

# Simulace zřetězení linky pro obrábění hřídelí

Jiří Hloska, Jiří Štoček

Oddělení Simulace v plánování výroby společnosti Škoda Auto, a. s., řeší ročně desítky simulačních projektů týkajících se výrobních závodů v České republice i v zahraničí. Různorodost simulačních projektů je přitom značná – od rozsáhlých modelů pro ověření funkceschopnosti plánovaných výrobních konceptů až po detailní optimalizační modely určené k podpoře operativního řízení výroby. V článku je popsán simulační model, s jehož použitím byly ověřeny dopady zřetězení technologických pracovišť při výrobě hřídelí automobilových převodovek pomocí dopravníku. Model byl sestaven v simulačním prostředí Plant Simulation jako standardu pro diskrétní simulace v automobilovém průmyslu. Zajímavý je zejména tím, že byl vytvořen s použitím knihovny prvků s názvem VDA Powertrain, vyvinuté pracovní skupinou pro simulaci VDA *Arbeitsgruppe Ablaufsimulation* organizace *Verband der Automobilindustrie* (VDA), a v souladu se směrnici [1]. Dále jsou do modelu začleněny vybrané analytické funkce usnadňující provádění simulačních experimentů. K ověření shody simulačního modelu vytvořeného v prostředí Plant Simulation při použití knihovny prvků VDA Powertrain s modelem využívajícím standardní knihovnu prvků příslušnou tomuto prostředí byla provedena analýza rozptylu (ANOVA) výsledků poskytnutých oběma modely.

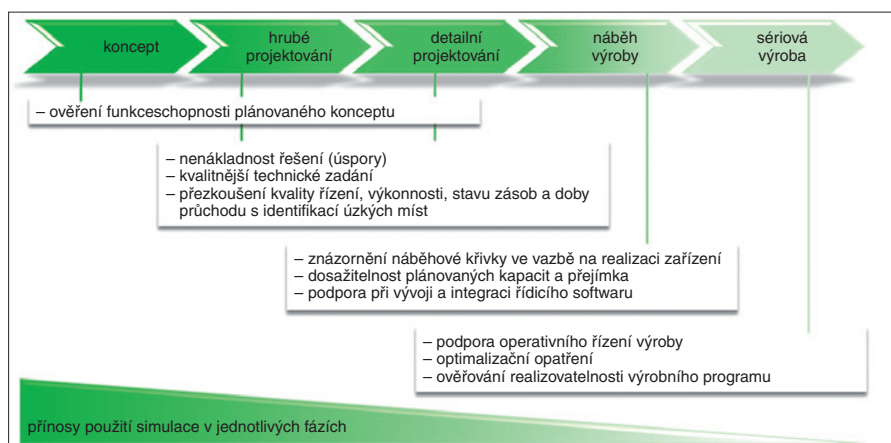
## 1. Úvod

Využití diskrétních simulací v automobilovém průmyslu pro účely ověřování funkčních schopností plánovaných výrobních systémů je v současnosti již běžnou praxí. Simulační nástroje jsou využívány v různých fázích projektů plánování či řízení výroby a s ní spojených procesů (logistika zásobování, určení výrobní sekvence atd.) [2]. Podle toho, zda je modelován a následně simulován plánovaný nebo již existující reálný systém, lze rozlišit simulaci za účelem podpory projektování a simulaci za účelem podpory výroby. V rámci projektování jsou častými otázkami volba výrobní a distribuční strategie, volba vhodného logistického konceptu, dimenzování zásob (materiálu a rozpracované výroby), určení různých výrobních strategií v závislosti na poptávce atd. V případě již probíhající výroby je v důsledku dynamiky vnějšího ekonomického prostředí často třeba vykonávat operativní změny, jako např. úpravy algoritmů řízení (činnosti snímačů a akčních členů) manipulačních zařízení, vizualizace procesů ve 3D atd. (viz [3]). Rozdělení projektů plánování a řízení výroby na jednotlivé fáze s přiřazením typických simulačních úloh je ukázáno na obr. 1.

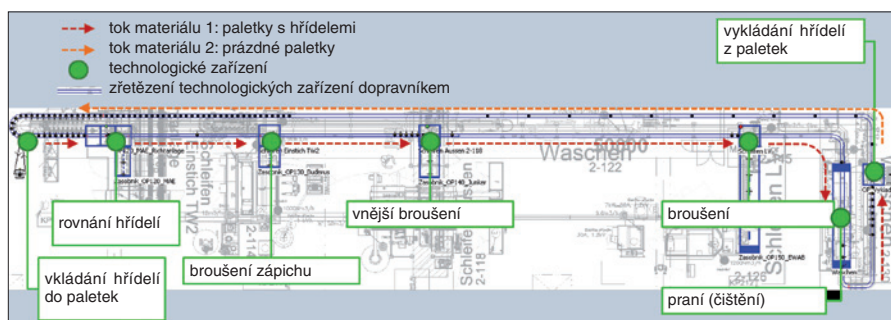
Iniciativa se záměrem standardizovat správu simulačních modelů a sjednotit pravidla provádění simulačních experimentů s těmito modely vznikla právě v automobilovém průmyslu. V Evropě je v tomto ohledu určující činnost pracovní skupiny pro simulaci VDA *Arbeitsgruppe Ablaufsimulation*, která si klade za cíl standardizovat metody, rozhraní a softwarové nástroje pro diskrétní simulace průběhu výrobních procesů. Tato pracovní skupina vznikla v roce 2005 a v současné době sdružuje přední výrobce automobilů

ny prvků pro specifické obory – např. VDA *Logistics* pro simulování logistických konceptů (která mj. umožňuje přebírat data ze softwaru Malaga pro plánování logistických strategií) nebo VDA *Warehouse* pro modelování skladových, popř. transportních procesů se zohledněním rozmístění zdrojů a cílů, plánu cest a řízení toku materiálu [6]. V souvislosti se simulováním chodu výrobních a manipulačních zařízení se velmi často používají knihovny obsahující procesně a délkově orientované prvky [7], takže lze simulovat činnost robotických pracovišť, dopravníků atd.

Simulační model diskutovaný v tomto článku se týkal výrobní linky závodu Škoda Auto ve Vrchlabí, na které v rámci výro-



Obr. 1. Fáze projektů plánování a řízení výroby a typické využití diskrétních simulací [3]



Obr. 2. Schéma zřetězení výrobní linky při použití uzavřené dopravníkové smyčky

a další výrobní firmy, které aktivně v rámci svých oddělení využívají nástroje pro diskrétní simulaci [4]. Jednou z důležitých směrnic upravujících simulace materiálového toku, logistických a výrobních systémů je tzv. VDI-Richtlinie 3633 [5].

Uvedená pracovní skupina VDA pro simulaci vyvíjí knihovny prvků pro softwarové nástroje usnadňující tvorbu simulačních modelů. V průběhu let vznikly samostatné knihov-

ny převodových ústrojí probíhá část výroby hřídelí do převodovek. Z pohledu fázování projektů plánování a řízení výroby podle obr. 1 zpočátku šlo o ověření funkceschopnosti uvažovaného nového konceptu linky a výstupů hrubého projektování. Nicméně dále, ve fázi náběhu výroby, bylo třeba ověřit také různé varianty řízení výroby a usku-tečnit několik dalších souvisejících simulačních experimentů.

## 2. Knihovna VDA Powertrain a simulační model

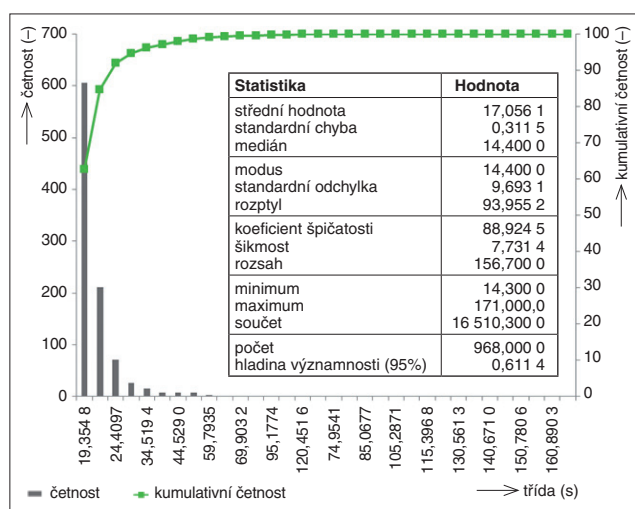
K rozhodnutí realizovat simulační model výrobní linky při použití knihovny prvků VDA Powertrain přivedla autory složitost problematiky plynoucí z nutnosti zohlednit mnoho různých faktorů, uvedených v dalším textu. Jde o speciální knihovnu prvků pro simulační software Plant Simulation, primárně určenou k použití při simulaci procesů v závodech na výrobu motorů a podobných provezech, kde jsou montovány dílčí mechanické sestavy.

- stochasticky či deterministicky (např. periodicky) se vyskytující přerušení výroby, např. v důsledku výměny nástroje či jiné události,
- několikanásobný průchod dílů určitými pracovišti a směřování toku materiálu k dalšímu pracovišti na základě výstupů z předchozí operace.

Knihovna VDA Powertrain navíc umožňuje centralizovat jinak náročnou parametrizaci simulačního modelu a obsahuje již automatické rutiny pro správu a statistické zpracování sledovaných výstupních údajů. Další její předností je možnost zahrnout do simulace manuální činnosti vykonávané personálem včetně zohlednění kompetencí pracovních skupin, kvalifikace atd., a to zvláště pro jednotlivé provozní směny.

Protože obráběcí centra jsou navíc schopna uchovávat zásobu rozpracované výroby (*work in progress*), je obrobena hřídel unášena od pracoviště na paletce, která dodala do zásobníku stroje poslední neobrobený kus. Simulační analýza byla zadána za účelem ověřit funkceschopnost uvedeného konceptu ve vztahu k dennímu objemu výroby s přihlédnutím k vybraným doplňujícím faktorům.

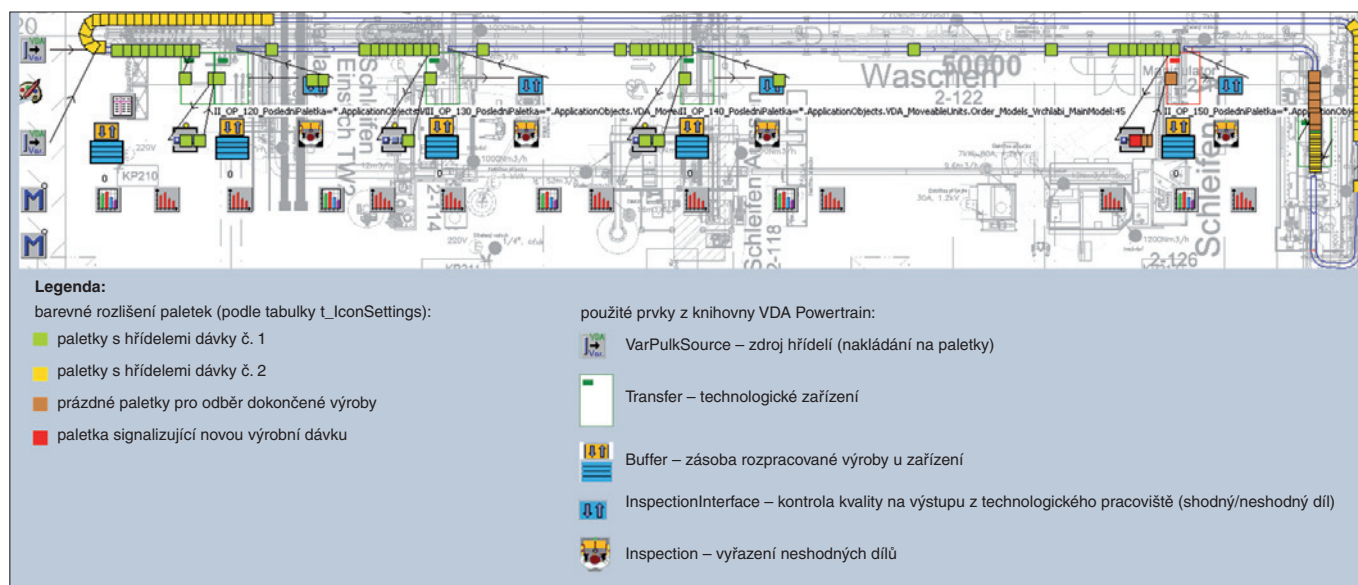
Hlavním ovlivňujícím faktorem je v daném případě přechod mezi jednotlivými výrobními dávkami lišícími se typem produktu a s tím související nutné změny v seřazení strojů (nastavení nového výrobního režimu). V souvislosti s tím bylo třeba uvažovat různé doby trvání jednotlivých technologických operací, doby potřebné na přeseřazení strojů, dobu trvání a periodu případné výměny nástrojů u některých zařízení a prostoje. Mnohé z těchto údajů byly určeny na základě měření nebo z výstupů řídicího softwaru příslušných zařízení přímo v (pilotním) provozu. Na získané hodnoty bylo tudíž třeba nahlížet jako na náhodné výběry a odpovídajícím způsobem pak modelovat rozdělení příslušných náhodných veličin. Některé vstupní údaje (např. pravděpodobnost vzniku neshodného dílu a následné možnosti jeho repase nebo vyřazení) byly čistě stochastického charakteru podložené empirickými hodnotami zjištěnými při provozu před zřetězením pracovišť. Jako příklad je na obr. 3 histogramem naměřených dob trvání a vypočítanými statistikami charakterizován takt prvního (vstupního) pracoviště, tj. rovnání hřídelí. Dále bylo nutné zohlednit možné manuální zásahy



Obr. 3. Histogram četnosti trvání taktu pracoviště rovnání hřídelí a jeho statistiky

## 3. Zadání a cíle simulační analýzy

Předmětem analýzy s použitím simulačního modelu byla linka na obrábění hřídelí do automobilových převodovek zahrnující několik technologických operací (rovnání hřídelí, broušení zápchů, vnějších povrchů a ozubení a nakonec čištění). Schéma této linky je na obr. 2, kde je současně znázorněno navr-



Obr. 4. Simulační model dopravníkové smyčky a zřetězených technologických pracovišť

V uvedených případech jde o procesy, mnohem více typické tyto atributy [8]:

- velká variabilita produktu výrazně ovlivňující hodnoty ostatních provozně orientovaných charakteristik výroby,
- stochasticky či deterministicky (např. periodicky) probíhající kontroly kvality včetně existence strategií repase neshodných dílů,

hované zřetězení příslušných technologických zařízení (obráběcích center) při použití uzavřené dopravníkové smyčky v podobě článkového dopravníku, který by unášel paletky přemísťující obráběcí hřídele. Paletkami se zde rozumějí manipulační prostředky pro uchycení hřídelí (po jedné hřídeli na paletku) obíhající celým okruhem dopravníku.

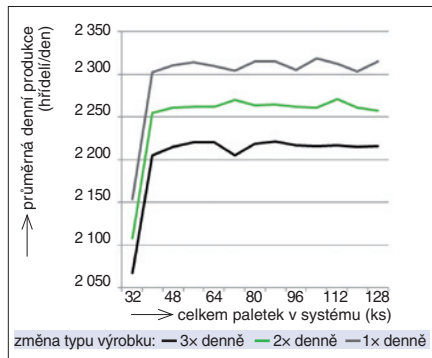
do jinak automatického systému celé výrobní linky, a to především jejich časové rozložení během pracovní směny.

Hlavním úkolem simulační analýzy bylo ověřit, zda je při zřetězení technologických pracovišť dopravníkovým systémem možné dosáhnout stanoveného denního objemu výroby. Další úlohou bylo porovnat strategie

řízení linky při přechodu na novou výrobní dávku (výrobu hřídele jiného typu). Protože při přechodu na výrobu hřídele jiného typu bylo v daném případě nutné přeseřizovat pouze stroj na předposledním pracovišti, byly porovnány tyto dvě strategie řízení přechodu:

- *strategie A*, kdy při změně výrobní dávky je třeba dokončit obrábění hřídelí stávající dávky, po dokončení všech operací na lince příslušně změnit seřízení a teprve následně začít zakládat do paletky na vstupu linky hřídele nové dávky,
- *strategie B*, kdy při změně výrobní dávky je třeba dokončit obrábění hřídelí stávající dávky na předposledním pracovišti, které je následně přeseřizováno, zatímco na předchozích pracovištích již mohou být obráběny hřídele nové dávky.

Strategie B vyžadovala automatický chod, a tudíž investice do speciálních paletek nesooucích s sebou informaci o stavu paletky a do snímačů umožňujících tento stav zjistit.



Obr. 5. Průměrná denní produkce linky v závislosti na počtu paletek v okruhu dopravníkové smyčky a na velikosti výrobní dávky (četnosti změn typu výrobku za den) při strategii přechodu na novou výrobu A

Podle informace o stavu paletky řídicí systémem rozliší dávku aktuálně obráběných hřídelí, prázdnou paletku (určenou k odběru již obroběných hřídelí) a signální paletky ohlašující poslední hřídel stávající, popř. první hřídel nové výrobní dávky.

Část simulačního modelu zachycující uzavřenou dopravníkovou smyčku, která zřetězuje jednotlivé technologické operace, je v redukované podobě ukázána na obr. 4. Paletky nesoucí hřídele různých výrobních dávek, signální paletky a prázdné paletky jsou barevně rozlišeny při použití prvku *t\_IconSettings* z knihovny VDA Powertrain. Dalšími použitými prvky z této knihovny byly instance tříd *Transfer*, *InspectionInterface*, *Inspection* a *Buffer*. Jako zdroj nových paletek a hřídelí byl použit prvek *VarPulkSource*, společný i pro další knihovny prvků od VDA.

#### 4. Simulační experimenty a jejich výsledky

Simulační model tedy zohledňoval stochastickou povahu mnoha ze vstupních údajů. Tomu odpovídalo také provedení simulačních experimentů, kde pro hodnoty sledo-

vaných výstupních veličin byla požadována 95% hladina významnosti. Pro každou ověřovanou kombinaci byly provedeny dva simulační běhy s různými proudy pseudonáhodných čísel, které se v nástroji Plant Simulation používají k zohlednění stochastických dějů, jako jsou prostoje, náhodné doby obrábění podléhající stanovenému rozdělení pravděpodobnosti atd.

Namísto nástroje *ExperimentManager* ze standardní knihovny Plant Simulation byl k definování a realizaci simulačních experi-

rovnány již definované strategie A a B přechodu na novou výrobní dávku, a to při její různé velikosti.

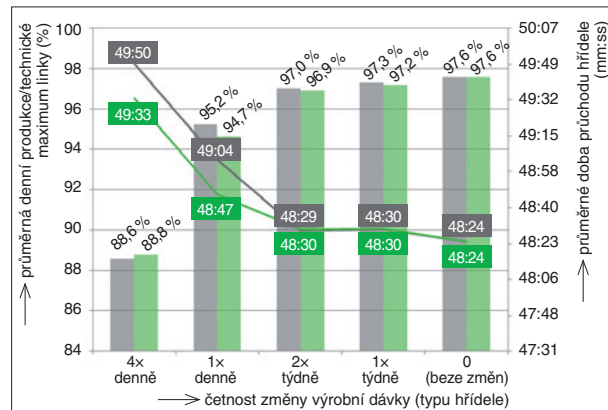
Z výsledků simulačních experimentů hledajících optimální počet paletek vyplývá, že současný počet (76 paletek) je dostatečný, neboť větší počet nepovede k jednoznačnému nárůstu denní produkce linky (obr. 5).

Simulační experimenty porovnávající strategie přechodu na novou výrobní dávky byly provedeny s nalezeným optimálním počtem paletek v systému. Jejich grafické výstupy pro strategii změny výrobní dávky A jsou pro ilustraci uvedeny na obr. 5.

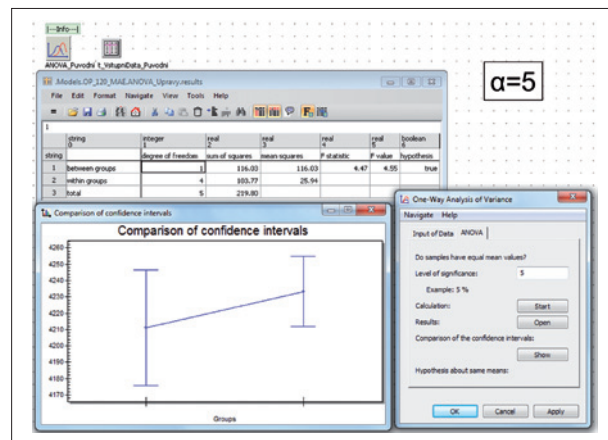
Pro následující simulační experimenty zaměřené na porovnání strategií A a B přechodu na novou výrobní dávku (včetně sledování vlivu četnosti této změny) bylo nastaveno 76 paletek v systému, tj. stav odpovídající současné situaci. Dále byl validovaný model doplněn o nástroj *iSICChart*, rovněž vyvinutý společností iSILOG,

který umožňuje uložit výstupy simulačních experimentů do šablon v programu MS Excel připravených v tabulární i grafické formě, přičemž však tyto výsledky zůstávají součástí simulačního modelu (jsou uloženy jako samostatný objekt v knihovně tříd *Class Library*).

Výsledky simulačních experimentů, kdy byla pro strategie přechodu A a B sledována vedle průměrné denní produkce vztahované k technickému maximu linky také průměrná doba průchodu hřídelí linkou, tj. od místa vložení hřídelí do paletky až po vyjmutí obroběných hřídelí, jsou ukázány na obr. 6



Obr. 6. Výsledky simulačních experimentů: průměrná denní produkce vztahovaná k technickému maximu linky a průměrná doba průchodu hřídelí pro strategie A a B



Obr. 7. Výsledky analýzy rozptylu při porovnání simulačních modelů nástrojem *One-Way Analysis of Variance* z prostředí *Plant Simulation*

mentů použit nástroj *ExperimenteSteuerung*, vyvinutý společností iSILOG GmbH. Přednostmi toho nástroje jsou:

- možnost nastavit různé délky simulace pro každou ověřovanou variantu zvlášť,
- možnost určit vztahnou variantu, s níž jsou porovnány výsledky (hodnoty sledovaných veličin) ostatních variant,
- nastavitelný počet simulačních běhů a volba hladiny významnosti pro každou ověřovanou variantu zvlášť.

Simulační experimenty byly provedeny ve dvou etapách. Nejprve – v rámci validačních experimentů s modelem – byl hledán optimální počet paletek obíhajících po dopravníkové smyčce. Následně byly po-

(graf zachycuje hodnoty získané jako aritmetický průměr výsledků dvou provedených simulačních běhů pro každou testovanou kombinaci). Technické maximum, kterému odpovídá 100% výkonnost, bylo uvažováno jako teoretická průchodnost systému v případě stoprocentní pohotovosti všech strojů, bez výskytu neshodných dílů a bez nutnosti výměny nástroje.

Z obr. 6 je patrné, že jednoznačně nelze doporučit některou z porovnávaných strategií přechodu na nový výrobek, neboť žádná z nich nepřináší větší denní produkci nezávisle na velikosti výrobní dávky. Konkrétně pro menší výrobní dávky (změna čtyřikrát denně) se jeví jako výhodnější strategie A (spuštění

nové dávky až po seřízení strojů), zatímco při větší dávce (změna jedenkrát denně až dvakrát týdně) lze o něco málo větší průchodnosti dosáhnout použitím strategie B (současné spuštění nové dávky a přeseřizování strojů). Logicky v případě výroby hříděl pouze jediného typu, kdy se nemění výrobní dávky, dosahuje linka v případě obou strategií stejně – nejvyšší – průchodnosti (viz pravý krajní sloupec v grafu na obr. 6).

## 5. Ověření výstupů simulačního modelu

V rámci validace simulačního modelu vytvořeného při použití knihovny prvků VDA Powertrain byly porovnány výsledky simulačních experimentů získaných s tímto modelem s výstupy referenčního simulačního modelu stejné výrobní linky vytvořeného při použití standardní knihovny prvků obsažené v simulačním prostředí Plant Simulation.

hodnot (průměrné denní produkce vykazované oběma modely) zamítnout. Z toho tedy vyplývá, že simulační model vytvořený v prostředí Plant Simulation při použití prvků z knihovny VDA Powertrain je v porovnání s modelem vytvořeným výhradně s použitím prvků vlastních prostředí Plant Simulation dostatečně přesný a výsledky simulačních experimentů provedených s modelem vytvořeným za použití knihovny VDA Powertrain vykazují požadovanou statistickou spolehlivost.

## 6. Závěr

V rámci simulační analýzy provedené za účelem ověřit vliv zřetězení technologických pracovišť linky pro obrábění hříděl převodovek byl v prostředí Plant Simulation vytvořen při použití knihovny prvků VDA Powertrain simulační model, s nímž byly uskutečněny si-

o přínosu případné investice do vybavení linky speciálními paletkami, snímači a řídicím systémem, která by vedla k nárůstu průměrné denní produkce hříděl. Výsledky simulačních experimentů neprokázaly jednoznačnou přednost zvažované strategie automatizace linky, která proto nebyla realizována. Simulační model vytvořený při použití knihovny prvků VDA Powertrain byl dále porovnán s referenčním modelem vytvořeným na bázi standardních základních prvků simulačního prostředí Plant Simulation. Výsledky provedené analýzy rozptylu výstupů obou modelů prokazují jejich dostatečnou shodu.

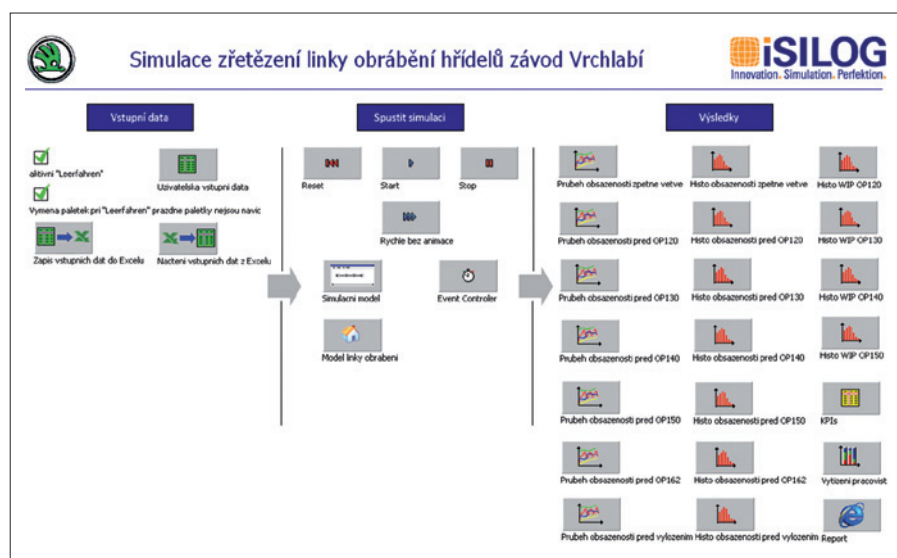
Do budoucna se předpokládá rozšíření, popř. modifikace současného simulačního modelu na bázi knihovny VDA Powertrain tak, aby bylo možné snadno modelovat procesy probíhající na širší třídě podobných výrobních linek (zřetězených pracovišť) pouhým nastavením požadovaných hodnot parametrů jednotlivých pracovišť bez nutnosti vytvářet zcela nové simulační modely. Knihovna prvků VDA Powertrain svou univerzálností toto umožňuje. V úvahu také připadá rozšíření uvedeného uživatelského rozhraní k ovládání dalších linek.

## Literatura:

- [1] *Ausführungsanweisung Ablaufsimulation in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie*, Vers. 2-2. Verband der Automobilindustrie (VDA), 2009.
- [2] BAYER, J. – COLLISI, T. – WENZEL, S.: *Simulation in der Automobilproduktion*. Berlin, Springer, 2003, 3-540-44192-1.
- [3] ŠTOČEK, J.: *Počítačová simulace ve firmě Škoda Auto*. VPS 4/2 Simulace v plánování výroby, Škoda Auto, a. s., Mladá Boleslav, 2013, prezentace.
- [4] VDA: *Willkommen beim VDA – Verband der Automobilindustrie*. [Online] 2013, [Citace: 15. červenec 2013.], <http://www.vda.de/de/index.html>.
- [5] VDI – Gesellschaft Fördertechnik: *VDI Richtlinie 3633*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2008.
- [6] HLOSKA, J.: *Kam směřuje simulace podnikových procesů a koncept digitální továrny?* Technik, 2013, 06, Sv. 1,1.
- [7] HLOSKA, J.: *Working with the Modular Library Automotive*. [autor knihy] Bangsow, S.: *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. Springer-Verlag, 2012, 12.
- [8] CARSTEN, P.: *VDA Automotive Bausteinkasten – Schulungsunterlagen für das Modul Powertrain*. Volkswagen Aktiengesellschaft, 2012.

Ing. Jiří Hloska,  
iSILOG GmbH ([jiri.hloska@isilog.cz](mailto:jiri.hloska@isilog.cz)),  
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
([yhlosk00@stud.fme.vutbr.cz](mailto:yhlosk00@stud.fme.vutbr.cz)),  
Ing. Jiří Štoček, Ph.D.,  
Škoda Auto, a. s. –  
Simulace v plánování výroby  
([jiri.stocek@skoda-auto.cz](mailto:jiri.stocek@skoda-auto.cz))

Lektoroval: Ing. Bc. Bronislav Chramcov, Ph.D.,  
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně



Obr. 8. Uživatelské rozhraní pro ovládání simulačního modelu

Protože při modelování byla brána v úvahu stochastická povaha modelovaných dějů, bylo za účelem porovnat výstupy z obou modelů získaných při stejném počtu simulačních běhů a stejném nastavení hladin významnosti třeba analyzovat rozptyl sledovaných výstupních charakteristik (*Analysis Of Variance* – ANOVA).

Analýza byla provedena přímo v simulačním prostředí Plant Simulation při použití nástroje *One-Way Analysis of Variance* z nadstavbové knihovny prvků. Hladina významnosti hypotézy o shodě středních hodnot průměrné denní produkce (jakožto výstupu porovnávaných simulačních modelů), která udává pravděpodobnost chyby I. druhu (nesprávné zamítnutí platné hypotézy), byla nastavena na hodnoty 1 %, 5 % a popř. 10 %. Na obr. 7 je ukázáno dialogové okno prvku *One-Way Analysis of Variance* spolu s tabelárními a grafickými výsledky analýzy pro hladinu významnosti  $\alpha = 5 \%$ , podle kterých nelze hypotézu o shodě středních

mulacních experimentů. Knihovna prvků VDA Powertrain byla k tvorbě simulačního modelu použita zejména proto, že umožňuje centrálně spravovat všechny parametry modelu a usnadňuje statistické sledování jeho výstupních veličin a navíc vhodně reflektuje vlastnosti specifické pro typ provozu, který byl simulován (produkce několika typů výrobků, kdy probíhá přeseřizování strojů spolu s dalšími speciálními operacemi, jako je např. výměna nástrojů). K snadnému ovládání simulačního modelu (parametrizace, spuštění simulačních běhů a zobrazení sledovaných charakteristik) bylo vytvořeno uživatelské rozhraní umožňující vykonávat veškeré kroky prostřednictvím tlačítek či zaškrtávacích políček, tj. bez jinak nutné detailní znalosti použitého simulačního nástroje Plant Simulation nebo programového kódu modelu (obr. 8).

Simulační experimenty provedené s modelem využívajícím knihovnu VDA Powertrain měly za cíl porovnat dvě strategie změny výrobní dávky, a to za účelem rozhodnout