

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra informačních technologií



Bakalářská práce

**Využití digitálních dvojčat (a jejich nástrojů) ve výrobě
pro její zefektivnění**

Daniel Klein

© 2023 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daniel Klein

Informatika

Název práce

Využití digitálních dvojčat (a jejich nástrojů) ve výrobě pro její zefektivnění

Název anglicky

Usage of digital twins (and their tools) in the manufacturing process for improving its effectiveness

Cíle práce

Hlavní cíl:

Hlavním cílem je analýza použití digitálních dvojčat pro zefektivnění jejich používání ve výrobě (a tím i zefektivnění výroby)

Dílní cíle:

Analýza současného stavu poznání

Rozbor nástrojů na simulaci digitálních dvojčat

Rozebrání přínosů a negativ digitálních dvojčat

Metodika

Práce je založena na studiu odborné a vědecké literatury. Bude analyzovat to, jak firmy využívají digitální dvojčata s cílem zefektivnit jejich použití. K tomuto cíli poslouží i rozbor nástrojů na simulaci digitálních dvojčat a prozkoumání jejich přínosů a negativ. Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části budou formulovány závěry práce.

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stránek

Klíčová slova

Digitální dvojče, technologie, simulační technika, porovnání, výroba, simulace, automatizace

Doporučené zdroje informací

- ANNA HYRE, GREGORY HARRIS, JOHN OSHO, MINAS PANTELIDAKIS, KONSTANTINOS MYKONIATIS, JIA LIU, Digital twins: Representation, Replication, Reality, and Relational (4Rs), Manufacturing Letters, Volume 31, 2022, Pages 20-23, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.12.004>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846321000870>)
- ARIVAZHAGAN ANBALAGAN, BACHU SHIVAKRISHNA, KUTHADI SAI SRIKANTH, A digital twin study for immediate design / redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation, Materials Today: Proceedings, Volume 46, Part 17, 2021, Pages 8209-8217, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.209>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321022380>)
- DIDEM GÜRDÜR BROO, MIGUEL BRAVO-HARO, JENNIFER SCHOOLING, Design and implementation of a smart infrastructure digital twin, Automation in Construction, Volume 136, 2022, 104171, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104171>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522000449>)
- LIANHUI LI, BINGBIN LEI, CHUNLEI MAO, Digital twin in smart manufacturing, Journal of Industrial Information Integration, Volume 26, 2022, 100289, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100289>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X21000868>)
- MAŘÍK, V. *Průmysl 4.0 : výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – PEF

Vedoucí práce

Ing. Alexandr Vasilenko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2022

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 10. 2022

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití digitálních dvojčat (a jejich nástrojů) ve výrobě pro její zefektivnění" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 15. 3. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Alexandru Vasilenkovi Ph.D za jeho ochotu, čas a přínosné rady poskytované v průběhu vedení této bakalářské práce. Velký dík patří také Františku Podzimekovi a firmě Siemens ze poskytnutí cenných materiálů, které byly pro práci velkým přínosem.

Využití digitálních dvojčat (a jejich nástrojů) ve výrobě pro její zefektivnění

Abstrakt

Tato práce se zabývá trendem využívání digitálních dvojčat ve výrobě. Jejím hlavním cílem je, aby sloužila jakožto jednotný přehled shrnující základní informace o vlastnostech a implementacích digitálních dvojčat.

Teoretická část se zabývá uvedením čtenářů do problematiky digitálních dvojčat, rozbořením jejich nástrojů a vyhodnocením jejich kladů a záporů.

V praktické části je zkoumáno využití digitálních dvojčat na konkrétních řešeních z praxe. Výsledky těchto řešení jsou syntetizovány za účelem srovnání vhodnosti využití této technologie napříč různými průmyslovými odvětvími.

Klíčová slova: digitální dvojče, technologie, Průmysl 4.0, simulační technika, porovnání, výroba, simulace, automatizace, software

Usage of digital twins (and their tools) in the manufacturing process for improving its effectiveness

Abstract

This bachelor thesis focuses on the trend of using digital twins in manufacturing. One of its main benefits is that it can serve as a unified place summarizing basic information about the features and implementations of digital twins.

The theoretical part introduces readers to the issue of digital twins, analyses their tools, and evaluates their advantages and limitations.

The practical part examines the use of digital twins in specific real-world solutions. The results of these solutions are synthesized to compare the suitability of utilizing this technology across different industrial sectors.

Keywords: digital twin, technology, Industry 4.0, simulation technology, comparison, production, simulation, automation, software

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Cíl práce a metodika	11
2.1 Cíl práce	11
2.2 Metodika	11
3 Teoretická východiska	12
3.1 Úvod k digitálním dvojčatům.....	12
3.1.1 Úvod k Průmyslu 4.0	14
3.1.2 Různé přístupy k digitálním dvojčatům	15
3.2 Přínosy a negativa (rizika) digitálních dvojčat.....	18
3.2.1 Výhody.....	18
3.2.2 Rizika a nevýhody	19
3.3 Programy pro vytváření digitálních dvojčat.....	22
3.3.1 Siemens.....	22
3.3.2 Řešení ostatních výrobců	29
4 Analytická část	31
4.1 Použití digitálních dvojčat v automobilovém průmyslu	33
4.1.1 Zefektivnění výroby v automobilovém závodu MG Motor India – komerční studie 33	
4.1.2 Nasazení digitálního dvojčete v automobilové továrně v Burse, Turecku – studie z literatury	34
4.2 Použití digitálních dvojčat ve výrobních linkách.....	38
4.2.1 Použití digitálního dvojčete v továrně na výrobu řídicích prvků Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE) – komerční studie.....	38
4.2.2 Zefektivnění výroby kompresorů ve firmě Secop – komerční studie.....	39
4.2.3 Optimalizace přidělování rentgenového prostoru v továrně Siemens Electronic Works Amberg, Germany – komerční studie.....	40
4.2.4 Digitální dvojče průmyslové výrobní linky – studie z literatury	41
5 Výsledky a diskuze	44
5.1 Zhodnocení nástrojů pro digitální dvojčata ve výrobě.....	44
5.1.1 Řešení Siemens – NX a Tecnomatix	44
5.1.2 Ostatní řešení a Open Source.....	45
5.2 Porovnání výsledků projektů.....	45
5.2.1 Automobilový průmysl	45
5.2.2 Výrobní linky	46
6 Závěr.....	49
7 Seznam použitých zdrojů	50

8	Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk.....	54
8.1	Seznam obrázků	54
8.2	Seznam tabulek	54
8.3	Seznam grafů.....	55
8.4	Seznam použitých zkratk.....	55

1 Úvod

Digitální dvojčata jsou problémem aktuálním a důležitým pro celý průmysl. Když se výrobce odhodlá vnořit do problematiky digitálních dvojčat, může mu to přinést velký náskok před konkurencí – a to ve formě zlepšení a zefektivnění výroby, jednoduššího testování svých zařízení či díky získání hlubšího přehledu o chování svých zařízení.

Práce se zaměřuje právě na použití digitálních dvojčat ke zefektivnění výroby. Zkoumá, jaká jsou aktuálně dostupná řešení pro digitální dvojčata (a jaké rozdílné definice jednotlivé firmy mají), jejich klady a zápory a také využití těchto řešení v reálném provozu.

Práce zároveň slouží jako centrum základních informací o digitálních dvojčatech pro běžného uživatele, který by se jinak mohl cítit zmaten množstvím pro něj nerelevantních informací, které by našel.

Jednotlivá řešení z praxe jsou na konci práce syntetizována za účelem srovnání vhodnosti využití technologie digitálních dvojčat napříč různými průmyslovými odvětvími.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je analýza použití digitálních dvojčat pro zefektivnění jejich používání ve výrobě (a tím i zefektivnění výroby). Dílčími cíli práce jsou analýza současného stavu poznání, rozbor nástrojů na simulaci digitálních dvojčat a rozebrání přínosů a negativ digitálních dvojčat.

2.2 Metodika

Práce je založena na studiu odborné a vědecké literatury. Analyzuje to, jak firmy využívají digitální dvojčata s cílem zefektivnit jejich použití. K tomuto cíli slouží i rozbor nástrojů na simulaci digitálních dvojčat a prozkoumání jejich přínosů a negativ. Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části je formulován závěr práce.

3 Teoretická východiska

3.1 Úvod k digitálním dvojčatům

Digitální dvojče je digitální reprezentací určitého fyzického objektu či systému. Díky spojení mnoha digitálních dvojčat dohromady mohou vznikat digitální repliky celých výrobních linek, továren, případně třeba i měst. Na úrovni jednotlivých strojů lze na jejich replikách testovat např. jejich výkonnost, chování při omezených podmínkách či to, jak interagují s ostatními stroji. Na úrovni simulace celé výroby lze potom díky digitálním dvojčatům dosáhnout optimalizace na místech, která výrobu zpomalují, a díky tomu ji do určité míry zefektivnit. Zároveň mohou být díky nim realizovány testy, které určí, jak se výrobní linka zachová, pakliže její část vypadne, či jaký bude mít daný výpadek dopad na efektivnost linky. Základem digitálních dvojčat je tedy simulace pro plánování, optimalizaci a testování výroby. [1,7,8]

Digitální dvojčata jsou jedním ze základních pilířů čtvrté průmyslové revoluce¹, a firmy by tak na ně měly i adekvátně reagovat. Dohromady s dalšími prvky čtvrté průmyslové revoluce tvoří komplexní systém, který dokáže společnosti, které se do něj nebojí vstoupit, popohnat před konkurenci. [3]

Průkopníkem konceptu digitálních dvojčat byla NASA, která potřebovala vzdáleně udržovat a opravovat kosmické lodě či Mezinárodní kosmickou stanici. V závěsu za NASA stály letecké společnosti, nyní jsou již ovšem digitální dvojčata finančně dostupná i pro menší firmy. Jako příklad efektivního využití digitálního dvojčete lze uvést řešení, které představila společnost Siemens. Ta potřebovala pro čínského zákazníka zavést montážní linku v co nejkratší době. Díky digitálnímu odzkoušení a odladění ušetřila firma více než 30 % času oproti tomu, kdyby postupovala podle standardních postupů, které nevyužívají digitální dvojčata. [1]

Zajímavým příkladem digitálního dvojčete může být i digitální dvojče celého města. Město Rennes ve Francii si nechalo navrhnout digitální model, „Virtual Rennes“, na němž simuluje varianty rozvoje města a díky tomu získává cenné informace o dopadech, které nastanou při rozhodování o výstavbách, omezování dopravních řešení atp. [1]

Chris O'Connor ze společnosti IBM popisuje základní principy fungování digitálních dvojčat následujícím způsobem:

¹ Čtvrtá průmyslová revoluce neboli Průmysl 4.0 je více rozveden v kapitole 3.1.1.

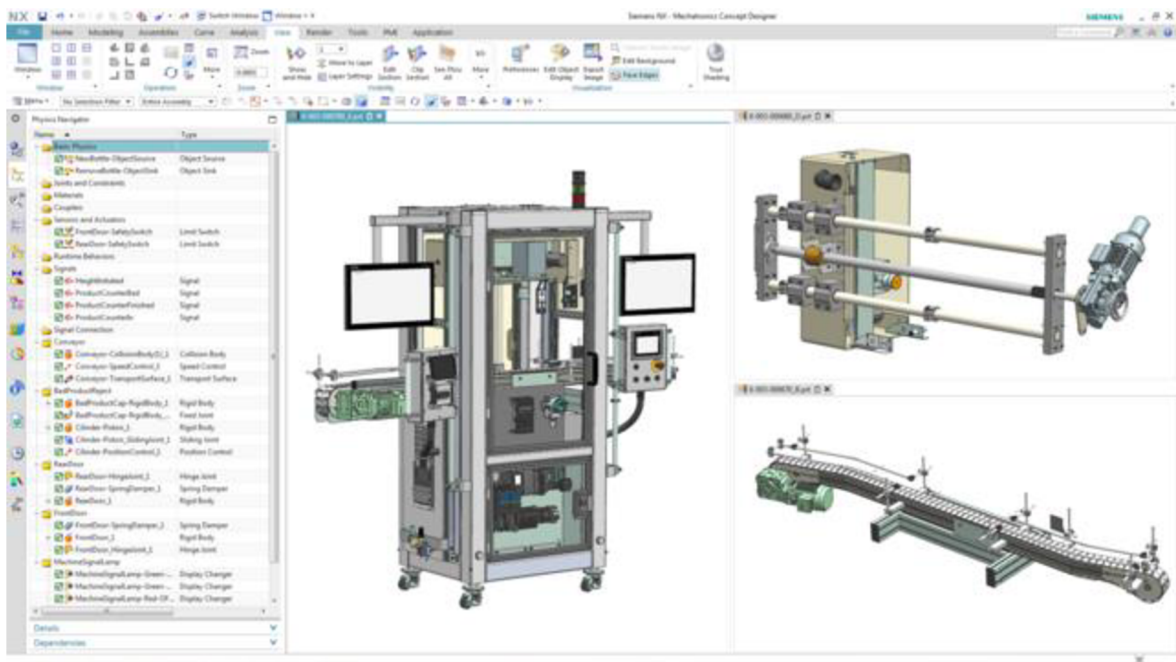
- První důležitou součástí vývoje je analýza v každém kroku výroby. Ta musí být v reálném čase, prediktivní a kvalitní.
- Data musí být otevřená, přístupná a připravená na zpracování.
- Důležitý je kontext průmyslu – stejný produkt použijeme jinak v různých odvětvích průmyslu – tudíž můžeme mít u stejného produktu dvě digitální dvojčata, na základě toho, jak je v daném odvětví průmyslu produkt využíván.
- Je důležité mít myšlenku kontextu průmyslu pořád na paměti, a neimplementovat digitální dvojčata pouze z pohledu inženýrů, kteří nemusí vidět širší kontext digitálního dvojčete. [9]

V praxi neexistuje dokonalá shoda na tom, co přesně tvoří technologii digitálních dvojčat, neboť tato technologie přichází v mnoha různých podobách s různými atributy. K bodu zlomu, který nastane v moment, kdy fyzický a digitální svět bude spravován jako jeden celek, se průmysl řítí rychlým tempem. Napomáhá tomu rozvoj internetu věcí (IoT), big data², umělé inteligence, virtuální reality, cloud computingu (kdy lze mít na vyžádání přístup k víceméně neomezeným výpočetním zdrojům) a efektivní spojení všech výše vyjmenovaných technologií. [7]

Thomas Kaiser, viceprezident Oddělení internetu věcí v německé společnosti SAP, pronesl následující: „Digitální dvojčata se stávají nutností, která pokrývá celý životní cyklus nějakého zařízení nebo procesu, a vytváří základ pro propojené produkty či služby. Firmy, jež na to nedokážou zareagovat, zůstanou daleko za svou konkurencí.“ [1]

Příklad toho, jak může vypadat část procesu implementace digitálních dvojčat, je možné vidět na obrázku č.1.

² Jde o velké a složité soubory dat, které jsou obtížné na zpracování a analyzování pomocí tradičních metod zpracování dat.



Obrázek 1 – Část implementace linky pomocí digitální dvojčat, Siemens [23]

3.1.1 Úvod k Průmyslu 4.0

V kontextu úvodu k digitálním dvojčatům je nutné zmínit i Průmysl 4.0, kterého jsou digitální dvojčata součástí. Ve zkratce je Průmysl 4.0 označení pro inovace a proměny výrobních procesů s využitím moderních technologií – hlavně internetu, digitalizace, virtualizace a cloudu³. Díky těmto moderním technologiím nastává propojení a automatizace veškerých potřebných výrobních procesů, což vede k lepšímu přehledu o daných procesech a zároveň k větší efektivnosti.

Tato automatizace ovšem musí být precizně rozmyšlena a integrována, aby se zajistila co největší míra návratnosti jednotlivých komponent Průmyslu 4.0 [2, 3].

Mezi hlavní pilíře Průmyslu 4.0 patří:

- využití umělé inteligence,
- využití IoT (Internet of Things),
- využití technologií sloužících k automatizaci výroby, mezi které patří i digitální dvojčata,
- hojné využití cloudu (který ovšem neslouží pro pouhé ukládání souborů, ale i pro hoštění výše zmíněných služeb, např. IoT a AI, ale i dalších).

³ Síť vzdálených serverů, které poskytují různé služby, jako je ukládání dat, zpracování a aplikace, přístupné přes internet.

3.1.2 Různé přístupy k digitálním dvojčatům

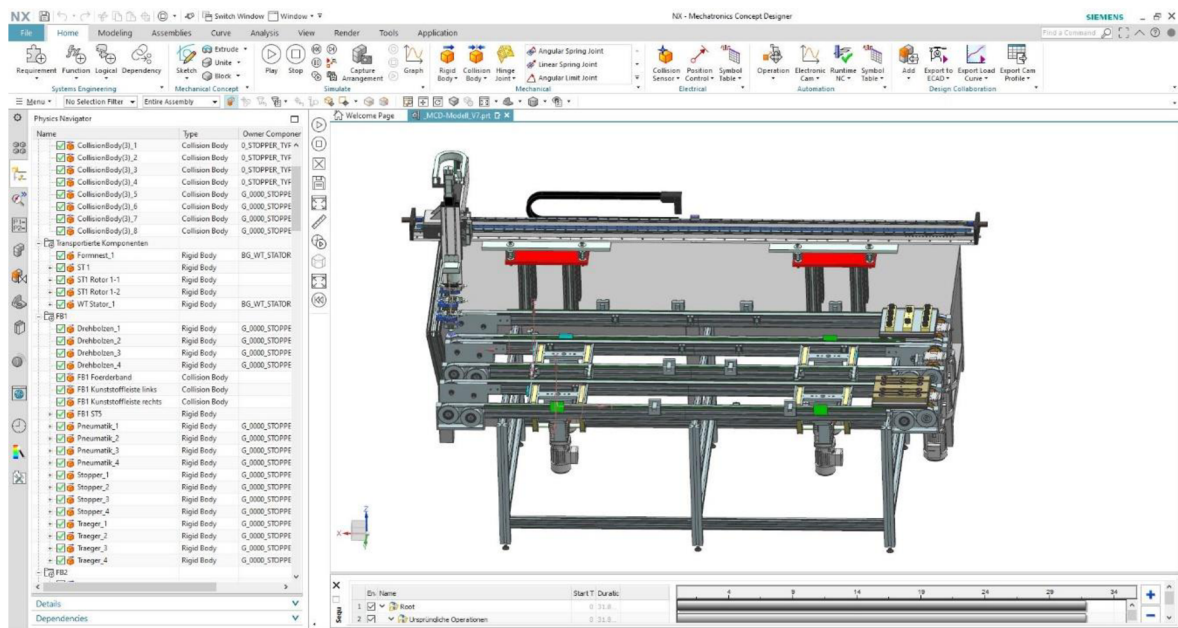
Jak již bylo zmíněno, součástí čtvrté průmyslové revoluce je i hojné používání cloudových služeb, kde mohou být hostována a analyzována např. data z IoT zařízení, či jsou zde digitální dvojčata přímo provozována. Je tedy nasnadě porovnat výrobce, který má software zaměřený čistě na digitální dvojčata (Siemens), s cloudovými službami, které nejsou na digitální dvojčata specializovány a nabízejí je pouze jako součást mnohem většího balíku funkcionalit (Microsoft Azure).

Je ovšem nutné mít na paměti, že kvůli velké komplexitě celého problému digitálních dvojčat může být podobné porovnání pouze povrchní a vždy záleží na konkrétním problému zákazníka.

Siemens

Siemens je jedním z hlavních leaderů trhu s digitálními dvojčaty zaměřenými na výrobní linky a jejich optimalizaci. Používá klasický přístup k digitálním dvojčatům – pracuje s nimi jako s reprezentací fyzických objektů, nad kterými je možné vytvářet simulace.

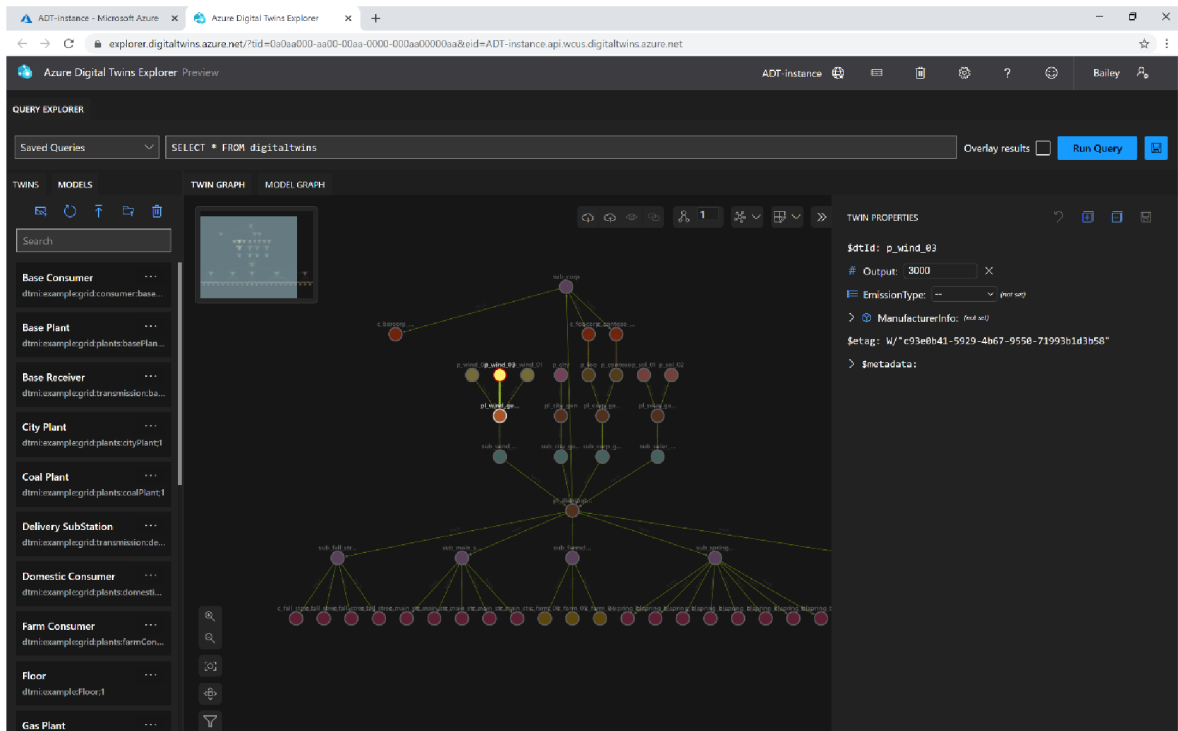
Základní přístup Siemensu k problému vývoje digitálních dvojčat je do hloubky prozkoumán v sekci Programy pro vytváření digitálních dvojčat. Na obrázku č. 2 je vidět rozpracovaný model v programu NX Mechatronic Concept Designer právě od Siemensu – obrázek dokresluje uživatelskou přívětivost zmíněného softwaru, díky které si lze i bez většího kontextu představit, jakou práci s modelem software umožňuje.



Obrázek 2 – Prostředí NX Mechatronic Concept Designer [6]

Azure

Jako zástupce cloudového řešení je zde podrobněji uveden Azure. V cloudových řešeních AWS (Amazon) a Azure (Microsoft) se také dají provozovat a navrhovat digitální dvojčata, přístup je zde ovšem odlišný než v praktickém použití produktů od Siemensu. V Azure digitální dvojče reprezentuje např. výrobní linku, ne však primárně pro simulace na ní (ve smyslu např. teplotních testů jednotlivých komponent), ale spíše pro zpřístupnění jejího ovládání – díky senzorům se např. dá zjistit její zvýšená teplota, a tak má administrátor možnost v reálném čase na dálku danou linku vypnout. Prostředí Azure lze pozorovat na obrázku č. 3, kde si lze všimnout, že modely linek jsou zobrazeny jako pouhé propojené body, nikoliv jako přímé vizuální reprezentace modelů. [4, 5]



Obrázek 3 – Azure Digital Twins Explorer [5]

3.2 Přínosy a negativa (rizika) digitálních dvojčat

Před implementací digitálních dvojčat v podniku je nutné zvážit klady a zápory, ať už se týkají jejich zavedení, udržování, či nutnosti přeškolení zaměstnanců. Také je nutné se zamyslet, zdali je firma dostatečně připravená na změnu, kterou digitální dvojčata přinesou, a zdali dokáže z digitálních dvojčat vytěžit maximum – nebo jestli pro ni není lepší investovat peníze do jednoduššího řešení. [7, 22]

3.2.1 Výhody

Mezi hlavní výhody, které digitální dvojčata poskytují, patří [7, 22]:

Popisná a informační hodnota

Díky digitálním dvojčatům vzniká schopnost ihned zobrazit stav objektu, který digitální dvojče reprezentuje. Obzvláště přínosná je tato výhoda u dvojčat, která jsou daleko od našeho umístění, či ke kterým je velmi náročné se dostat (např. dvojčata kosmických lodí, elektráren v provozu atp.).

Analytická hodnota

Data, která digitální dvojče vytvoří, mohou být i taková, která by na reálném objektu přímo změřit nešla (např. kvůli fyzickým omezením či vysoké teplotě). Těchto dat lze využít pro další analýzu a např. pro optimalizaci dalších generací výrobků.

Diagnostická hodnota

Diagnostické systémy, které digitální dvojčata mohou obsahovat, používají naměřená data k předpovídání a k návrhům příčin stavů původních modelů, které jsou dvojčaty reprezentovány. Díky analýze provedené strojovým učením (založené na historických datech) může firma hledat důvody případných problémů ve výrobě.

Prediktivní hodnota

Na rozdíl od diagnostiky, prediktivní hodnota digitálních dvojčat vychází z předpovídání jejich chování a z předpovídání budoucích stavů modelu. Digitální dvojčata také můžou navrhnout řešení budoucích stavů výroby za účelem maximálního zisku a zároveň i spokojenosti zákazníka.

Výhody pro vývoj produktů

Data z digitálního dvojčete lze využít k upřesnění požadavků na další výrobky (či na specifikování požadavků na budoucí generace výrobku stejného). Zároveň lze během testovací fáze digitálního dvojčete detekovat případné problémy a ještě před výrobou produktu je odstranit. Tím se zkrátí doba nutná pro uvedení na trh a sníží se náklady na vývoj.

Výhody ve výrobě

Pakliže firma pro každý produkt, který vyrobí, vytvoří i digitální dvojče, může model produktu obsahovat komplexní údaje o konkrétních použitých komponentech a materiálech, které jsou potřeba pro jeho výrobu. Díky tomu, a také díky zkušenostem s procesními podmínkami výroby, se může výroba produktu značně zoptimalizovat.

Výše zmíněným lze také dosáhnout jednoduššího objasnění specifikací s dodavateli a tím se může zoptimalizovat návrh výroby a dopravy. Zároveň z modelu čerpají benefit i koncoví zákazníci, neboť získají větší míru informací a možností konfigurace produktu.

Výhody při provozu a servisu

Po předání výrobku zákazníkovi digitální dvojče stále hromadí údaje (výkon, provozní podmínky). Opět může výrobce díky těmto datům předcházet problémům, optimalizovat výkon produktu či plánovat údržbu. Velkou výhodou je, že digitální dvojče se aktualizuje společně s tím, jak se vyvíjí produkt – bere v potaz přidání nových funkcionalit, přizpůsobení konkrétnímu zákazníkovi atp., díky čemuž budou data z digitálního dvojčete validní i po dlouhé době po jeho zavedení.

Výhody při ukončení provozu

Údaje o podmínkách, v jakých byla konkrétní komponenta provozována, mohou výrobcí posloužit k rozhodnutí, zdali chce komponentu použít znovu, repasovat nebo např. rovnou sešrotovat. Zároveň i po ukončení používání komponenty lze pořád využít data z jejího digitálního dvojčete.

3.2.2 Rizika a nevýhody

Pro plné zhodnocení digitálních dvojčat je nutné myslet i na případné úpravy struktury firmy (technologické i personální). Obvykle je nutné zpřísnit a předělat pravidla

bezpečnosti a intenzivně přeškolit jak zaměstnance, tak do určité míry i pracovníky dodavatelů. Mezi další možná rizika, která je nutné vzít v potaz, patří [7, 22]:

Náklady na realizaci

Základní vstupní investice pro digitální dvojčata (do technologických platforem, vývoje modelů a služeb, nakoupení senzorů...) je vcelku vysoká, a byť bude časem tato částka nejspíše klesat (díky větší konkurenci na relevantním trhu), je i tak vhodné technologii digitálního dvojčete porovnat s alternativním řešením. Mnohá funkčně podobná řešení (např. pomocí propojení IoT senzorů a konvenční databáze) mohou do určité míry postačovat firmě, která by na zavedení digitálních dvojčat neměla rozpočet.

Přesnost modelu a kvalita dat

Vytvoření přesného a odpovídajícího modelu (ať už ze stránky fyzické, materiální...), je velmi náročný proces, který vyžaduje kooperaci vývojářů i inženýrů, kteří mnohdy musí kvůli technickým a ekonomickým omezením zjednodušovat své modely. S přesností modelu ovšem souvisí i kvalita dat. Pakliže jsou modely navrženy nesprávným způsobem a produkují nespolehlivá data, celý koncept digitálních dvojčat nemůže být využit ve svém maximálním potenciálu.

I když je model navržen správně, systém zároveň musí počítat s tím, že může být náročné vždy zaručit kvalitní přenos dat – data může být potřeba sbírat až z tisíců různých senzorů, které mohou komunikovat přes ne vždy spolehlivé sítě (síť může např. vypadnout), a tak musí systém umět špatná data automaticky odhalovat a izolovat.

Nahraditelnost

Problém rozdílné standardizace se nevyhýbá ani digitálním dvojčatům. Většinou jsou používány otevřené a standardizované postupy, i přesto se u některých specifických technologií může firma, snažící se implementovat digitální dvojče, setkat s tím, že tyto technologie budou pouze obtížně nahraditelné jiným dodavatelem. Vzniká tak dlouhodobá závislost firmy na dodavateli bez možnosti jeho snadné výměny.

Vzdělání a zaškolení zaměstnanců

Pro efektivní využití digitálních dvojčat je nutné ve firmě vyžadovat, aby její značná část (zaměstnanci, dodavatelé či například i zákazníci) přijala nové způsoby práce. Je potřeba zajistit, aby změnou dotčení lidé dostali nástroje a zdroje pro dovednosti, které pro

využití dvojčat budou potřebovat. Pro co nejsnadnější zavedení technologie je zároveň nutné pracovníky do přechodu k nové technologii motivovat.

Zabezpečení přístupu k datům

Z důvodu, že digitální dvojče a jeho data obsahují know-how, jak daná firma funguje a přistupuje k výrobě, či podrobnosti produktu a informace o jeho výkonnosti, je nutné adekvátně reagovat na to, kdo má k digitálním dvojčatům přístup. Zároveň musí být firma připravená i na další výzvy, které s sebou vyšší ochrana dat přináší (jde o výzvy týkající se správného určení vlastnictví dat, zabezpečení citlivých údajů a zákaznických procesů či ochrany identity).

Kybernetická bezpečnost

Datové linky propojující komponenty s jejich dvojčaty mohou představovat nové možnosti pro kyberzločince, kteří by chtěli narušit chod organizace. V provozech, kde lze pomocí digitálních dvojčat ovlivňovat i chování skutečné komponenty, se jedná o obzvláště vážný problém, který by mohl mít pro firmu devastující dopady. Kybernetická bezpečnost je tudíž jednou z nejkritičtějších priorit a může pro mnoho firem znamenat velkou výzvu.

Mentální otevřenost nutná pro implementaci digitálních dvojčat

Stejně jako pro většinu moderních technologií tak i pro digitální dvojčata platí, že aby společnost vůbec mohla začít uvažovat o nasazení takové technologie, musí být její vedení připraveno čelit výzvám, které s sebou tyto technologie přinášejí. Výzvy, které bude třeba řešit, jsou jak technického rázu (viz výše zmíněné zabezpečení dat), tak ale i rázu sociálního – velkou překážkou, která by se mohla objevit, je například celkový odpor zaměstnanců ke změně. Zavedení technologie po nich může vyžadovat transformaci ve firemní kultuře, struktuře nebo i jejich vlastních pracovních procesech. Pro řadu zaměstnanců by mohly být jakékoliv změny zásahem do jejich pohodlí, a tudíž by nemuseli chtít při implementaci spolupracovat.

3.3 Programy pro vytváření digitálních dvojčat

Pro zvážení, zdali firma bude či nebude používat digitální dvojče, je dobré se alespoň do určité míry seznámit s tím, jak programy pro digitální dvojčata vypadají či jak jsou uživatelsky náročné.

U programů se práce zaměřuje na „klasické“ pojetí digitálních dvojčat – tedy jako na reprezentaci fyzických objektů, nad kterou lze vytvářet simulace [17, 18].

3.3.1 Siemens

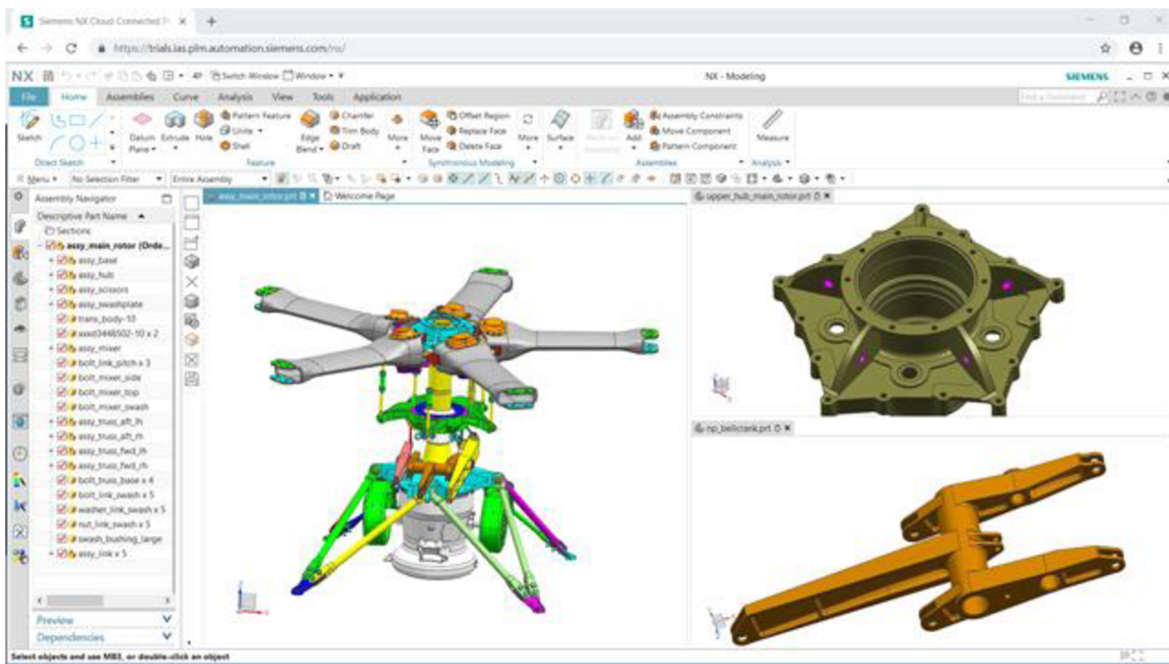
Siemens nabízí v porovnání s konkurencí jedno z největších portfolií programů. Problematika digitálních dvojčat je u Siemensu rozdělena na tři úrovně (a pro každou úroveň Siemens poskytuje samostatný software). Jedná se o úrovně stroj, buňka a linka, kdy každá úroveň má svoje konkrétní použití. Na co jde každou z úrovní použít, lze vidět na obrázku č. 4. [17, 18]



Obrázek 4 – Rozdělení produktů Siemens [17]

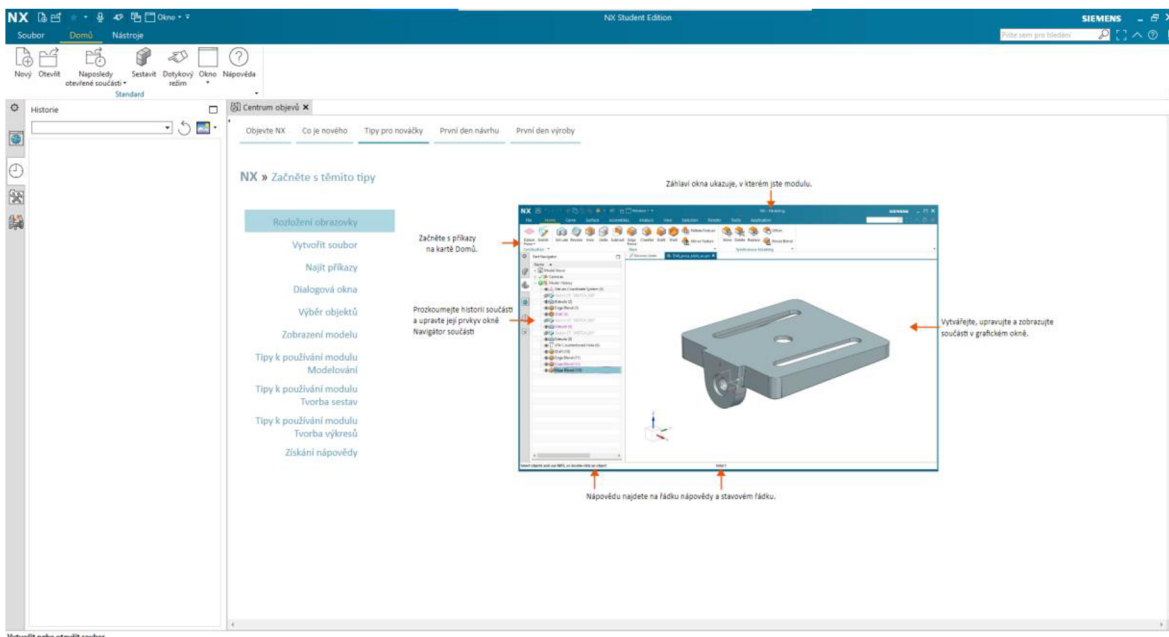
NX

NX je komerční CAD/CAM/CAE program, který slouží k podpoře činností v konstrukci a výrobě. Má velkou škálu funkcí – provádění ideových návrhů, výpočtů, simulací, tvorby výkresové dokumentace a mnoho dalšího. Jak prostředí programu NX vypadá je ukázáno na obrázku č. 5. [25]



Obrázek 5 – Základní prostředí programu NX [19]

Na obrázku č. 5 je zároveň dobře vidět, jak komplexně může program v rámci používání vypadat – vhodné je ovšem i uvést, že základní práce s ním je intuitivní a uživatel nemá problém s běžnými úkony – k demonstraci určité jednoduchosti slouží obrázek č. 6, na kterém je vidět program NX ihned po spuštění (prezentováno na verzi programu pro studenty).



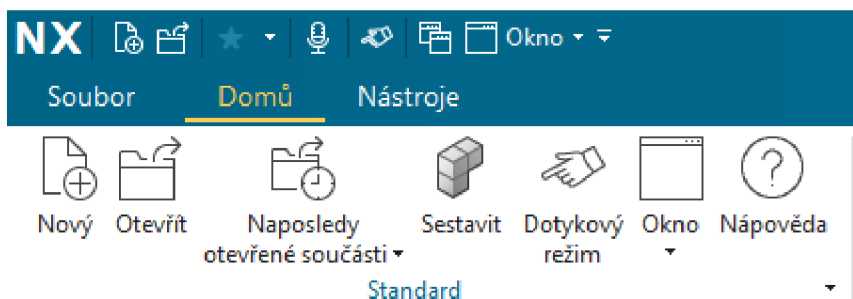
Obrázek 6 – Program NX po spuštění (vlastní zpracování)

Program NX je intuitivní na používání, neboť uplatňuje stejná pravidla UX⁴ a UI, jako většina aplikací na operačním systému Windows. V horní části obrazovky se nachází lišta (její zobrazení se liší podle toho, jestli je aktuálně otevřený soubor, nebo nikoliv). Bez otevřeného souboru je možné ji vidět na obrázku č. 7, s otevřeným na obrázku č. 9.



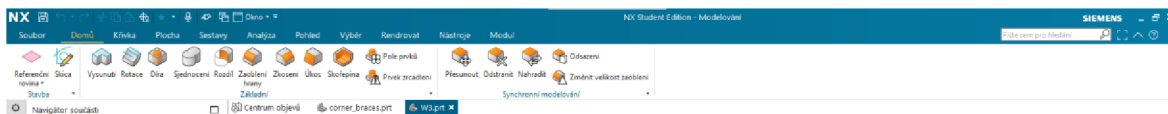
Obrázek 7 – Lišta bez otevřeného souboru (vlastní zpracování)

Obrázek č. 8 obsahuje detailnější pohled na lištu, podobnou té, kterou používají například aplikace z rodiny kancelářského balíčku Microsoft Office – uživatele tu pak pravděpodobně nejvíce budou zajímat tlačítka Nový a Otevřít.

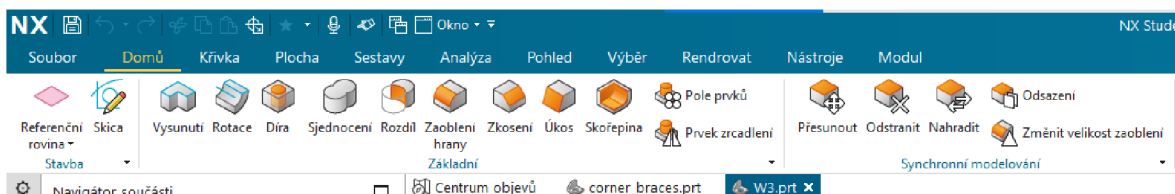


Obrázek 8 – Detail lišty (vlastní zpracování)

Jak již bylo zmíněno, lištu s otevřeným souborem lze vidět na obrázku č. 9 – zde už se tlačítka věnují hlavně vlastnostem modelu a práci s modelem, tudíž na její používání musí mít uživatel určitou znalost programu NX a celkově zkušenost s prací s CAD (či funkcemi podobnými) soubory. Na liště lze nalézt například mnoho variant úprav modelu, práci s křivkou, plochou a mnoho dalšího, viz detail na obrázku č. 10.



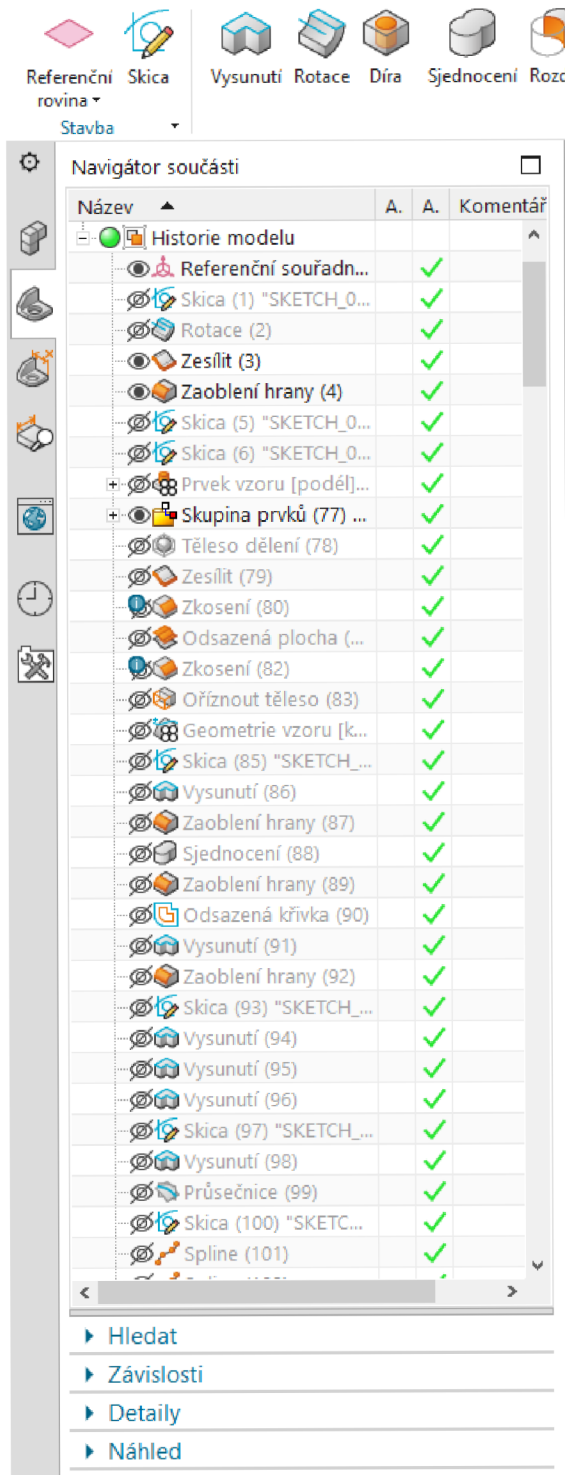
Obrázek 9 – Lišta při otevřeném souboru (vlastní zpracování)



Obrázek 10 – Detail části lišty na záložce Domů (vlastní zpracování)

⁴ Obor zabývající se usnadněním používání rozhraní webů, programů a dalších [39].

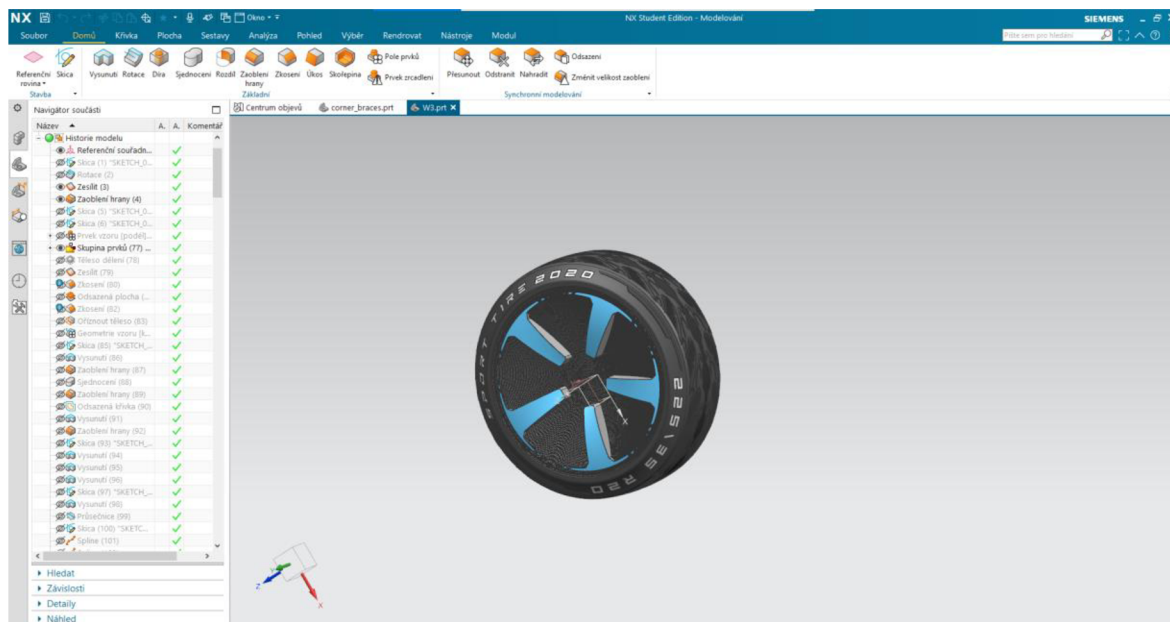
Detailnější zobrazení toho, jak vypadá levý panel programu, je prezentováno na obrázku č. 11. Lze si všimnout hlavně navigace mezi jednotlivými součástkami a vrstvami modelu.



Obrázek 11 – Levá část programu NX (vlastní zpracování)

Díky funkcionalitám programu NX je v něm možné zobrazovat modely z webových stránek, jako je například <https://grabcad.com/>. Toto využití je možné pozorovat na obrázku č. 12, kde je vyrendrované kolo z veřejně dostupného souboru modelu, který se nacházel na

zmíněné stránce. Při bližším prozkoumání si lze také všimnout, že program NX skvěle pracuje se světlem – modré části kola vrhají odrazy na základě definovaného materiálu a na základě umístěného zdroje světla.

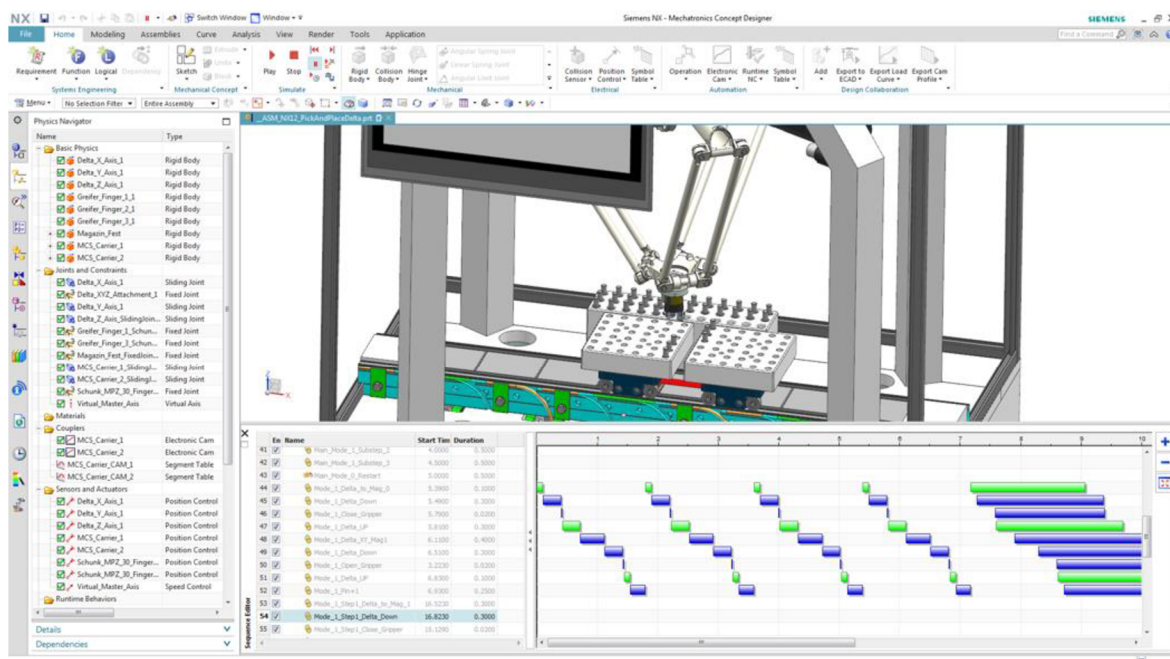


Obrázek 12 – Renderování kola v programu NX (vlastní zpracování)

NX Mechatronic Concept Designer

NX MCD je modul programu NX, který umožňuje plně využít potenciálu NX díky podpoře vytváření simulací nad modely.

Díky rozsáhlým funkcím mohou na tvorbě virtuálního modelu spolupracovat konstruktéři, elektroinženýři i programátoři a hotový virtuální model lze řídit pomocí časově závislých operací či podle předem určených událostí [17, 18]. Na obrázku č. 13 je zobrazena simulace NX Mechatronic Concept Designeru v akci, společně s časovou osou událostí, na které lze vidět posloupnosti simulovaných akcí.



Obrázek 13 – Simulace modelu pomocí NX Process Simulate [35]

Tecnomatix

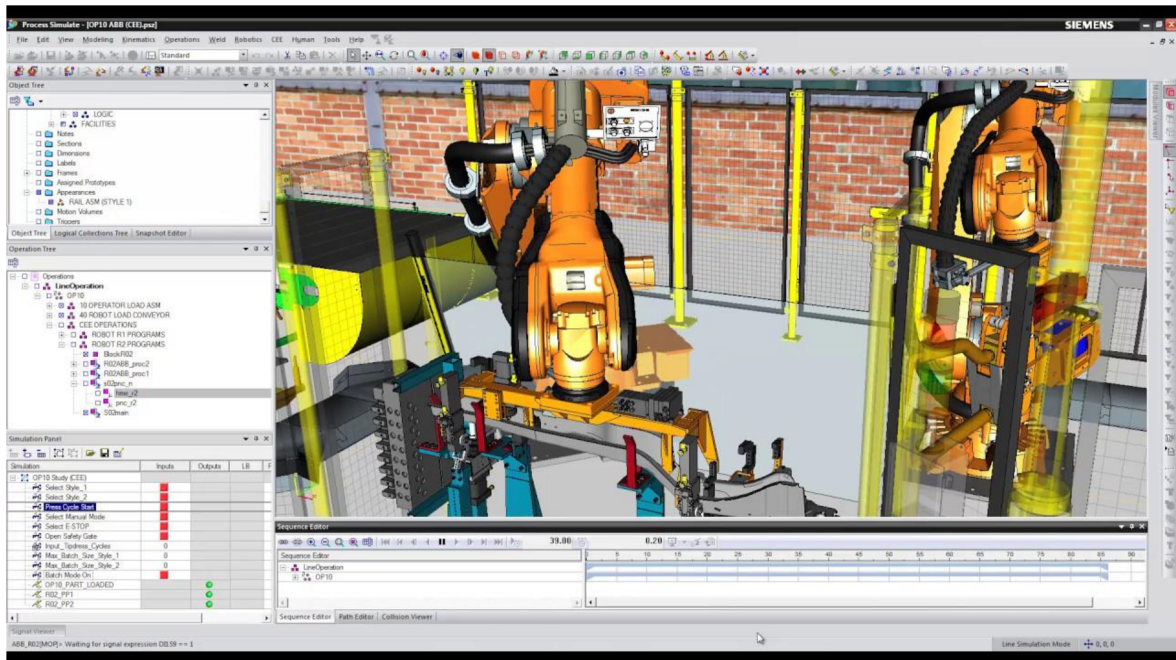
Tecnomatix je komplexní portfolio digitálních výrobních řešení, která pomáhají digitalizovat výrobu. Siemens Tecnomatix prezentuje jako digitální továrnu, v roce 2012 Tecnomatix zabíral necelou polovinu softwarového portfolio společnosti Siemens. [20, 21]

Tecnomatix Process Simulate

Process Simulate tvoří společně s Plant Simulation portfolio Tecnomatix. Process Simulate se soustředí na simulaci a automatizaci výrobních procesů. Pomocí nástroje Process Simulate mohou výrobci vytvořit digitální reprezentaci své výrobní linky a simulovat na ní různé scénáře s cílem optimalizovat své procesy, identifikovat a řešit potenciální problémy, snížit náklady a zvýšit produktivitu. Software umožňuje uživatelům vytvářet 3D modely výrobních systémů, simulovat pohyb materiálů a výrobků a analyzovat výkonnost výrobního procesu. Lze jej také použít pro plánování procesů. [18, 20, 21, 38]

Celkově tedy Tecnomatix Process Simulate pomáhá výrobcům snižovat rizika a náklady spojené se zaváděním nových výrobních procesů tím, že jim poskytuje virtuální prostředí, ve kterém mohou své nápady testovat a optimalizovat. Tím může společností pomoci zvýšit efektivitu, snížit plýtvání a zlepšit celkovou kvalitu a produkci. [18, 20, 21, 38]

Prostředí programu Tecnomatix Process Simulate je vidět na obrázku č. 14.



Obrázek 14 – Tecnomatix Process Simulate [15]

Tecnomatix Plant Simulation

Plant Simulation je softwarovým nástrojem určeným pro simulaci událostí. Lze díky němu optimalizovat tok materiálů, využití zdrojů a logistiku plánování závodu. Uživatelům také umožňuje analyzovat složité výrobní, logistické a materiální systémy. Pomáhá také se snižování časů cyklů, úrovní zásob a potřebných nákladů. Plant Simulation podporuje řadu modulů, mezi které patří doplňky pro průmysl automobilový, elektronický, farmaceutický nebo potravinářský. [36, 37]

Nejčastějším úkolem simulace provozu je předpovědět, jak se bude systém chovat (pomocí identifikace propustnosti, úzkých míst, výrobních cyklů, spotřeby energie atd.). Simulace uvažuje i s náhodnými faktory (poruchy, opravy atd.). [36, 37]

Obrázek č. 15 obsahuje zobrazení simulované linky v Plant Simulation.



Obrázek 15 – Prostorově programů Tecnomatix Plant Simulation [16]

Porovnání Process Simulate a Plant Simulation

Siemens Plant Simulation se tedy zaměřuje na simulaci a optimalizaci toku materiálu a využití zdrojů v produkčních a logistických systémech, zatímco Siemens Process Simulate se zaměřuje na návrh a ověřování výrobních procesů ve virtuálním prostředí. [36, 37]

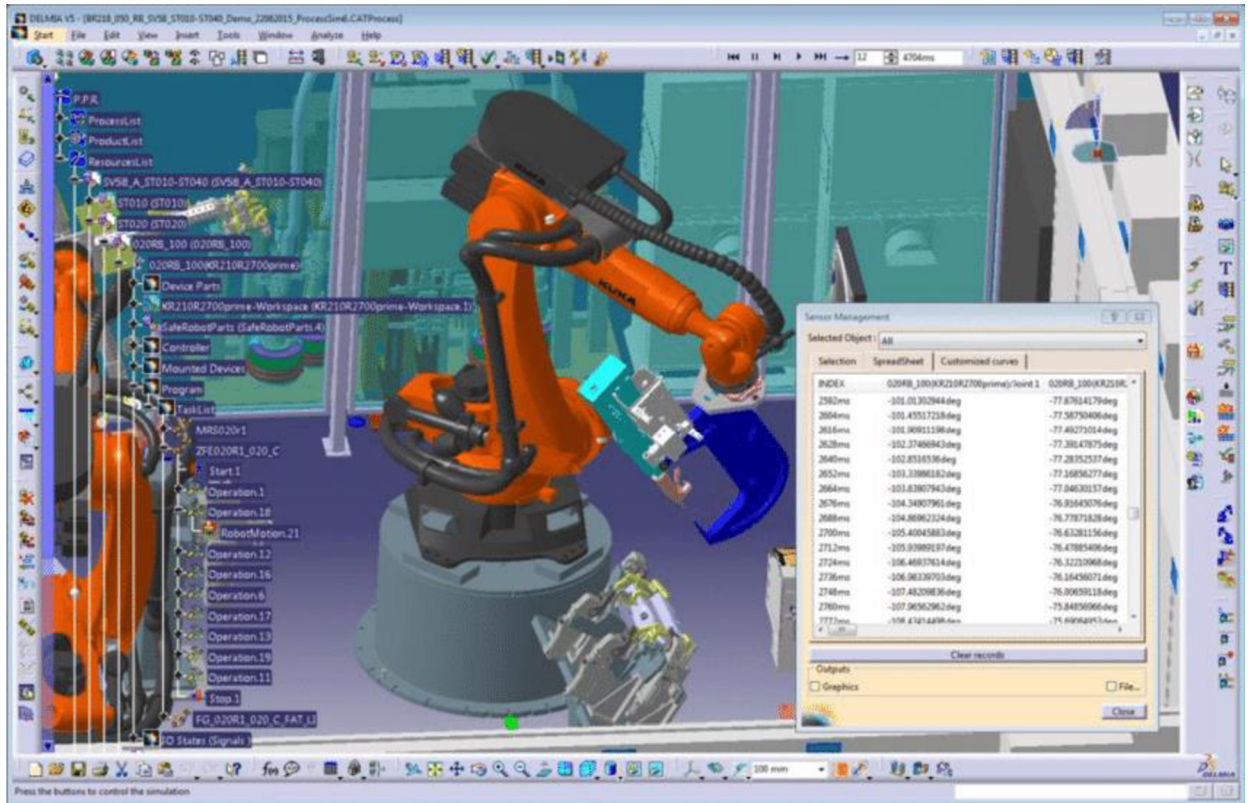
3.3.2 Řešení ostatních výrobců

Siemens není jediným, kdo působí na poli digitálních dvojčat. Vybrání konkrétního produktu záleží na specifických požadavcích zákazníka a také na tom, s jakou společností má již zkušenost (mohl například s nějakou navázat spolupráci již před dlouhou dobou a poté má tato společnost mnohem větší šanci na to, že si zákazník pořídí řešení digitálních dvojčat právě od ní). [17,18]

Mezi ostatní software, který podporuje vytváření digitálních dvojčat a provádění jejich virtuálního zprovoznění (alespoň do určité míry) patří [17,18]:

- RF:Suite (EKS InTech)
- Emulate3D (Rockwell)
- Experior (xcelgo)
- Robot Studio (ABB)
- CIROS (FESTO)

- FASTSUITE (CENIT)
- Delmia (Dassault systems) (pro porovnání s prostředím softwaru Siemensu slouží obrázek č. 16, na kterém se ukazuje naprosto odlišný přístup vývojářů k UI)
- Simumatik



Obrázek 16 – Screenshot z aplikace DELMIA [24]

4 Analytická část

Analytická část práce rozebírá použití digitálních dvojčat na konkrétních příkladech z praxe.

Je z části založena na podkladech poskytnutých panem Františkem Podzimkem ze společnosti Siemens. Pan Podzimek ze své pozice Head of Digital Enterprise & Business Development poskytl autorovi značné množství materiálů, které pomohly ke komplexnímu porovnání použití digitálních dvojčat a za to mu patří velký dík.

Autor práce navázal s panem Podzimkem komunikaci v návaznosti na video „ F. Podzimek, Siemens, R. Mitana, Sidat Digital, F. Šlosiar, SECOP - Digitální dvojče v praxi“ a poté s ním řešil téma práce a podklady pro práci na několika sezeních. Tím, že se v teoretických východiscích z velké části rozebírají právě nástroje společnosti Siemens, tak byly tyto podklady velmi přínosné. Analytická část tyto z povahy nekonzistentní podklady shrnuje a analyzuje. Porovnává případové studie komerčních řešení od firmy Siemens s případovými studiemi z odborné literatury. Tímto filtruje míru neobjektivních dat, která by jinak mohla vzniknout, pokud by se použily čistě materiály komerční (firma by se například nemusela chtít prezentovat špatnými výsledky).

Autor práce provedl rozsáhlou rešerši literatury s cílem nalezení relevantních článků a studií vhodných pro porovnání. Nalezení kvalitních podkladů bylo klíčové pro podpoření zjištění, která vyplynula z komerčních studií. Autor důkladně prošel akademické databáze a k nalezení použil klíčová slova související s tématem. Cílené články musely být aktuální a relevantní pro výzkum.

Po nalezení několika studií si je autor důkladně přečetl, určil jejich relevanci pro výzkum a analyzoval jejich obsah, aby se ujistil, že jsou v souladu s cíli jeho výzkumu. Celkově lze říci, že rešerše literatury hrála klíčovou roli při zajištění toho, aby autorův výzkum vycházel z pevných teoretických a empirických základů.

Pro demonstrování toho, že digitální dvojčata jsou aplikovatelná v různých odvětvích, rozebírá analytická část dva příklady – automobilový průmysl a výrobní linky v továrnách.

Autor určil pro rozebrání nekonzistentních podkladů následující strukturu:

- Upřesnění zaměření průmyslu
 - Název řešení a označení (komerční studie / studie z literatury) + popis
 - Výzvy k řešení
 - Průběh řešení

- Výsledek implementace digitálních dvojčat

Výše zmíněné rozdělení umožnilo analýzu případových studií, jejichž porovnání by bylo jinak kvůli rozdílným formám značně náročné.

Pro jedno průmyslové zaměření je vždy rozebráno několik komerčních případových studií a alespoň jedna studie z literatury.

4.1 Použití digitálních dvojčat v automobilovém průmyslu

Automobilový průmysl je pro implementaci digitálních dvojčat vcelku vhodným kandidátem. Data z něj jdou získávat způsobem, který není zásadně invazivní do výroby a zároveň často obsahuje mnoho procesů, kde je prostor pro optimalizaci. Často také mají závody k dispozici velké množství moderních nástrojů, které mohou být kompatibilní s digitálním dvojčetem.

Následující část rozebírá různé problémy, které firmy v automobilovém průmyslu měly, a které pomohla digitální dvojčata vyřešit.

4.1.1 Zefektivnění výroby v automobilovém závodu MG Motor India – komerční studie

MG Motor India (MGI) je dceřinou společností SAIC Motor Corporation Limited a specializuje se na výrobu automobilů. Společnost vyrábí automobilové díly, vozidla, a v montážní lince se nachází mnoho pohyblivých částí, včetně lakovny, která se zaměřuje na povrchové úpravy karoserie vozidla.

Výzvy k vyřešení

- Vizualizace výkonnostních parametrů, která se co nejvíce blíží reálnému času, za účelem určení produktivity jednotlivých strojů.
- Rozpoznání hlavních příčin, které vedou k překážkám ve výrobě.
- Vytvoření efektivních způsobů, jakými by bylo možné zvážit pravděpodobná omezení, a také to, jak moc jsou tyto omezení v komplexním prostředí výroby relevantní. Na základě nálezu vytvořit kořenovou analýzu příčiny nežádoucích událostí.

Průběh řešení

Tým se potýkal s překážkami ve výrobě kvůli automatizačním systémům, které byly v provozu více než 20 let a nyní již byly zastaralé. Stávající systémy neposkytovaly kompletní a spolehlivá data o výkonu v reálném čase a tým proto nemohl studovat určité procesy, jako třeba efektivnost jednotlivých strojů nebo data z doby, kdy byly systémy nefunkční. Řešení našel tým v softwaru MindSphere a Plant Simulation od Siemensu.

Výsledek implementace digitálních dvojčat

Implementace produktů úspěšně zvýšila výkon a produkci lakovny a umožnila týmu vidět v do té doby matoucích datech smysluplné informace. MGI díky projektu zvýšila propustnost lakovny o 15 %. Pomocí napojení MindSphere tým propojil izolované prostředky a mohl započít s přenosem dat do cloudu. Tyto data pak byla analyzována a na jejich základě byl vytvořen ovládací panel, který zprostředkoval vizualizaci efektivity výrobních prostředků. Tento panel také poskytoval klíčové informace sloužící pro řízení výkonnosti lakýrny. Data byla použita i pro SWOT analýzu. [28]

4.1.2 Nasazení digitálního dvojčete v automobilové továrně v Burse, Turecku – studie z literatury

Autor studie hledal nejvhodnější místo, kde by mohl měřit efektivitu nasazení digitálních dvojčat. Po zvážení všech důležitých podmínek (velké množství dat, jejich neustálý tok, instalace v prostředí s moderními technologickými prvky) vybral pro sledování a implementaci automobilovou továrnu v Burse v Turecku.

Výzvy k řešení

- Zvýšení produktivity udržováním výrobní linky v optimálním stavu.
- Provádění analýz, které povedou ke zvýšení životnosti a trvanlivosti vyráběných materiálů.
- Umožnění okamžité reakce při výskytu mimořádné události.
- Testování a řízení různých scénářů díky virtuálním datům.
- Celkové zrychlení výroby a zvýšení kvality výrobků.

Průběh řešení

Výrobní proces automobilů se skládá z mnoha podprocesů a součástí. Při vytváření digitálního dvojčete autor upřednostnil scénáře, které se ve výrobě opakovaly nejčastěji.

Scénáře, které autor označil za vhodné ke zpracování, byly následující:

- Sledování a analýza teplot motorů v robotických ramenech.
- Sledování a analýza optimálního pracovního frekvenčního rozsahu CNC stroje.
- Sledování a analýza hustoty prachu v továrně.
- Sledování teploty v továrním prostředí za účelem zjistit, zdali nepoškozuje vozidla nebo citlivé materiály.

Po identifikování scénářů byl určen proces jejich sledování. Byla vytvořena vrstva pro generování a sběr dat z fyzického systému pomocí senzorů. Data byla poté přenesena pomocí protokolu MQTT a uložena v Apache Kafka pro analýzu. Pro stavové výpočty byl použit Apache Flink a pro vizualizaci platforma Unity. Zmíněné platformy s otevřeným zdrojovým kódem (Open Source⁵) byly vybrány pro svou vysokou transparentnost, dostupnost pro společný vývoj a možnosti inovace bez nutnosti vázání se na vývojáře komerčních řešení (neboť do platform, které jsou postaveny nad otevřeným zdrojovým kódem může přispívat kdokoliv).

Výsledek implementace digitálních dvojčat

První část studie měřila dobu odstávek před a po implementaci digitálního dvojčete. Měřené období bylo vždy šest měsíců. V tabulce č. 1 lze vidět doby odstávek před zavedením digitálního dvojčete.

	Doba odstávky (min)
Září 2020	192
Říjen 2020	191
Listopad 2020	187
Prosinec 2020	176
Leden 2021	196
Únor 2021	191
Celkem	1133

Tabulka 1 – Doby odstávek před zavedením digitálních dvojčat [33]

V tabulce č. 2 lze nalézt doby odstávek po zavedení digitálního dvojčete:

⁵ Jde o software, jehož zdrojový kód je volně dostupný a může být libovolně modifikován a distribuován kýmkoli.

	Doba odstávky (min)
Červenec 2021	29
Srpen 2021	25
Září 2021	23
Říjen 2021	22
Listopad 2021	21
Prosinec 2021	21
Celkem	141

Tabulka 2 – Doby odstávek po zavedení digitálních dvojčat [33]

Celkově byl rozdíl v času odstávek celých 992 minut, zmenšení času odstávek bylo tedy díky digitálnímu dvojčeti značné.

Druhé provedené měření se týkalo výkonů konkrétních vybraných strojů. Před implementací byly změřeny časy, které stroje potřebovaly na zvládnutí určených úkonů. Tyto časy lze vidět v tabulce č. 3.

	Potřebný čas na úkony (min)
Září 2020	10 842
Říjen 2020	10 895
Listopad 2020	10 766
Prosinec 2020	10 827
Leden 2021	10 909
Únor 2021	10 924
Celkem	65 163

Tabulka 3 – Požadovaný čas na úkony před zavedením digitálních dvojčat [33]

Časy po implementaci se nachází v tabulce č. 4:

	Potřebný čas na úkony (min)
Červenec 2021	10 252
Srpen 2021	10 205
Září 2021	10 226
Říjen 2021	10 191

Listopad 2021	10 187
Prosinec 2021	10 185
Celkem	61 246

Tabulka 4 – Požadovaný čas na úkony po zavedení digitálních dvojčat [33]

Z celkem 65 163 minut se potřebná doba pro odbavení stejného množství práce snížila na 61 246 minut, tedy o přibližně o 6,01 %. Implementace digitálního dvojčete tedy vedla ke značnému snížení prostojů (o 87,56 %) a zvýšení efektivity (o 6.01%). Projekt také zavedl předběžnou detekci poruch v systému a tím umožnil prodloužení jeho životnosti. [33]

4.2 Použití digitálních dvojčat ve výrobních linkách

Digitální dvojčata jsou i nástrojem přizpůsobitelným k řešení konkrétních problémů. Díky tomu je lze použít i v jinak běžných továrnách k identifikaci slabých míst a k jejich odstranění. Určení a odstranění slabých míst vede ke zvýšení produktivity celé továrny – ovšem jejich manuální identifikace (bez použití moderních technologií) je velmi náročná, a proto jsou zde digitální dvojčata skvělým pomocníkem.

4.2.1 Použití digitálního dvojčete v továrně na výrobu řídicích prvků Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE) – komerční studie

Siemens GWE je velkou továrnou na výrobu řídicích prvků, která se nachází v Erlangenu v Německu a má přibližně 1 200 zaměstnanců. Tím, že továrna patří přímo firmě Siemens, tak je průkopníkem, co se digitalizace výroby týče. V továrně je využíváno velké množství technologií z portfolia Siemens Digital Enterprise a díky tomu slouží i jako příklad toho, jak lze výrobu pomocí těchto produktů zlepšit a zefektivnit. Hlavními výrobky továrny jsou CNC systémy SINUMERIK, měniče SINAMICS, systémy pro řízení pohybu SIMOTION a jejich různé varianty.

Hlavním problémem, se kterým se továrna potýkala, bylo zpracování jednotlivých várek výrobků – továrna totiž nějakou dobu shromažďovala příchozí objednávky a až poté je zpracovávala – což ovšem vytvářelo logistické problémy. Velká šarže znamenala malou dobu přípravy (protože bylo k montáži zapotřebí stále stejných dílů), ale byla náročná pro logistiku, zatímco naopak malá šarže byla pro logistiku méně náročná, ale vyžadovala přestavování částí továrny v krátkých časových cyklech. Cílem bylo tedy zanalyzovat a zjistit ideální velikost várky. Také bylo nutné stanovit, jaké důsledky určená velikost várky přinese do výroby, a nalézt ideální výrobní nastavení, které bude brát v potaz všechny důležité parametry (kterých bylo 36).

Výzvy k řešení

- Zanalyzování a zjištění ideální velikosti várky výrobků.
- Nalezení ideálního výrobního nastavení.
- Pomocí vyřešení výše zmíněných výzev zefektivnit výrobu.

Průběh řešení

Projekt byl zahájen konzultacemi, jejichž cílem bylo zjistit více informací o problémech, které zpomalují a snižují efektivitu výroby. Také bylo nutné zjistit více informací o parametrech a cílech výroby.

Ve druhém kroku procesu byl vytvořen simulační model podstatných dílů, který byl zároveň i porovnán se skutečností, aby byla zajištěna přesnost tohoto modelu. Ve třetím kroku bylo zanalyzováno a také optimalizováno tisíce různých scénářů pomocí nejmodernějších metod Data Analytics a AI algoritmů.

Výsledek implementace digitálních dvojčat

Výsledkem tohoto řešení bylo značné zefektivnění výroby a vyřešení konkrétního, výše popsaného problému – a to pomocí nalezení optimální velikosti várek a sepsání pokynů pro její implementaci. Logistika linky byla výrazně zlepšena – nyní je ve špičce potřeba až o 17 % méně materiálu, linka má vyšší výkon a zkrátí se potřebný výrobní čas (potenciálně až o 20 minut denně). Pro výrobu je nyní nutné také až o 42 % méně palet. [26]

4.2.2 Zefektivnění výroby kompresorů ve firmě Secop – komerční studie

Firma Secop, s. r. o. je světovým hráčem na trhu výroby kompresorů. Elektromotory a kompresory pro průmyslové chlazení a automobilový průmysl vyrábí na Slovensku pomocí své dceřiné společnosti Nidec Global Appliance Slovakia.

Důvodem k zavedení digitálních dvojčat byla potřeba identifikace vzniku problémů, které měly vliv na snížení produkce výrobní linky. Cílem projektu byla již zmíněná identifikace a eliminace příčin blokování a na základě vyřešení těchto problémů zvýšení produkce o 15 %.

Výzvy k řešení

- Minimalizování ztráty z prostojů ve výrobě.
- Snížení nákladů montážní linky.
- Zefektivnění výrobních procesů.

Průběh řešení

Digitální dvojče bylo vytvořeno společnostmi SOVA Digital a SIDAT Digital v softwarovém prostředí Plant Simulation od společnosti Siemens. Součástí projektu byla sensorika, sběr dat, PLC řídicí jednotky, digitalizace dat z výroby, vytvoření digitálního

dvojčete a následné generování výstupů pro identifikaci problémových míst ve výrobě. Počet realizovaných opatření přesáhl 60. Jako vstupní data sloužily pohyby palet a stavy strojů.

Na začátku realizace byl definován obsah projektu, posoudil se aktuální stav výroby a zhodnotila se investice návratnosti projektu. Po schválení se odsouhlasil časový harmonogram a řešení se začalo realizovat. Dále se doplnily chybějící hardwarové komponenty nutné pro sběr dat (RFID hardware a komunikační PLC hardware). Z důvodu toho, že nebylo možné využít existující hardwarovou ani softwarovou infrastrukturu, postavil dodavatel centrální bod, ve kterém se shromažďují všechna potřebná data. Cílem bylo vyhnout se big data a analyzovat a soustřeďovat pouze data nevyhnutelně nutná k dosažení splnění výzev. Na vyvinutém digitálním dvojčeti probíhá neustálá datová analýza a algoritmy na základě aktuálních i historických dat identifikují možné příčiny blokování výrobní linky.

Je důležité zmínit, že doba realizace projektu byla prodloužena z původně plánovaných osmi měsíců na dvanáct – a to především kvůli neočekávaným výzvám, které se při ní objevily. Konkrétně šlo o problém ztráty dat ve výrobní infrastruktuře, který se ovšem podařilo vyřešit a projekt byl i přesto úspěšný. Výše popsaná problematika ale dokazuje, že při implementaci je nutné počítat i s možným zpožděním.

Výsledek implementace digitálních dvojčat

Digitální dvojče umožnilo nejen nepřetržité sledování dat (a jejich vyhodnocování), ale i simulaci výroby či zkoumání výrobních procesů v digitální podobě v reálném čase.

V rámci zlepšení údržby závodu byl vytvořen LED panel s online vizualizací stavů procesů a případných poruch. Pro potřeby monitorování výroby byla vytvořena vizualizace, které vyhodnocuje a zobrazuje klíčové ukazatele výkonnosti podniku v patnáctisekundových intervalech a na kterou se mohou podívat různí účastníci výroby (mistři, údržba, procesní inženýři...).

Výsledkem implementace bylo také splnění hlavního cíle – a to zvýšení produkce o 15 %. [30, 31]

4.2.3 Optimalizace přidělování rentgenového prostoru v továrně Siemens Electronic Works Amberg, Germany – komerční studie

Továrna Siemens Electronics Works Amberg vyrábí produkty, které zahrnují řídicí systémy SIMATIC. Za rok vyrobí továrna přibližně 17 milionů produktů SIMATIC a co

bylo hlavní pro návrh digitálního dvojčete, produkt zde vyráběný má přes 1000 různých variant.

Digitální dvojče bylo implementováno na plánování využití dedikovaného rentgenového prostoru. Před implementací se plánoval provoz prostoru ručně – na základě několika parametrů (priorita objednávky, počet příchozích objednávek...) pracovník rozhodoval, jaký výrobek kdy do rentgenového prostoru půjde. Optimální plánování, které by využívalo potenciálu prostoru naplno, bylo pro lidské zaměstnance skoro nemožné a zejména ve špičce byl rentgen slabým místem závodu – proto bylo nutné přidělování prostoru rentgenu zoptimalizovat.

Výzvy k řešení

- Vyšetření a navržení vylepšení toho, jak lépe plánovat využití rentgenového prostoru.
- Při implementaci vzít v potaz velké množství parametrů (například příchozí objednávky, prioritu objednávky, rozpracované výrobky...).
- Výše zmíněným docílit zefektivnění výroby.

Průběh řešení

Za účelem adresování problému byl zahájen projekt využívající Digital Twin Operation Services, což jsou služby, které kombinují digitální dvojče výroby s online provozními daty. Bylo vytvořeno digitální dvojče rentgenové oblasti a připojeno k relevantním datovým zdrojům (například systém řízení zakázek a systém plánování). V rámci projektu se vyvinula snadno ovladatelná aplikace, která poskytla pracovníkům možnost spustit simulaci propojenou s optimalizačním algoritmem. Ten pošle nejnovější data z dílny do digitálního dvojčete a vypočítá a určí, jaká sekvence objednávek je nejlepší.

Výsledek implementace digitálních dvojčat

Zkrácení doby potřebné k nastavení prostoru rentgenu až o 50 %, zvýšení propustnosti vyhrazených linek až o 15 % a zlepšená celková účinnost rentgenového prostoru. [32]

4.2.4 Digitální dvojče průmyslové výrobní linky – studie z literatury

Studie byla provedena v akademickém prostředí, nicméně je v ní demonstrováno i to, jak by mohla být praktikována v reálných podmínkách, čímž si udržela relevantnost pro využití v analytické části.

Studie vznikla na půdě Slovenské technické univerzity v Bratislavě a byla zaměřena na výrobu pneumatických válců. Pro její účely byla vytvořena simulovaná fyzická výrobní linka (výrobu simulovala pomocí součástek menších rozměrů, ukázkou linky lze vidět na obrázku č. 17) a její digitální dvojče, které obsahovalo kopie všech procesů. Interakce výrobního zařízení a simulačního modelu měla za cíl přinést nový pohled na dynamiku výrobního procesu.



Obrázek 17 – Ukázka simulované fyzické výrobní linky, konkrétně stanice řízení výšky a procesní stanice [34]

Výzvy k řešení

- Provedení analýz, které povedou ke zjištění, jak je možné zefektivnit výrobu.
- Uvedení nových pohledů do výrobních procesů.

Průběh řešení

Simulovaná výrobní linka na výrobu pneumatických válců využívala stanice od firmy FESTO – celkem šlo o sedm stanic včetně zásobníku, manipulátoru, testu výšky obrobku, procesní stanice, třídící stanice a ruční montáže. Linka vyráběla tři typy válců s rozdíly ve velikosti vrtaného otvoru a barevně odlišenými tělesy pro lepší rozpoznávání jejich chování.

Digitální simulační model linky byl vytvořen pomocí softwaru Plant Simulation společnosti Siemens. Pro zpracování přenosu informací byl použit OPC⁶ datový server od Siemensu. Každý proces byl podrobně zmapován, aby digitální dvojče mohlo správně interpretovat nasbíraná data. Digitální dvojče používalo časová razítka k nastavení průběžných hodnot každého procesu a k nastavení správných hodnot v simulačním modelu.

Výsledek implementace digitálních dvojčat

K nalezení optimálního sledu operací ve výrobním plánu byl použit genetický algoritmus s konečným cílem minimalizovat celkovou dobu výroby. Algoritmus navrhl úpravu simulačního modelu. Po aplikování změny na digitálním dvojčeti a poté i na skutečném systému došlo ke zkrácení výrobního času o 5,2 % oproti času výroby před implementací digitálního dvojčete.

Popsaný způsob zajišťuje flexibilitu v přizpůsobování se změnám a zvyšuje výkon výroby. Vytvořené digitální dvojče lze přizpůsobit různým výrobním oblastem, včetně prediktivní údržby a optimalizaci výroby pro minimalizaci nutných zdrojů. [34]

⁶ Komunikační protokol využívaný jako jednotné komunikační rozhraní mezi hardware a software produkty průmyslové automatizace.

5 Výsledky a diskuze

Vzhledem k množství informací, které ohledně využití digitálních dvojčat ve výrobě vznikají, se může potenciální zájemce o tyto technologie cítit ztracen. Práce proto na následujících stránkách nabízí jednotné místo, kde zhodnocuje nástroje pro digitální dvojčata ve výrobě a porovnává jejich následné využití v praxi.

5.1 Zhodnocení nástrojů pro digitální dvojčata ve výrobě

Nástrojů pro digitální dvojčata je velké množství, a výběr konkrétního řešení záleží na požadavcích zákazníka a na tom, jestli již nějaké moderní technologie používá a případně od jakého výrobce. Na evropském trhu je jedním z největších hráčů firma Siemens, existují ovšem i řešení od jiných výrobců či je možné použít řešení nekomerční a otevřená s přístupem Open Source, který je značen tím, že jeho zdrojový kód je veřejně dostupný a uživatel si ho může případně libovolně upravit.

5.1.1 Řešení Siemens – NX a Tecnomatix

Řešení Siemensu jsou vhodná pro firmy, které nemají žádné předchozí řešení užívající Průmysl 4.0 a které tudíž nejsou vázány na implementace z minulosti, které by nový projekt mohly zpozdit (např. kvůli špatné kompatibilitě). V provedení řešení často pomáhá partner, který má už se softwarem firmy Siemens zkušenost (a může tak doporučit správnou formu implementace).

NX a NX Mechatronic Concept Designer

NX je CAD/CAM/CAE program, který slouží hlavně pro návrhy a modelování. Je vhodný k podpoře činností v konstrukci a výrobě a má velkou škálu funkcí – provádění ideových návrhů, výpočtů, simulací, tvorby výkresové dokumentace a mnoho dalšího. Doplňující NX Mechatronic Concept Designer pak umožňuje vytvářet nad modely simulace.

Tecnomatix Process Simulate a Tecnomatix Plant Simulation

Tecnomatix je komplexní portfolio digitálních výrobních řešení a Siemens ho prezentuje jako sofistikovanou digitální továrnu. Jeho část, Tecnomatix Process Simulate, slouží k plánování, simulaci a automatizaci výrobních linek a logistických procesů. Díky možnostem vytvářet 3D modely, simulace materiálu a analýzy výkonnosti výrobních procesů pomáhá Tecnomatix Process Simulate firmám se zvýšením efektivity, optimalizací

využití materiálu, a i celkově s optimalizací zdrojů celého závodu. Tecnomatix Plant Simulation se zaměřuje na simulaci a optimalizaci toku materiálu v závodu a využití zdrojů v produkčních a logistických systémech.

5.1.2 Ostatní řešení a Open Source

Kromě výše zmíněných řešení je také možné použít přístupy jiných výrobců – například pokud má zákazník specifický problém, který lze vyřešit jenom pomocí specializovaného produktu, nebo pokud již se zmíněnou firmou navázal spolupráci v minulosti a z toho důvodu jí důvěřuje. Mezi tato řešení patří mj. RF:Suite (EKS InTech), Emulate3D (Rockwell) nebo CIROS (FESTO).

Také je možné vyvinout řešení s pomocí Open Source. Firma využije veřejně dostupné Open Source nástroje, aby si nad projektem zajistila absolutní kontrolu. Když by například potřebovala nějakou funkci, kterou nástroj nyní nemá, může si ji sama vyvinout a nemusí se spoléhat na cizí vývojáře komerčního software.

5.2 Porovnání výsledků projektů

5.2.1 Automobilový průmysl

V porovnání řešení z automobilového průmyslu se prokázalo, že digitální dvojčata jsou pro něj vhodným nástrojem. Když porovnáme rozebraná řešení, můžeme nalézt několik podobných výzev, které chtěli autoři řešit. Jde hlavně o zefektivnění výroby a o identifikaci toho, co výrobu zpomaluje. U obou těchto výzev došlo pomocí digitálních dvojčat ke zlepšení.

Zároveň také digitální dvojče přineslo obohacení, které se netýkalo jen čistého zvýšení efektivity produkce. Zavedením analýz dat se zaměstnancům značně ulehčila a zefektivnila rutinní práce (pomocí například vizuálního panelu, kde vidí podstatná data na jednom místě) a také se výroba značně pojistila do budoucna díky zavedení předběžné detekce poruch. Ať už šlo tedy o zlepšení výsledků výroby, nebo i o zlepšení okolností výroby, digitální dvojče zde bylo vhodným pomocníkem.

V tabulce č. 5 můžeme vidět zmíněné projekty shrnuté.

Projekt	Výzvy	Výsledek implementace
Zefektivnění výroby v automobilovém závodu MG Motor India	Zlepšení špatné propustnosti lakovny.	Zvýšená propustnost lakovny o 15 % , analýza dat z výroby v reálném čase, vytvoření vizuálního panelu.
Nasazení digitálního dvojčete v automobilové továrně v Burse, Turecku	Celkové zrychlení výroby. Zvýšení produktivity udržováním výrobní linky v optimálním stavu.	Zvýšení efektivity výroby o 6,01 % a snížení doby prostojů o 87,56 % , zavedení předběžné detekce poruch v systému.

Tabulka 5 – Shrnutí projektů v automobilovém průmyslu (vlastní zpracování)

5.2.2 Výrobní linky

V rozebrání řešení založených na výrobních linkách se prokázalo, že kromě větších záměrů jde s digitálními dvojčaty operovat i pro problémy zcela specifické. U dvou řešení byly výzvy speciálního rázu (zjištění ideální velikosti várek a zlepšení plánování využití rentgenového prostoru) a i zde digitální dvojčata pomohla k jejich vyřešení. Shrnuté projekty, jejich výzvy a výsledky lze najít v tabulce č. 6.

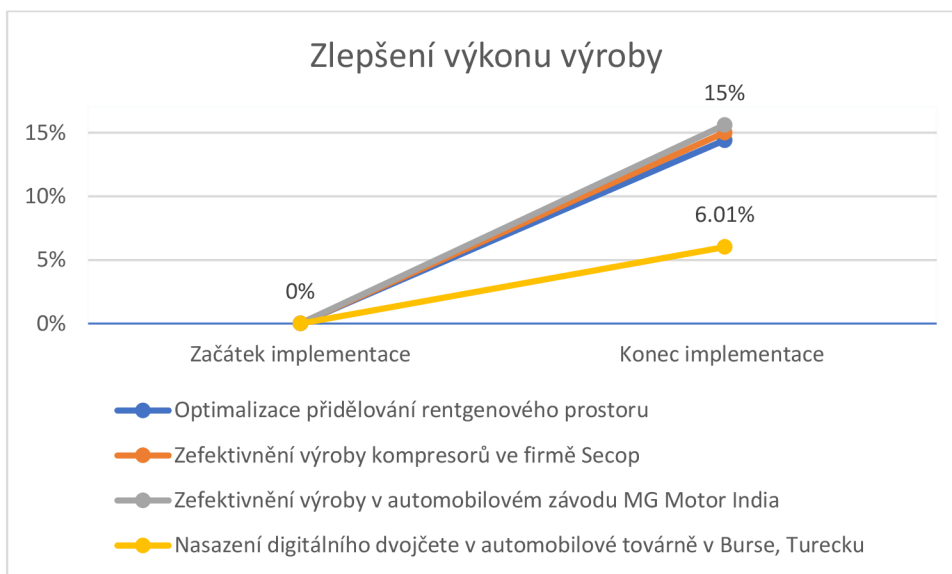
Projekt	Výzvy	Výsledek implementace
Použití digitálního dvojčete v továrně na výrobu řídicích prvků Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE)	Zanalyzování a zjištění ideální velikosti várek výrobků. Pomocí zjištění zefektivnění výroby.	Potřeba o 17 % méně materiálu , potřebný výrobní čas zkrácen až o 20 minut denně.
Zefektivnění výroby kompresorů ve firmě Secop	Minimalizování ztráty z prostojů. Zvýšení produktivity udržováním výrobní	Zvýšení produkce o 15 % , vytvoření LED panelu s online vizualizací výroby, umožnění nepřetržitého sledování a vyhodnocování dat a zkoumání výrobních procesů digitálně.

	linky v optimálním stavu.	
Optimalizace přidělování rentgenového prostoru v továrně Siemens Electronic Works Amberg, Germany	Vyšetření a vylepšení plánování použití rentgenového prostoru. Výše zmíněným docílit zefektivnění výroby.	Snížení doby nastavení prostoru rentgenu až o 50 %, zvýšení propustnosti vyhrazených linek až o 15 %, zlepšená celková účinnost rentgenového prostoru.
Digitální dvojče průmyslové výrobní linky	Provedení analýz vedoucích ke zjištění, jak je možné zefektivnit výrobu. Uvedení nových pohledů do výrobních procesů.	Zkrácení výrobního času o 5,2 % , zvýšení výkonu výroby, možnost prediktivní údržby a optimalizace výroby.

Tabulka 6 – Shrnutí projektů zaměřených na optimalizaci výrobních linek (vlastní zpracování)

Vzhledem k pozitivním výsledkům i u specifických problémů je možné říci, že digitální dvojčata mohou sloužit jak pro celkové analyzování problémů výroby, tak i pro analýzu a navržení zlepšení již známého problému. Díky digitálním dvojčatům došlo k identifikaci problému (u řešení, kde ještě problém nebyl rozpoznán) a k odstranění slabých míst výroby, což vedlo ke zvýšení produktivity a ke splnění cílů, za jakými byla digitální dvojčata implementována. Je tedy možné říci, že i pro vyřešení výše zmíněných problémů jsou digitální dvojčata vhodná.

Díky tomu, že u několika rozebraných případových studií bylo sledováno prvky, které vedly ke zlepšení výkonu výroby, lze vybraná řešení a jejich výsledky srovnat. V grafu č. 1 je vidět, že nezávisle na typu projektu a jeho zaměření digitální dvojčata vždy přinesla do výroby zlepšení.



Graf 1 – Zobrazení, jak digitální dvojčata zlepšila výrobu (vlastní zpracování)

Tento poznatek je klíčový, neboť demonstruje, že digitální dvojčata jsou technologií vhodnou pro širokou škálu projektů a problémů.

6 Závěr

V práci se ukázalo, že digitální dvojčata jsou pomocníkem univerzálním a vhodným pro řešení pestré škály problémů, které mohou ve výrobě nastat.

Teoretická část se věnovala uvedení do tématu digitálních dvojčat, představení nástrojů na jejich realizaci a také zvážení kladů a záporů digitálních dvojčat.

V analytické části práce představila a rozebrala několik implementací digitálních dvojčat z praxe. Jasně se v ní ukázalo, že použitím digitálních dvojčat se výroba zefektivňuje – firma ovšem musí být na změnu interně připravena. Výsledky také poukazují na fakt, že digitální dvojčata jsou dobře využitelná napříč různými odvětvími, ale je nutné počítat i s tím, že mohou nastat při implementaci neočekávané problémy – může například dojít ke zpoždění spuštění řešení o několik měsíců, a na to musí být firma připravena, jinak může přijít ke značné finanční ztrátě. Práce je díky zahrnutí příkladů z praxe i literatury transparentním důkazem výhodnosti použití digitálních dvojčat ve výrobcích.

Práce splnila určené cíle – analyzovala použití digitálních dvojčat ve výrobě na příkladech z praxe, navrhla, kde je využití digitálních dvojčat efektivní, a na základech srovnání programů a přístupů k digitálním dvojčatům ve výrobě může sloužit jako jednotný přehled spojující dohromady různorodé informace (hlavně co se týče jejich nástrojů, výhod, omezení a využití).

Na práci by mohlo být navázáno rozbory dalších případových studií. Díky hlubším a četnějším rozborům by mohla například vyplynout odvětví, do kterých by se digitální dvojčata nehodila. Práce ovšem podobné poznatky neobjevila, a jejím hlavním sdělením tedy je, že digitální dvojče je vhodným pomocníkem napříč průmyslovými odvětvími.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČESKÁ SPOŘITELNA. *Digitální dvojčata: Technologický trend pro nejbližší budoucnost* [online]. [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.csas.cz/cs/firmy/articles/digitalni-dvojcata>
- [2] TECHNODAT. *Průmysl 4.0* [online]. 2018 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.prumysl-4.cz/>
- [3] LACKO, Ľuboslav. *Digitální dvojče jako pilíř konceptu Průmyslu 4.0* [online]. CFOworld, 2019 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.cfoworld.cz/clanky/digitalni-dvojce-jako-pilir/>
- [4] MICROSOFT AZURE. *Azure Digital Twins demo | Creating replicas of real-world environments* [online]. Youtube, 2020 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ScmK-bKJ4MI>
- [5] BAANDERS, ALEXBUCKGIT, V-GWEINSTOCK a V-KENTS. *Azure Digital Twins Explorer (Preview)* [online]. Microsoft Docs, 2022. [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/cs-cz/azure/digital-twins/concepts-azure-digital-twins-explorer>
- [6] FISCHER, Eva. *ESys-Demonstrator in NX or Mechatronics Concept Designer* [online]. FAPS [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.faps.fau.eu/aussysteme/nx-mechatronics-concept-designer/>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *Výhody a rizika technologie digitálních dvojčat*. [online]. automatizace.hw.cz, 2022 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/vyhody-a-rizika-technologie-digitalnich-dvojcat.html>
- [8] -DS. *Co je digitální dvojče a proč je užitečné*. [online]. COMPUTERWORLD, 2019 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.computerworld.cz/clanky/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne/>
- [9] IBM INTERNET OF THINGS. *Introduction to Digital Twin: Simple, but detailed*. [online]. Youtube, 2017 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=RaOejcczPas&t>
- [10] A. HYRE, G. HARRIS, J. OSHO, M. PANTELIDAKIS, K. MYKONIATIS, J. LIU. *Digital twins: Representation, Replication, Reality, and Relational (4Rs)*, Manufacturing Letters, Volume 31, 2022, Pages 20-23, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.12.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846321000870>)

- [11] A. ANBALAGAN, B. SHIVAKRISHNA, K. S. SRIKANTH. *A digital twin study for immediate design / redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation*, Materials Today: Proceedings, Volume 46, Part 17, 2021, Pages 8209-8217, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.209>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321022380>)
- [12] D. G. BROO, M. BRAVO-HARO, J. SCHOOLING. *Design and implementation of a smart infrastructure digital twin*, Automation in Construction, Volume 136, 2022, 104171, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104171>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522000449>)
- [13] L. LI, B. LEI, C. MAO. *Digital twin in smart manufacturing*, Journal of Industrial Information Integration, Volume 26, 2022, 100289, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100289>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X21000868>)
- [14] MAŘÍK, Vladimír a kol. 2016. *Průmysl 4.0 : výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press. ISBN 978-80-7261-440-0
- [15] INOPROD. *TECNOMATIX PROCESS SIMULATE*. [online]. Youtube, 2017 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Chsg5GhGeIM>
- [16] KONSTRUKTÉR. *Tecnomatix 12 přináší pokročilé simulace výrobních technologií*. [online]. konstrukter.cz, 2014 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/siemens-plm-software-vydal-novou-verzi-tacnomatixu/>
- [17] DUŠEK, Roman. *Virtuální zprovoznění části výrobní linky*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [18] KALINA, Daniel. *Simulace výukových sestav strojů s využitím NX Mechatronics Concept Designer*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [19] SIEMENS. *Modeling Technology Platform* [online]. Siemens [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/mechanical-design/modeling-technology-platform.html>
- [20] SIEMENS. *Tecnomatix* [online]. Siemens [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/tecnomatix/>
- [21] KONSTRUKTÉR. *Tecnomatix #1: Co je digitální továrna?* [online]. konstrukter.cz, 2012 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/tecnomatix-1-co-je-digitalni-tovarna/>

- [22] RF WIRELESS WORLD. *Advantages of Digital Twin | disadvantages of Digital Twin* [online]. RF Wireless World [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Digital-Twin-Technology.html>
- [23] SIEMENS. *Mechatronic Concept Design* [online]. Siemens [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/mechanical-design/mechatronic-concept-design.html>
- [24] GADALETA, Michele. *5 Delmia Robotics screenshot with robots trajectory data sensed during the simulation* [online]. ResearchGate, 2018 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Delmia-Robotics-screenshot-with-robots-trajectory-data-sensed-during-the-simulation_fig24_342276596
- [25] TPV GROUP. *NX CAD/CAM/CAE Posouvá vývoj produktů díky vysoce výkonnému integrovanému řešení pro návrh, simulaci a obrábění* [online]. TPV group s.r.o. [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://www.tpvgroup.cz/nx-popis/>
- [26] SIEMENS. 2020. *Siemens – Gerätewerk Erlangen (GWE) Simulation-driven optimization of a production line*. [cit. 2023-02-05].
- [27] SIEMENS. 2021. *Manroland Goss, Machine development with digital twin*. [cit. 2023-02-05].
- [28] SIEMENS. 2022. *AUTOMOTIVE, MG Motor India*. [cit. 2023-02-05].
- [29] SIEMENS. 2022. *Siemens Motorenwerk Bad Neustadt, DE – CNC robots virtually integrated & optimized*. [cit. 2023-02-05].
- [30] CONTROL ENGINEERING ČESKO. 2020. *Využití digitálního dvojčete při výrobě kompresorů. CONTROL ENGINEERING ČESKO. 2020(01/02)*.
- [31] NÁRODNÍ CENTRUM PRŮMYSLU 4.0. *F. Podzimek, Siemens, R. Mitana, Sidat Digital, F. Šlosiar, SECOP - Digitální dvojče v praxi* [online]. Youtube, 2021 [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=HscjHrbpJas>
- [32] SIEMENS. 2022. *Optimize machine allocation with Digital Twin Operation Services (Electronic Works Amberg, Germany)*. 2022 [cit. 2023-03-03].
- [33] MENDI, Arif Furkan. *A Digital Twin Case Study on Automotive Production Line*. *Sensors* 2022, 22, 6963, <https://doi.org/10.3390/s22186963>. (<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6963>)
- [34] J. VACHÁLEK, L. BARTALSKÝ, O. ROVNÝ, D. ŠIŠMIŠOVÁ, M. MORHÁČ, M. LOKŠÍK. *The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0*

concept, 2017 21st International Conference on Process Control (PC), Strbske Pleso, Slovakia, 2017, pp. 258-262, <https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976223>.

(<https://ieeexplore.ieee.org/document/7976223>)

[35] SIEMENS. *Mechatronics Concept Designer - Timeline UI: Timeline UI change mechatronics.png* [online]. Siemens, 2019 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z:

<https://community.sw.siemens.com/s/article/mechatronics-concept-designer-timeline-ui>

[36] VLADIMIRM. *What is difference between process designer and plant simulation?*

[online]. Siemens, 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z:

<https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061wu1aSAA/what-is-difference-between-process-designer-and-plant-simulation>

[37] SIEMENS. *Plant Simulation* [online]. Siemens [cit. 2023-03-13]. Dostupné z:

<https://www.plm.automation.siemens.com/store/cz-cz/trial/plant-simulation.html>

[38] SIEMENS. *Process Simulate* [online] Siemens [cit. 2023-03-13]. Dostupné z:

<https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/tecnomatix/products/process-simulate-software/>

[39] KŘIŠTOF, Jiří. *Lekce 1 - Úvod do UX* [online]. itnetwork.cz [cit. 2023-03-14].

Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/html-css/user-experience/uvod-do-ux>

8 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Část implementace linky pomocí digitální dvojčat, Siemens [23].....	14
Obrázek 2 – Prostředí NX Mechatronic Concept Designer [6].....	16
Obrázek 3 – Azure Digital Twins Explorer [5]	17
Obrázek 4 – Rozdělení produktů Siemens [17]	22
Obrázek 5 – Základní prostředí programu NX [19]	23
Obrázek 6 – Program NX po spuštění (vlastní zpracování)	23
Obrázek 7 – Lišta bez otevřeného souboru (vlastní zpracování).....	24
Obrázek 8 – Detail lišty (vlastní zpracování)	24
Obrázek 9 – Lišta při otevřeném souboru (vlastní zpracování).....	24
Obrázek 10 – Detail části lišty na záložce Domů (vlastní zpracování)	24
Obrázek 11 – Levá část programu NX (vlastní zpracování)	25
Obrázek 12 – Renderování kola v programu NX (vlastní zpracování)	26
Obrázek 13 – Simulace modelu pomocí NX Process Simulate [35].....	27
Obrázek 14 – Tecnomatix Process Simulate [15].....	28
Obrázek 15 – Prostředí programu Tecnomatix Plant Simulation [16]	29
Obrázek 16 – Screenshot z aplikace DELMIA [24]	30
Obrázek 17 – Ukázka simulované fyzické výrobní linky, konkrétně stanice řízení výšky a procesní stanice [34]	42

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Doby odstávek před zavedením digitálních dvojčat [33].....	35
Tabulka 2 – Doby odstávek po zavedení digitálních dvojčat [33]	36
Tabulka 3 – Požadovaný čas na úkony před zavedením digitálních dvojčat [33].....	36
Tabulka 4 – Požadovaný čas na úkony po zavedení digitálních dvojčat [33].....	37
Tabulka 5 – Shrnutí projektů v automobilovém průmyslu (vlastní zpracování)	46
Tabulka 6 – Shrnutí projektů zaměřených na optimalizaci výrobních linek (vlastní zpracování).....	47

8.3 Seznam grafů

Graf 1 – Zobrazení, jak digitální dvojčata zlepšila výrobu (vlastní zpracování).....48

8.4 Seznam použitých zkratk

NASA – National Aeronautics and Space Administration (americký národní úřad pro letectví a vesmír)

IBM – International Business Machines Corporation (americká mezinárodní technologická společnost)

AI – Artificial Intelligence (umělá inteligence)

IoT – Internet of Things (internet věcí)

CAD – Computer-Aided Design (počítačem podporované projektování)

CAM – Computer-Aided Design (počítačem řízená výroba)

CAE – Computer-Aided Engineering (počítačem podporované inženýrství)

UX – User Experience (uživatelský prožitek)

UI – User Interface (uživatelské rozhraní)

MCD – Mechatronics Concept Designer (modul programu NX)

PLC – Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)

RFID – Radio Frequency Identification (identifikace na rádiové frekvenci)

OPC – OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control (komunikační protokol)