby. Jednotliví operátoři pracují jen v určitém prostoru výrobní linky (obsluhují jen určitý počet strojů).

2.1 Struktura výrobní linky

Výrobní linka představuje komplexní celek složený z 15 výrobních strojů, 5 dopravníků, 2 přepravních vozíků pro přepravu výrobku v určitém stavu dokončení mezi dvěma operátorskými stanovišti a 2 samostatná pracoviště operátorů bez strojního vybavení. Neodmyslitelnou součástí linky je její obsluha – výrobní operátoři, reprezentována lidskými zdroji stejně tak jako technická údržba linky. Schéma návrhu výrobní linky je zobrazeno na obrázku č. 1. Zde jsou zvýrazněny červeně tři stroje, se kterými se do budoucna počítá jako s možností rozšíření výrobní linky pro adaptaci kompletace drobně modifikovaného výrobku. Při dalším vytváření modelu jsou tyto zanedbány, je však nutné je do počátečního schématu zahrnout, protože svým umístěním na pracovišti výrobní linky určitým způsobem ovlivňují tok výrobního procesu výrobku, jehož kompletace na výrobní lince je předmětem této simulační studie. Podrobný popis jednotlivých strojů osazených ve výrobní lince a s nimi spojených výrobních operací lze najít v práci [Beran, 2009].

2.2 Role operátora

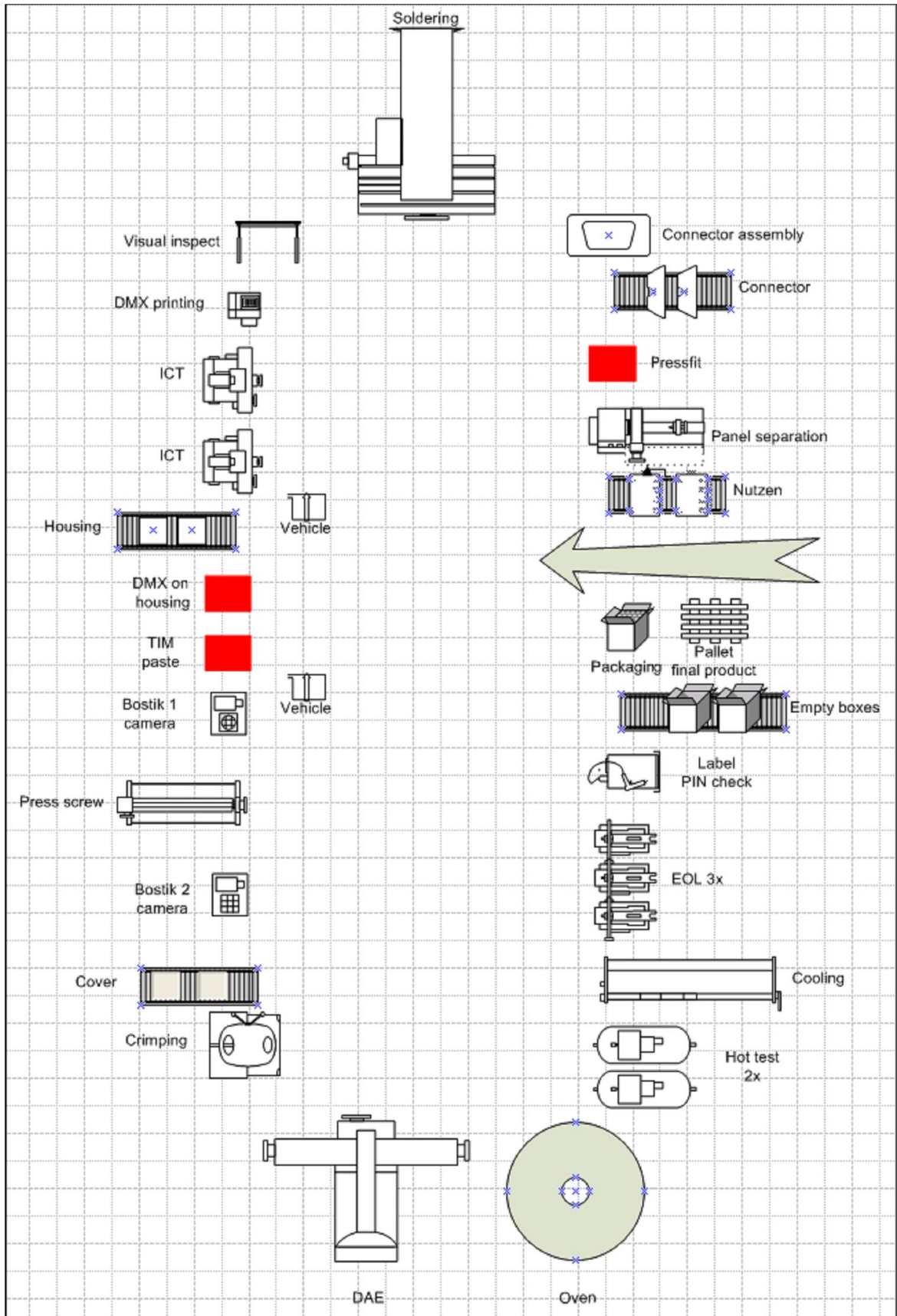
Všechny výrobní stroje (kromě M01-Panel Separation) mají vstupní pozici, na kterou se založí rozpracovaný polotovar doplněný případně dalším výrobkem jako další potřebný vstup, a operátor zahájí výrobní operaci. Současně má již na výstupní pozici připraven polotovar s dokončenou operací z předchozího cyklu. Nečeká tudíž na dokončení výrobní operace strojem, ale jako operátor výrobní linky zastává v podstatě funkci neustálého doplňování vstupů strojů, odebírání výstupů a jejich přepravu na další operátorské stanoviště.

2.3 Nastavení strojového a operačního času na jednotlivých pracovištích

Linka a její obsazení operátory je navržena tak, aby svým taktem 45 vteřin v nepřetržitém provozu produkovala množství nasmlouvané s odběratelem. Pokusným měřením při náběhu linky byly zjištěny strojové / operátorské časy potřebné pro jednotlivé operace, které uvádí Tabulka 1.

Tabulka 1: Strojový a operátorský čas pro jednotlivé operace

Operace	Strojový čas (s/ks)	Čas operátora(s/ks)	Operace	Strojový čas (s/ks)	Čas operátora(s/ks)
Panel separation	0	4,62	Crimping	17,7	4,92
Connector assembly	19,14	10,92	DAE	20,22	7,32
Soldering, brush	24	7,14	oven	23,76	3,72
Visual inspection	0	11,76	Hot test	45	6,12
Label DMX on connector	24	3,66	Cooling	60	2
ICT	46	9,6	EOL	77,4	3,72
Bostic 1 camera	19,38	17,16	Label, pin check	21,72	3,66
Press, screw	24	4,92	Packaging	0	10,5
Bostic 2 camera	20,52	7,38			



Obrázek 1: Schéma výrobní linky

3 KONSTRUKCE MODELU V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ WITNESS

Všechny stroje ve výrobní lince fungují na podobném principu. Operátor přistoupí k výrobnímu stroji, založí rozpracovaný výrobek na vstupní pozici, provede případně nezbytné úkony spojené s jednotlivou operací a dá povel stroji k zahájení operace. Stroj započne proces výrobní operace, operátor mezitím odebírá výrobek z výstupní pozice, který je zde již připravený (výrobní operace byla dokončena v předchozím taktu stroje) a přenáší jej na následující výrobní stroj pro pokračování procesu výroby, kde se na dalším výrobním stroji linky popsaný postup opakuje. Každý výrobní stroj v lince tedy disponuje vstupní a výstupní pozicí, na kterou operátor rozpracovaný výrobek zakládá, resp. ze které se výrobek po dokončení dílčí operace odebírá.

Akce odebrání rozpracovaného výrobku nenásleduje okamžitě po dokončení strojové operace – rozpracovaný výrobek setrvá ve výstupní pozici po určitou dobu, než jej operátor odebere a posune ve výrobním procesu dále. Tento jev je v modelu linky modelován pomocí zásobníku – bufferu, do kterého každý výrobní stroj rozpracovaný výrobek po dokončení výrobní operace umístí.

Přesun výrobku mezi jednotlivými operátorskými pozicemi je zajištěn operátorem, který zakládá výrobek na vstupní pozici příslušného stroje. Čas potřebný k přesunu výrobku mezi jednotlivými operátorskými pozicemi je zahrnut v čase operátora – samotný přesun výrobku mezi jednotlivými pozicemi není tedy v modelu dalším způsobem modelován.

Časovou jednotkou modelu byly zvoleny vteřiny v souladu s poskytnutými vstupy. Doba simulace byla zvolena na dva pracovní dny (třisměnný nepřetržitý provoz).

Pro dosažení nezkreslených výstupů a korektních, porovnatelných výsledků je potřeba oddělit iniciační část rozběhu linky až po dobu jejího naplnění a plného náběhu. Za tímto účelem je modelována veličina Warmup a byla zvolena s dostatečným časovým odstupem po naplnění linky, a sice s dobou jednoho pracovního dne (86400 vteřin). Po uběhnutí tohoto času dojde také k inicializaci pomocných proměnných.

3.1 Operátorský a strojový čas

V modelu je potřeba u jednotlivých strojů rozlišit čas operátora potřebný pro přesun výrobku mezi jednotlivými pozicemi, uchycení výrobku na vstupní pozici, dokončení jiných operací např. přiložení jiných polotovarů jako vstupů pro dílčí výrobní operaci, odebrání výrobku z výstupní pozice. Souhrn jednotlivých časů potřebných pro tyto dílčí operace představuje čas operátora a v modelu linky je modelován jako čas seřízení stroje (Setup Time). Strojový čas představuje již samotnou dobu stroje potřebnou pro dokončení výrobní operace prováděnou strojem a u každého stroje je modelována pomocí Cycle time.

Pro operátorský čas je do modelu zanesen prvek náhodnosti podle Gaussova rozdělení s 20 % rozptylem času operátora.

3.2 Modelování jednotlivých strojů

Jednotlivá pracoviště výrobní linky jsou modelována individuálně většinou elementem *Machine* typu *Single*. Dále bylo použito elementu *Buffer*, *Vehicle* resp. *Tracks*. V modelu je použitý také element typu *Carousel*. Tento element modeluje strojový čas pracoviště - Oven, kde se provádí test odolnosti zvýšené teploty. Za tímto účelem je řídicí jednotka na 45 min zahřátá na teplotu 90° C, což simuluje extrémní podmínky v zamýšleném osazení výrobku v prostoru motoru osobního automobilu.

3.3 Postup operátora ve výrobě

Simulační nástroj Witness standardně volá operátora v závislosti na dokončení výrobní operace stroje systémem FIFO podle pořadí dokončení výrobní operace jednotlivých strojů. Modelovaná výrobní linka však předpokládá předem daný postup operátora od jednoho stroje k dalšímu. Namodelování tohoto chování lze docílit s využitím funkce *AttachLabor* (*ELEMENT*, *Operator*), která umožní určit další stroj pro postup operátora jeho definicí v parametru funkce. Po dosažení posledního stroje v cyklu operátora se operátor opět uvolní pomocí funkce *DetachLabor* (*ELEMENT*, *ALL*) a je tak k dispozici stroji, který si jej následně zavolá (obvykle první stroj v cyklu). Tato funkcionality není použitelná univerzálně a pro použití v modelu výrobní linky musí být dále rozšířena.

3.3.1 Počet operátorů ve stejném prostoru

Simulační model počítá s využitím více operátorů v rámci jednoho prostoru výrobní linky. Pro zachování principu postupu operátora ve výrobě od jednoho stroje k dalšímu je nutné tuto funkcionalitu rozšířit pomocí řídicí proměnné typu *Name*, která poslouží k uchování názvu operátora právě pracujícího na určitém stroji a využije jej při volání funkce *AttachLabor* po dokončení seřízení stroje. V našem případě se jedná o proměnnou *jmeno*, která je definována jako pole. (*Quantity*>1). Přesná definice a využití je vidět z níže uvedeného příkladu zdrojového kódu.

Zdrojový kód 1: Actions on Start setup u stroje M02-Connector Assembly

```
jmenol (2) = GetAttachedLabor (ELEMENT,1)
```

Zdrojový kód 2: Actions on Finish setup u stroje M02 Connector Assembly

```
IF NPARTS (B2) > 0  
AttachLabor (Soldering(1),jmenol (2))
```

3.3.2 Násobné množství stroje – bez následné funkce AttachLabor

Simulační nástroj Witness nedokáže ošetřit situaci, kdy je operátor zavolán s využitím funkce *AttachLabor* ke stroji v násobném množství (*quantity* > 1). Funkce *AttachLabor* si v tomto případě vynutí použití indexu k určení konkrétního stroje ze skupiny. Protože je postup výrobku v modelu řízen vstupním pravidlem *Pull* ze zásobníku stroje předcházejícího, není tedy na předcházejícím stroji jednoznačně možné určit, který stroj ze skupiny vstupní pravidlo *Pull* provede, pokud jsou například všechny stroje ve stavu *Idle*. Simulační nástroj vstupy řídí spravedlivě a rozdělení provádí stejnou měrou pro všechny stroje ve skupině. Pro určení právě aktivního stroje ze skupiny jsme využili další řídicí proměnnou. Tato je pak využita jako parametr funkce *AttachLabor* po dokončení operace *Setup* u stroje předcházejícího a dojde tak k jednoznačnému přiřazení operátora ke stroji, který následně provede vstupní operaci pomocí pravidla *Pull*. Přesná definice je uvedena níže.

Zdrojový kód 3: Actions on Finish Setup u stroje M04-DMX

```
IF NPARTS (B3) > 0  
    IF ICTControl = 1  
        AttachLabor (ICT(1),jmenol (5))  
    ELSE AttachLabor (ICT(2),jmenol (5))  
    ENDIF  
    IF ICTControl = 1  
        ICTControl = 2  
    ELSE ICTControl = 1  
    ENDIF  
ENDIF
```

3.3.3 Násobné množství stroje – s následnou funkcí AttachLabor

V případě, kdy operátor dokončí operaci na stroji stejného typu ve skupině a postupuje ve výrobě na další stroj je potřeba pro zachování funkcionality *AttachLabor* ošetřit vstupní pravidlo *Pull* následujícího stroje tak, aby bylo realizováno pouze v momentě, kdy operátor dokončí operaci na předcházejícím stanovišti a zároveň má v jednom ze zásobníků připraven na výstupní pozici kus pro další postup ve výrobě. Tato situace nastává například na stroji *Cooling*. Přesná definice vstupního pravidla je naznačena níže.

Při určování dalšího postupu operátora v případě 3 ks strojů stejného typu (stroj M14-EOL) je potřeba vstupní / výstupní podmínky definovat podrobněji.

Zdrojový kód 4: Vstupní pravidlo u stroje M13-Cooling

```
IF ISTATE (HotTest(1)) = 2 AND NPARTS (HotTest(1)) > 1
    PULL from HotTest(1)
ELSE
    IF ISTATE (HotTest(2)) = 2 AND NPARTS (HotTest(2)) > 1
        PULL from HotTest(2)
    ENDIF
ENDIF
```

3.4 Řízení směny vozíků V01, V02

Protože obě strany výrobní linky z pohledu vozíků pracují různým tempem, je potřeba zajistit realizaci převozu výrobků mezi stroji M05-ICT a M06-Bostik1 Camera tak, aby převoz proběhl pouze v okamžiku, kdy je vozík na jedné straně plně naložen a na straně druhé vyprázdněn a případnému zastavení výroby jedné části tak, aby nedocházelo ke hromadění neodvezených výrobků. Správné chování činnosti vozíků V01, V02 je tedy nutno zajistit dodatečně výstupní podmínkou trasy určené pro vyložení vozíků. Při neošetření této situace pak v modelu dochází k pohybu vozíku způsobem, který neodpovídá realitě (částečné vyskladnění vozíku, pohyb vozíku v jiný než žádoucí časový okamžik apod.).

4 SIMULAČNÍ EXPERIMENTY A VÝSLEDKY

Cílem prvně prováděných simulačních experimentů bylo zjistit vytížení jednotlivých operátorů na stávajícím návrhu modelu linky a dále navrhnout další možné scénáře prostorového rozmístění operátorů v prostoru výrobní linky a sledovat přitom jejich vytížení a dopad na celkovou denní produkci / takt linky. Úkolem dalších experimentů bylo navrhnout další možné scénáře prostorového rozmístění operátorů pro zvýšení propustnosti výrobní linky s předpokladem, že prostor výrobní linky může být obsluhován až šesti operátory. Pro dosažení vytyčených cílů je potřeba jednotlivé experimenty korektně vyhodnotit a vyvodit z nich odpovídající závěry. Z tohoto důvodu bylo potřeba stanovit odpovídající cílové funkce pro sledování relevantních parametrů. V realizovaných simulačních experimentech bylo sledováno vytížení jednotlivých operátorů, celková denní produkce výrobní linky, takt linky (prodleva ve vteřinách mezi jednotlivými výrobky opouštějící výrobní linku) a rozdíl mezi maximálním a minimálním zjištěným vytížením jednotlivých operátorů.

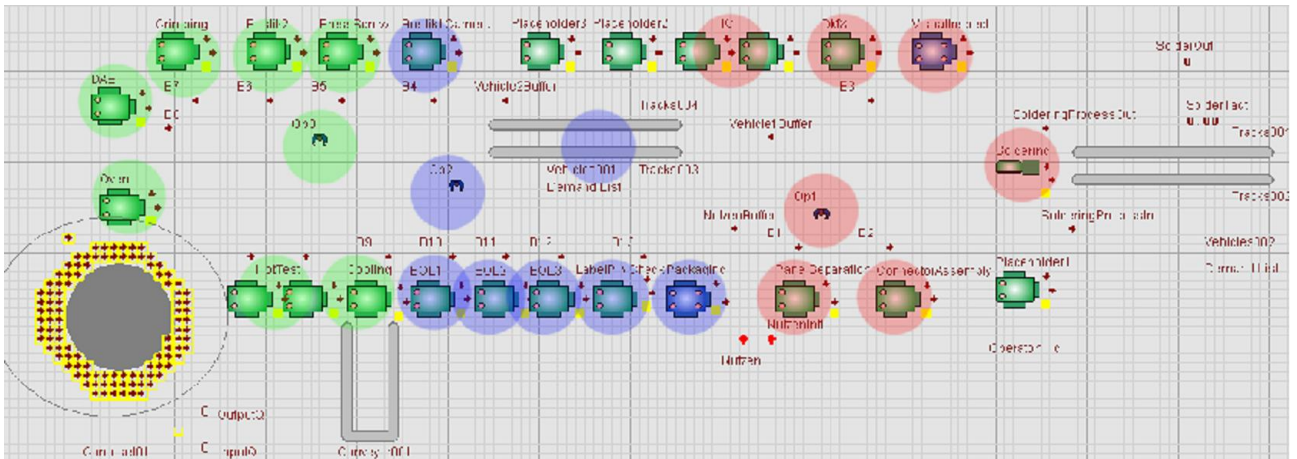
Protože sledovaný systém pracuje v nepřetržitém provozu, je vhodné výstupní data vyhodnotit vždy až po plném náběhu výrobní linky a jejím naplnění výrobky. Pro náběh linky byla zvolena hodnota 86400 vteřin, což odpovídá době jednoho dne a stanovuje tak čas, kdy dojde k anulování sledovaných veličin a proměnných. Tato doba poskytuje dostatečný prostor a rezervu pro náběh linky. Celková doba simulace u všech provedených simulačních experimentů byla 2 dny (1 den náběh linky, 1 den testovací perioda).

Celkově bylo vedle simulace stávajícího stavu provedeno dalších 11 simulačních experimentů s různými výsledky. Některé vybrané simulační experimenty a jejich výsledky jsou popsány v níže uvedených kapitolách.

4.1 Simulace stávajícího návrhu výrobní linky

Protože v době vytváření simulační studie byla linka ve fázi návrhu a počátečního sestavení, nebylo možné navržený model přesně ověřit oproti skutečnosti. Model tedy vychází ze vstupních dat poskytnutých jako nejlepší odhad a z experimentálního provozu spuštění linky. Tento základní model – viz Obrázek 2, je využitý pro následné simulační experimenty. Barevné profily ve vizuálním schématu identifikují pole působnosti jednotlivých operátorů a přiřazení jejich obsluhy ke konkrétnímu stroji. Výsledky simulace stávajícího návrhu výrobní linky jsou přehledně zaznamenány v tabulce Tabulka 2.

Z výsledků simulace návrhu modelu, které uvádí Tabulka 2, je zřejmé, že rozdělení operátorů na pracovišti není zcela vyvážené. 100% vytížení operátora 1 způsobuje nedostatečné zásobení výrobní linky výrobky z první části výrobní linky a může tak částečně způsobit i nevytížení dalších operátorů výrobní linky, kteří čekají na dodání výrobků k dalšímu zpracování.



Obrázek 2: Model stávajícího návrhu výrobní linky

Tabulka 2: Výsledky simulace stávajícího návrhu výrobní linky

Pracovník	Vytížení
Operátor v prostoru 1	100%
Operátor v prostoru 2	78%
Operátor v prostoru 3	81%
Takt linky	44,93 s/ks
Celková denní produkce	1923 ks
Rozdíl vytížení	22%

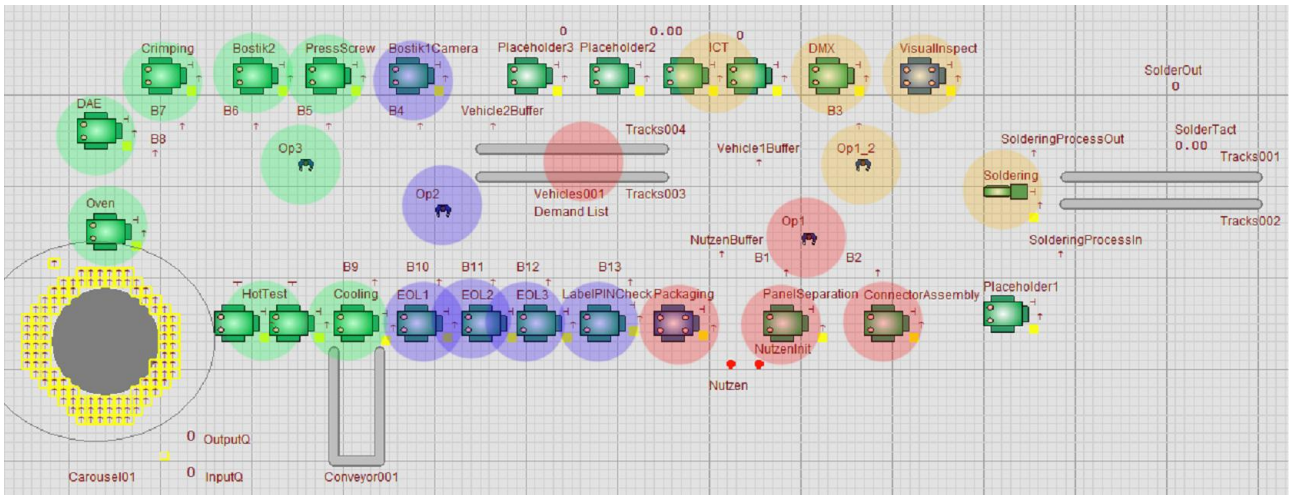
4.2 Simulační experimenty se třemi operátory

Na základě výsledků simulace stávajícího návrhu výrobní linky bylo postupně navrženo několik experimentů se třemi operátory, tak aby došlo k lepšímu rozložení vytížení jednotlivých operátorů. Výsledkem byl pak simulační experiment č.4. Tento experiment zajišťuje, aby operátor s nejnižším vytížením, v našem případě Operátor v prostoru 2, obsluhoval navíc stroj M05 – ICT, čímž by měl zvýšit své vytížení a naopak přispět ke snížení vytížení Operátora v prostoru 1. Dále v tomto experimentu došlo k přiřazení stroje M14-EOL a M15-Label PIN Check k Operátorovi v prostoru 3. Tento zásah by měl přispět k lepší distribuci času vytížení mezi operátory v prostoru 2 a 3. Navrhované změny zachycuje Obrázek 3. Výsledky simulace tohoto experimentu jsou pak přehledně zaznamenány v tabulce Tabulka 3.

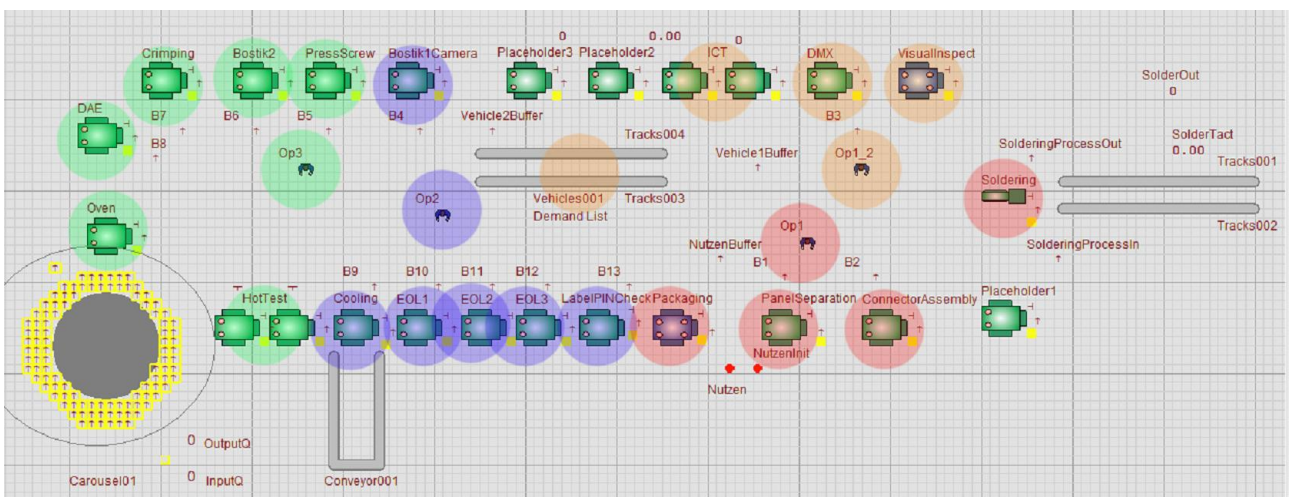
Tabulka 3 ukazuje, že provedené změny vykazují lepší výsledek z pohledu distribuce vytížení jednotlivých operátorů. Nicméně z pohledu propustnosti linky se ukazuje jako nejvhodnější rozmístění operátorů v prostoru výrobní linky tak, jak je má ve svém původním návrhu společnost Continental.

Tabulka 3: Výsledky simulačního experimentu č.4.

Pracovník	Vytížení
Operátor v prostoru 1	78%
Operátor v prostoru 2	79%
Operátor v prostoru 3	91%
Takt linky	47,99 s/ks
Celková denní produkce	1800 ks
Rozdíl vytížení	13%



Obrázek 4: Model simulačního experimentu č.7.



Obrázek 5: Model simulačního experimentu č.9.

5 ZÁVĚR

Série navržených a následně provedených simulačních experimentů s využitím simulačního prostředí Witness odhalila produkční možnosti současného návrhu výrobní linky procesu výroby elektronických řídicích jednotek automobilových motorů společnosti Continental Automotive Systems Czech Republic s.r.o. Provedené simulační experimenty rovněž nastínily další alternativy obsazení výrobní linky operátory, pokud se týká rozšiřování výrobních kapacit a efektivnější rozvržení pracovní náplně mezi jednotlivé operátory. Současně se podařilo určit hraniční kapacitní možnosti výrobní linky v jejím současném návrhu a určit její úzká místa v tomto bodě bránící dalšímu snižování taktu výrobní linky a zvyšování tak její propustnosti.

LITERATURA

- Banks, J. et al. 2005. "Discrete-event system simulation". New Jersey: Prentice Hall, 608 p., ISBN: 0-13-144679-7.
- Beran, P. 2009. Simulační studie návrhu procesu výroby elektronických řídicích jednotek automobilových motorů. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.

KONTAKT

Ing. Bc. Bronislav Chramcov, Ph.D., Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Ústav infomatiky a umělé inteligence, Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín, Česká republika

Tel: ++420 57 6035186, Mobil: ++420 724 646731, Fax: ++420 57 6035279, E-mail: chramcov@fai.utb.cz