

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

**Interoperabilné digitálne dvojča**

Učebný text

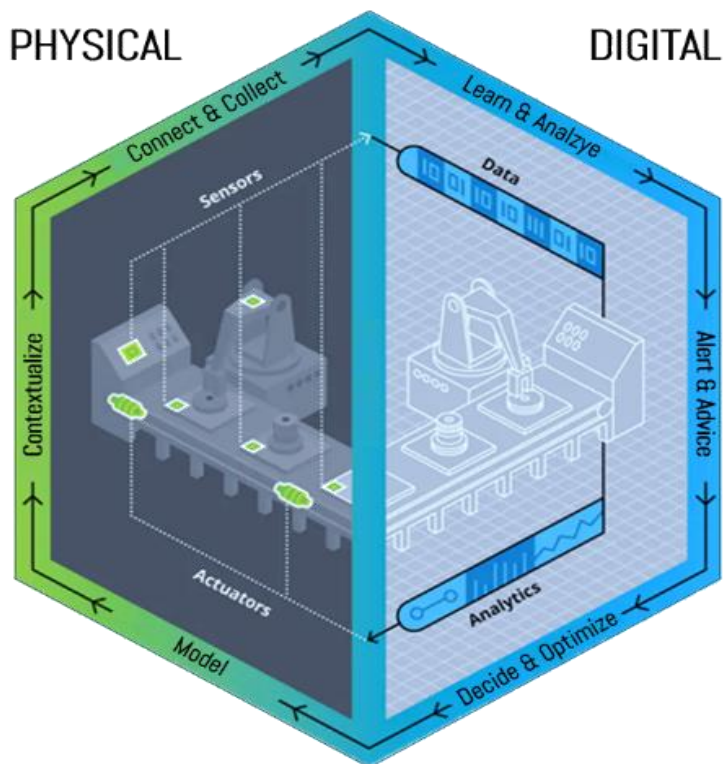
**Martin Pajpach**

## Obsah

1. Čo je to digitálne dvojča .....	2
2. Architektúra digitálneho dvojčaťa .....	6
3. Interoperabilita v Industry 4.0.....	8
A. RAMI4.0 .....	8
B. OPC UA .....	9
C. AAS .....	12
4. Využitie interoperability pri tvorbe digitálneho dvojčaťa .....	15
Referencie.....	18

## 1. Čo je to digitálne dvojča

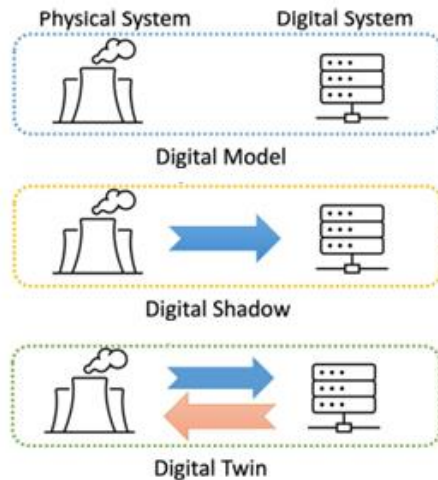
Digitálne dvojča, v angl. Digital Twin, skrátene DT, predstavuje čo najvernejšiu kópiu reálneho systému vo virtuálnom svete. K rapídneho rozvoju digitálnych dvojčiat, najmä v poslednom desaťročí, prispel značný pokrok v oblasti umelej inteligencie (AI), cloud-computingu, edge-computingu či analýza a práca s Big Data [1], [2].



Obrázok 1: Digitálne dvojča podľa Deloitte [3]

Ako možno vidieť na Obrázok 1, komunikácia dát je pri digitálnom dvojčati obojsmerná, čím vie nielen prijímať a spracovávať komplexné dáta z celého výrobného procesu, ale tiež na ne reagovať – či už formou zásahu vo výrobnom procese alebo aj len jednoduchou notifikáciou zodpovednej osoby. Digitálne dvojča však nenahrádza riadiaci systém, ktorý musí byť vysoko spoľahlivý a reagovať v jednotkách milisekúnd, prípadne rýchlejšie. Digitálne dvojča pracuje s veľkými objemami dát z celého výrobného procesu, vytvára si komplexný obraz a prináša nový pohľad využitím algoritmov umelej inteligencie. Môže sa pritom zameriavať na optimalizáciu výrobného procesu, prediktívnu údržbu, simuláciu „what-if“ scenárov, ... [1], [4]

V roku 2002 predstavili Michael Grieves a John Vickers koncept digitálnych dvojčiat ako základ pre riadenie životného cyklu produktu (PLM). V pôvodnom koncepte bolo DT charakterizované ako virtuálna reprezentácia fyzického produktu obsahujúca informácie o danom produkte. Dnes je pod takouto definíciou chápaný digitálny model, napr. CAD model súčiastky. Rozšírením digitálneho modelu o jednosmernú komunikáciu dát z fyzického produktu do virtuálnej reprezentácie získame digitálny tieň, napr. pri vizualizácii výrobného procesu. Posledným stupňom je digitálne dvojča, ktoré rozširuje digitálny tieň o obojsmerný tok dát, t.j. nielen z fyzického produktu do virtuálnej reprezentácie, ale aj z reprezentácie do produktu. Znázornenie rozdielu medzi digitálnym modelom, tieňom a dvojčat'om možno vidieť na Obrázok 2. [2], [4], [5]

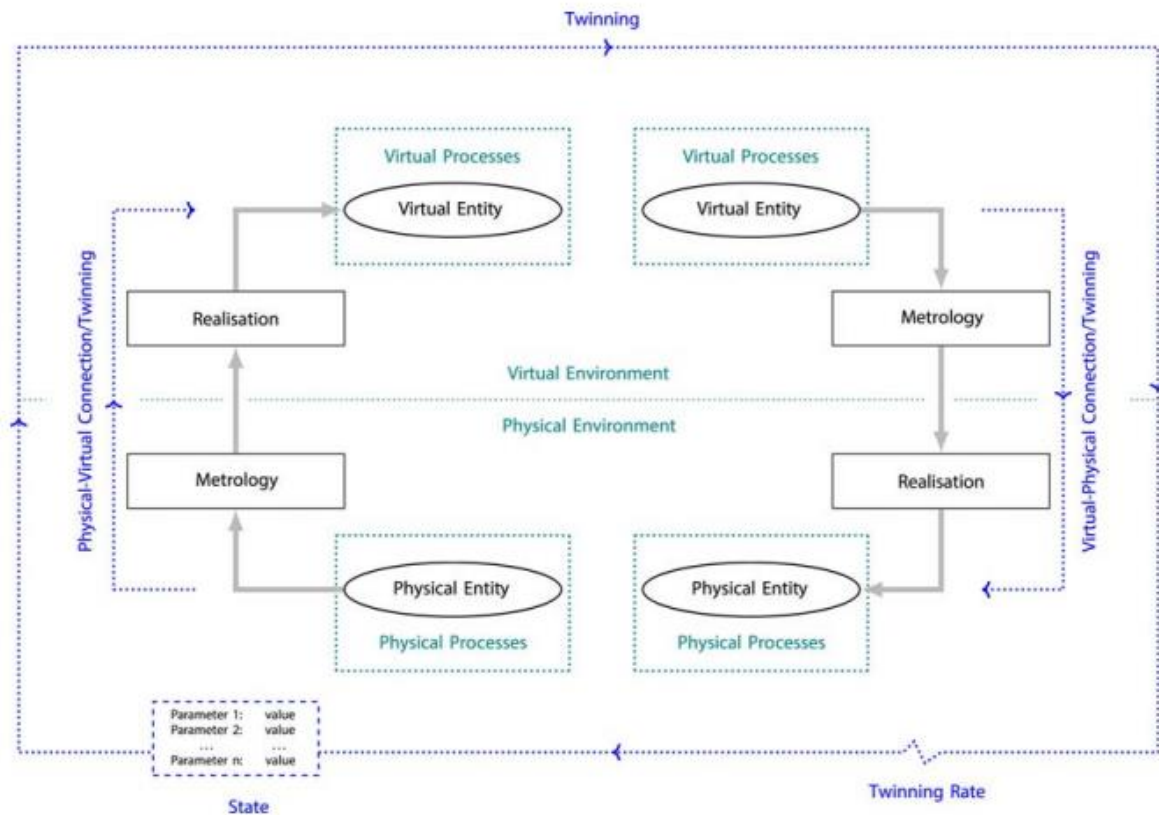


Obrázok 2: Porovnanie digitálneho modelu, tieňa a dvojčat'a [5]

Pri práci s digitálnym dvojčat'om existuje niekoľko pojmov a procesov, ktoré ju charakterizujú a umožňujú lepšie porozumieť práci s DT, ktoré možno vidieť aj na Obrázok 3:

- fyzická entita – objekt reálneho sveta,
- virtuálna entita – virtuálna reprezentácia objektu reálneho sveta,
- fyzické prostredie – merateľné prostredie, v ktorom sa nachádza fyzická entita,
- virtuálne prostredie – virtuálny „svet“ či simulácia zachytávajúca podmienky a merané stavy fyzického prostredia,
- fyzický proces – proces vykonávaný fyzickou entitou,
- virtuálny proces – výpočtové techniky využité vo virtuálnom svete,
- vernosť dát – vyjadruje množstvo a presnosť snímaných parametrov prenášaných z fyzickej do virtuálnej entity,

- stav – aktuálne hodnoty jednotlivých parametrov či už fyzickej entity/prostredia alebo virtuálnej entity/prostredia,
- parametre – konkrétne merané veličiny spolu s ich dátovým typom,
- twinning – proces synchronizácie fyzickej a virtuálnej entity,
- twinning rate – frekvencia s akou dochádza k twinningu, t.j. k synchronizácii entít [1].

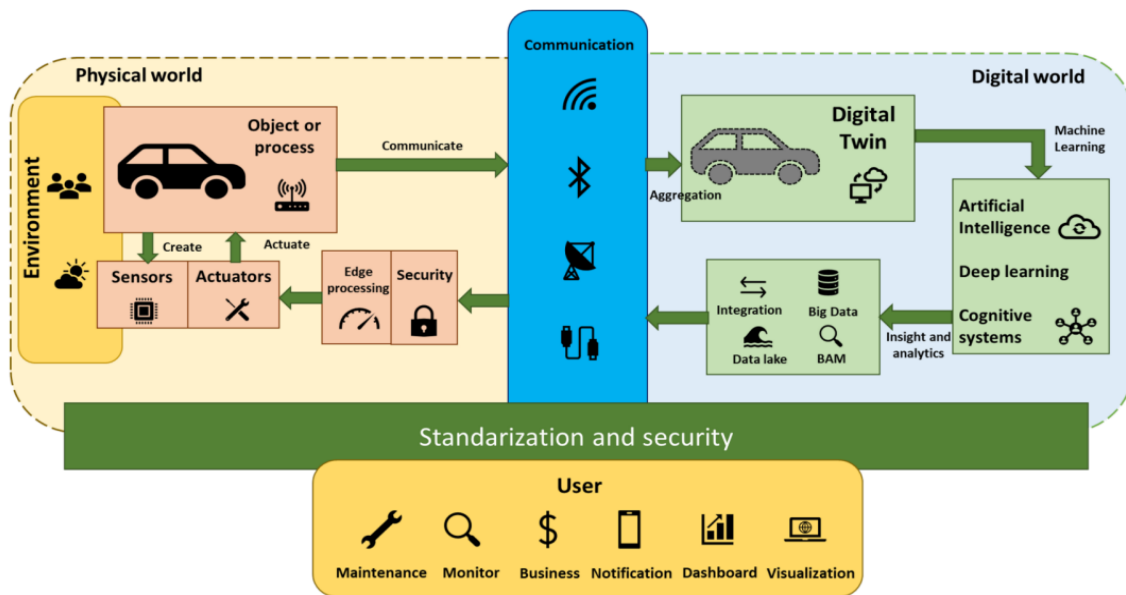


Obrázok 3: Procesy a pojmy spojené s DT [1]

## 2. Architektúra digitálneho dvojčat'a

Vo všeobecnosti pozostáva architektúra digitálneho dvojčat'a z troch základných zložiek, ako možno vidieť na Obrázok 4:

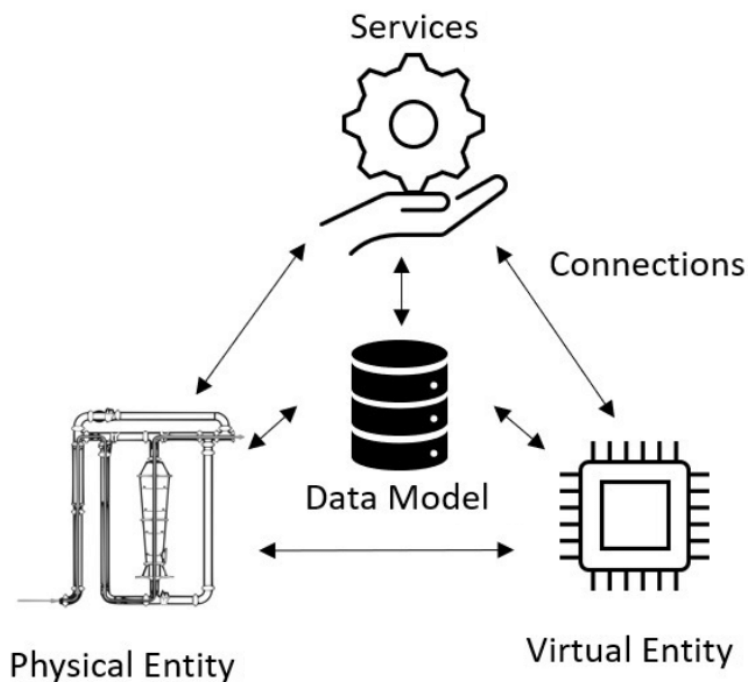
1. fyzická entita – zabezpečuje zber dát z reálneho systému pomocou snímačov, ich spracovanie využitím edge computingu a reakcie na ne skrz akčné členy,
2. virtuálna entita – využívajúca virtuálny model, AI a machine learning (ML), databázy na uchovanie dát a taktiež správu a prácu s big data,
3. komunikácia medzi fyzickou a virtuálnou entitou (digitálne vlákno) – sprostredkovaná pomocou zabezpečených komunikačných protokolov, ktorá okrem samotnej výmeny dát zaisťuje taktiež o ich dostatočnú bezpečnosť a ochranu pred útokmi [2], [6].



Obrázok 4: Základná architektúra digitálneho dvojčat'a [6]

Aby sa zdôraznil význam prínosu dát a algoritmov umelej inteligencie prišiel koncept 5D-DT, ktorý vidno na Obrázok 5, kde sú tieto zvlášť osamostatnené a rozširujú základnú architektúru o:

- aspekt (AI) servisov - sú k dispozícii ako pre reálnu entitu za účelom optimalizácie, tak pre virtuálnu entitu za účelom vysokej dôveryhodnosti dát a synchronizácie parametrov,
- aspekt dát - nepredstavuje len dáta z reálnej entity, ale aj z virtuálnej entity, servisov, domain knowledge a ich vzájomného prepojenia [7].



Obrázok 5: Koncept 5D-DT [7]



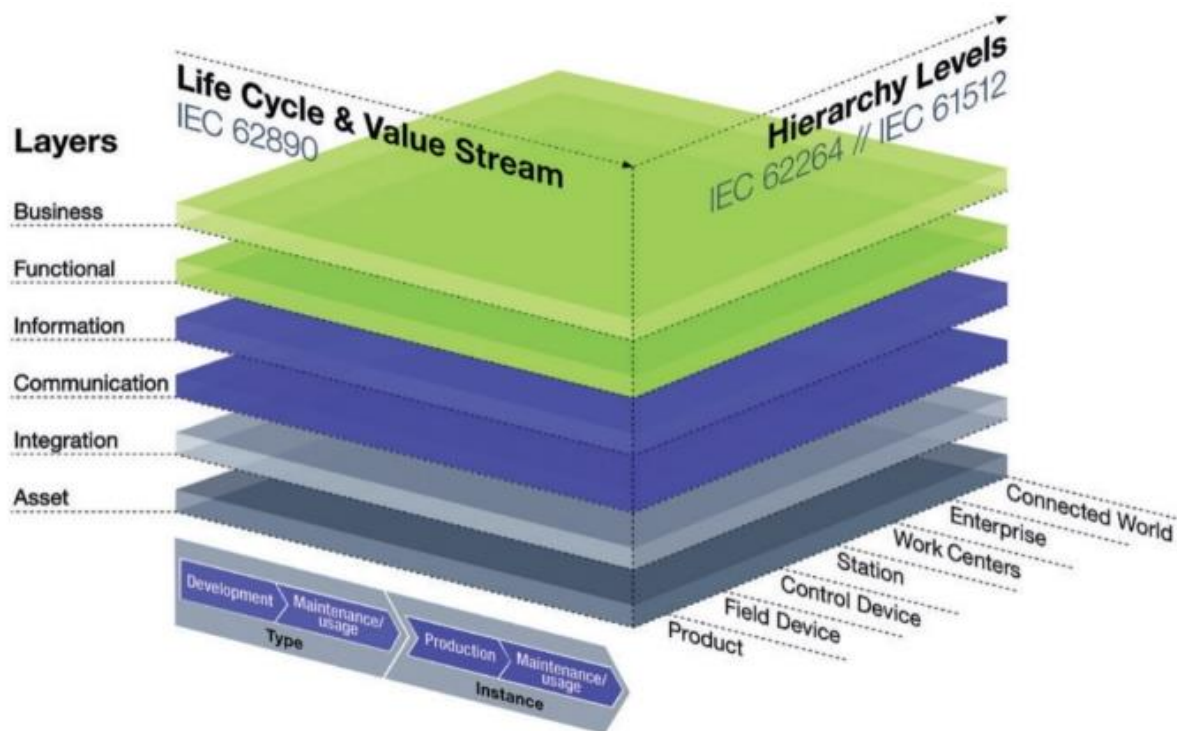
### 3. Interoperabilita v Industry 4.0

Ako vidno z definície a architektúry digitálneho dvojčata komunikácia dát a vzájomné porozumenie jednotlivých systémov – interoperabilita, je základ pre rozvoj priemyslu v rámci štvrtej priemyselnej revolúcie. Interoperabilita sa dosahuje štandardizáciou, zjednotením pojmov a jazyka – **RAMI4.0**, kompatibilitou pri komunikácii a výmene dát – **OPC UA** a zjednotením komplexných informačných štruktúr – **AAS**.

#### A. RAMI4.0

Pre vzájomné porozumenie komunikantov vznikol Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0), Obrázok 6, ktorý predstavuje trojrozmernú mapu umožňujúcu vzájomné porozumenie všetkým účastníkom v rámci Industry 4.0. Jednotlivé osi predstavujú:

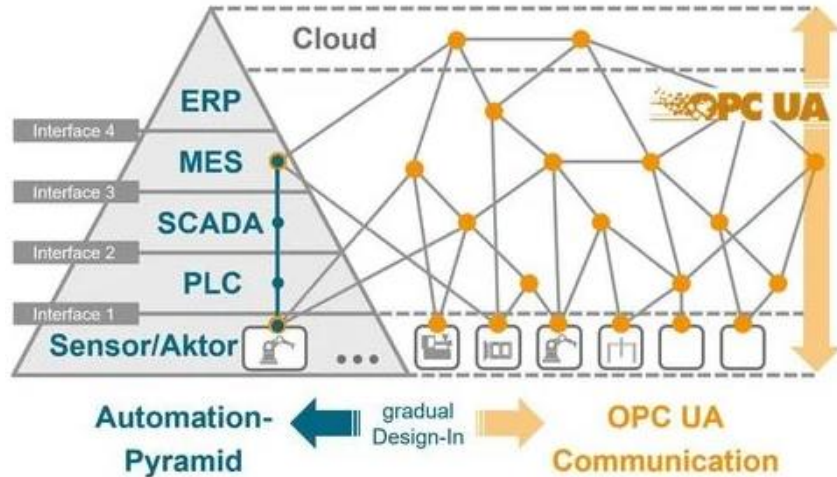
- pravá horizontálna os – hierarchia (Hierarchy Levels) – reprezentuje rôzne entity, ktoré možno vo výrobnom procese nájsť, spojené na základe ich funkcionality. Táto os taktiež zahŕňa produkt a prepojenie s vonkajším svetom, ktoré boli doposiaľ v Industry 3.0 oddelené od ostatných entít.
- ľavá horizontálna os – životný cyklus (Life Cycle & Value Stream) – na tejto osi je zaznačený životný cyklus zariadení a výrobkov rozdelený na „type“ (zahŕňa vývoj, konštrukciu, prototypovanie) a „instance“ (sériová výroba produktu, maintenance, až po vyradenie z činnosti). Typ sa stáva inštanciou vo chvíli, keď je ukončená fáza jeho návrhu a je možné ho vyrábať.
- vertikálna os – vrstvy (Layers) – predstavuje šesť vrstiev v štruktúre Industry 4.0 [8], [9].



Obrázok 6: RAMI4.0 [9]

### B. OPC UA

Pre zabezpečenie interoperabilnej, platformovo-nezávislej komunikácie medzi jednotlivými systémami bol predstavený štandard OPC UA – . Open Platform Communications Unified Architecture. Jeho využitím dokážeme zabezpečiť interoperabilitu a kompatibilitu v rámci celej automatizačnej pyramídy, ako vidno ilustračne na Obrázok 7, a priblížiť nás tak bližšie ku smart manufacturingu [8].



Obrázok 7: Koncept smart manufacturingu dosiahnutý pomocou OPC UA [10]

OPC UA ale nie je len komunikačný protokol, ide o štandard, ktorý vďaka OPC UA informačnému modelu umožňuje digitálne opísať aj komplexné štruktúry. Prináša tak konzistentnosť dát a celistvý pohľad na systém v štandardizovanej forme. Ukážku OPC UA informačného modelu možno vidieť na Obrázok 8 – vo forme XML dokumentu popisuje jednotlivé časti výrobnjej linky, na začiatku sa nachádza generická definícia pre snímač, ktorá je využitá v inštancii snímača teploty a prítomnosti objektu. Nasleduje definícia pre motor dopravníku. Oba snímače a motor sú ďalej zjednotené zariadení, ktoré charakterizujú [9].

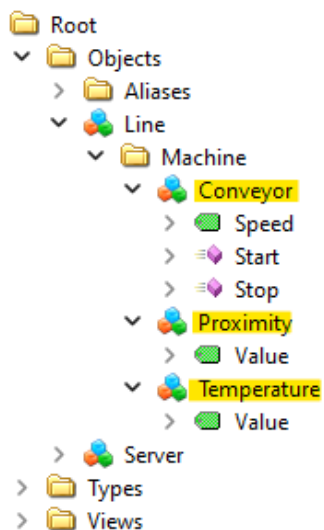
```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
2
3 <opc:ModelDesign
4   xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
5   xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
6   xmlns:opc="http://opcfoundation.org/UA/ModelDesign.xsd"
7   xmlns:ua="http://opcfoundation.org/UA/"
8   xmlns:uax="http://opcfoundation.org/UA/2008/02/Types.xsd"
9   xmlns="http://opcfoundation.org/OPCUAServer"
10  TargetNamespace="http://opcfoundation.org/OPCUAServer">
11  <opc:Namespaces>
12    <opc:Namespace Name="OpcUa" Prefix="Opc.Ua" XmlNamespace="http://opcfoundation.org/UA/2008/02/Types.xsd">http://opcfoundation.org/UA/</opc:Namespace>
13    <opc:Namespace Name="OPCUAServer" Prefix="OPCUAServer">http://opcfoundation.org/OPCUAServer</opc:Namespace>
14  </opc:Namespaces>
15
16  <opc:ObjectType SymbolicName="GenericSensorType" BaseType="ua:BaseObjectType">
17    <opc:Description>A generic sensor.</opc:Description>
18    <opc:Children>
19      <opc:Variable SymbolicName="Value" DataType="ua:Double" ValueRank="Scalar" TypeDefinition="ua:AnalogItemType" AccessLevel="Read" />
20    </opc:Children>
21  </opc:ObjectType>
22
23  <opc:ObjectType SymbolicName="TemperatureSensor" BaseType="GenericSensorType">
24    <opc:Description>A temperature sensor.</opc:Description>
25  </opc:ObjectType>
26
27  <opc:ObjectType SymbolicName="ProximitySensor" BaseType="GenericSensorType">
28    <opc:Description>A proximity sensor.</opc:Description>
29  </opc:ObjectType>
30
31  <opc:ObjectType SymbolicName="MotorConveyor" BaseType="ua:BaseObjectType">
32    <opc:Description>A motor.</opc:Description>
33    <opc:Children>
34      <opc:Variable SymbolicName="Speed" DataType="ua:Double" ValueRank="Scalar" TypeDefinition="ua:AnalogItemType" AccessLevel="ReadWrite" />
35      <opc:Method SymbolicName="Start" ModellingRule="Mandatory"></opc:Method>
36      <opc:Method SymbolicName="Stop" ModellingRule="Mandatory"></opc:Method>
37    </opc:Children>
38  </opc:ObjectType>
39
40  <opc:ObjectType SymbolicName="MachineType" BaseType="ua:FolderType">
41    <opc:Children>
42      <opc:Object SymbolicName="Temperature" TypeDefinition="TemperatureSensor" SupportsEvents="true">
43        <opc:BrowseName>Temperature</opc:BrowseName>
44      </opc:Object>
45      <opc:Object SymbolicName="Proximity" TypeDefinition="ProximitySensor" SupportsEvents="true">
46        <opc:BrowseName>Proximity</opc:BrowseName>
47      </opc:Object>
48      <opc:Object SymbolicName="Conveyor" TypeDefinition="MotorConveyor" SupportsEvents="true">
49        <opc:BrowseName>Conveyor</opc:BrowseName>
50      </opc:Object>
51    </opc:Children>
52  </opc:ObjectType>

```

Obrázok 8: Ukážka OPC UA informačného modelu

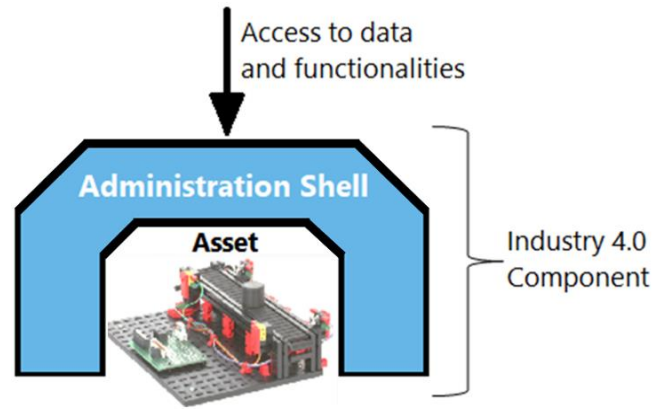
Z navrhnutého OPC UA informačného modelu možno ďalej vytvoriť jeho skompilovaním adresný priestor OPC UA servera, viď Obrázok 9 – každý jeden objekt, ako aj jeho vlastnosti, je v adresnom priestore jednoznačne identifikovateľný na základe priradeného NodeId. Toto možno využiť aj na referencovanie medzi objektmi a vlastnosťami.



Obrázok 9: Adresný priestor OPC UA servera vytvorený skompilovaní vyššie uvedeného OPC UA informačného modelu

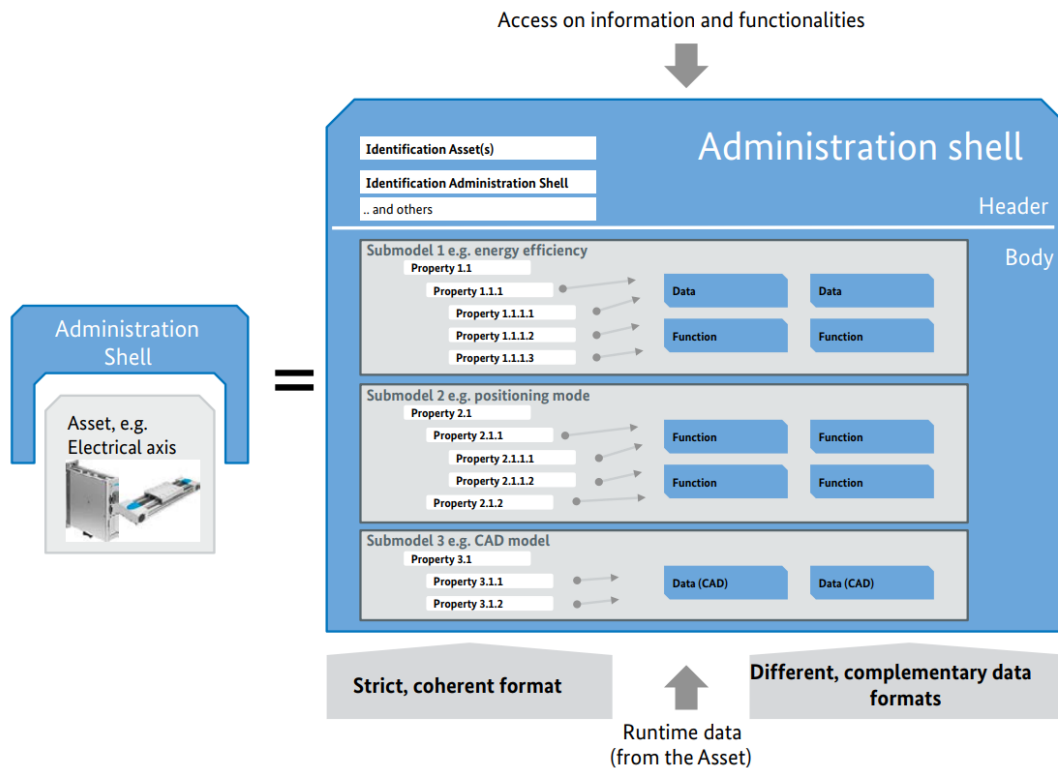
### C. AAS

Ako vidno na obrázku OPC UA informačného modelu, vytvoriť presný digitálny opis priamo v XML formáte môže byť značne časovo náročné a sú k tomu potrebné dobré znalosti tvorby informačného modelu. Administratívna schránka aktíva, v angl. Asset Administration Shell, skrátene AAS, predstavuje spôsob štandardizovaného vytvárania digitálnych opisov. Okrem toho, že je AAS nositeľom kompletného digitálneho opisu aktíva, je schopné komunikovať tieto informácie ďalej informačnému svetu, vid' obrázok. Administratívne schránky sú základným stavebným kameňom interoperabilnej smart výroby a predstavujú spôsob vytvárania komponentov Industry 4.0 [11], [12].



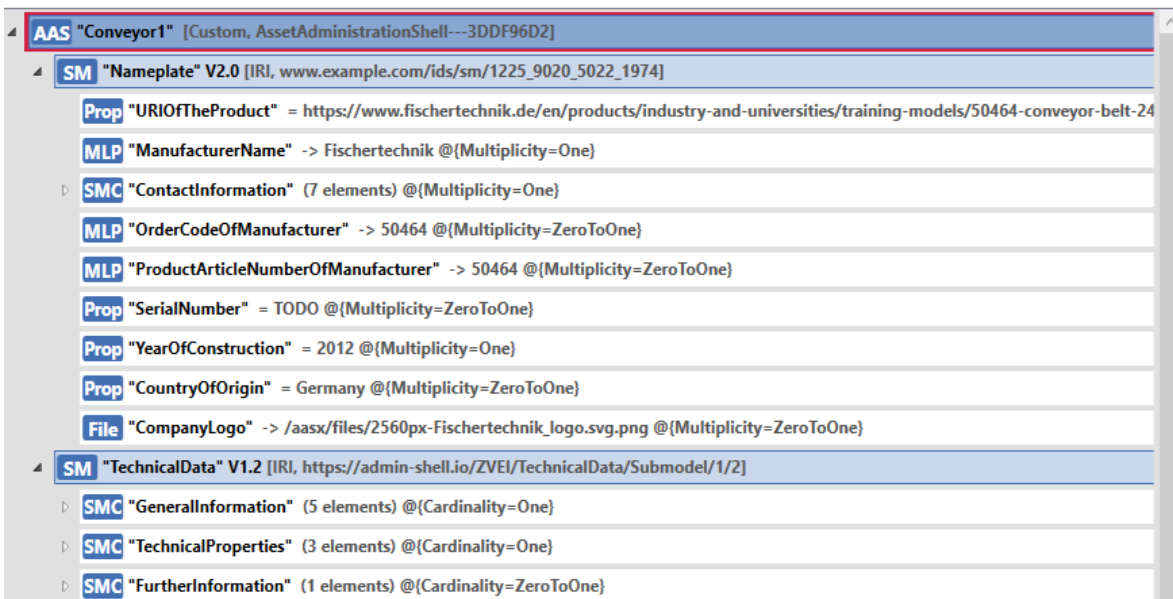
Obrázok 10: Administratívna schránka aktíva

„Komponent Industry 4.0“ je nový pojem. Tvorí ho reálne zariadenie (HW, SW, ...) označované ako aktívum (asset) a administratívna schránka, ktorá toto aktívum opisuje, Obrázok 10. Administratívna schránka pozostáva z hlavičky – header a tela – body, vid’ Obrázok 11. Hlavička je nositeľom základných identifikačných parametrov a označenia aktíva. Telo AAS rozdelené do jednotlivých častí – submodelov, napr. technické parametre, dokumentácia, operačné dáta, ..., charakterizuje vlastnosti a metódy aktíva v štandardizovanom formáte [11], [12].



Obrázok 11: Štruktúra AAS [12]

Pre vytváranie administratívnych schránok sú k dispozícii nástroje, ako AASX Package Explorer, viď Obrázok 12, či Eclipse BaSyX. V týchto je možné AAS jednoducho vytvoriť a tiež využiť pridružené nástroje, ako AASX Server, na jednoduché spustenie OPC UA servera, ktorého adresný priestor je vytvorený na základe digitálneho opisu z AAS.



Obrázok 12: Vytváranie AAS v nástroji AASX Package Explorer

#### 4. Využitie interoperability pri tvorbe digitálneho dvojčat'a

Na Obrázok 13 možno vidieť ukážku využitia interoperability OPC UA a AAS pri návrhu architektúry digitálneho dvojčat'a. Pre jednotlivé časti výrobnéj linky možno vytvoriť administratívne schránky, ktoré sú nosičom kompletného digitálneho opisu dielu. Z AAS možno následne vytvoriť OPC UA informačné modely pre OPC UA servery, prípadne využiť niektorý z nástrojov, ako napr. AASX Server, ktorý dokáže vytvoriť OPC UA server zo vstupných digitálnych opisov.

Výhodou navrhutej architektúry je implementovanie agregáčného OPC UA servera, ktorý zabezpečí jednoduchú dostupnosť ku všetkým OPC UA serverom z jedného endpointu – prístupového bodu. Hodnoty zo zagregovaných serverov sú na ňom zrkadlené, t.j. v prípade, že ak dôjde k zmene

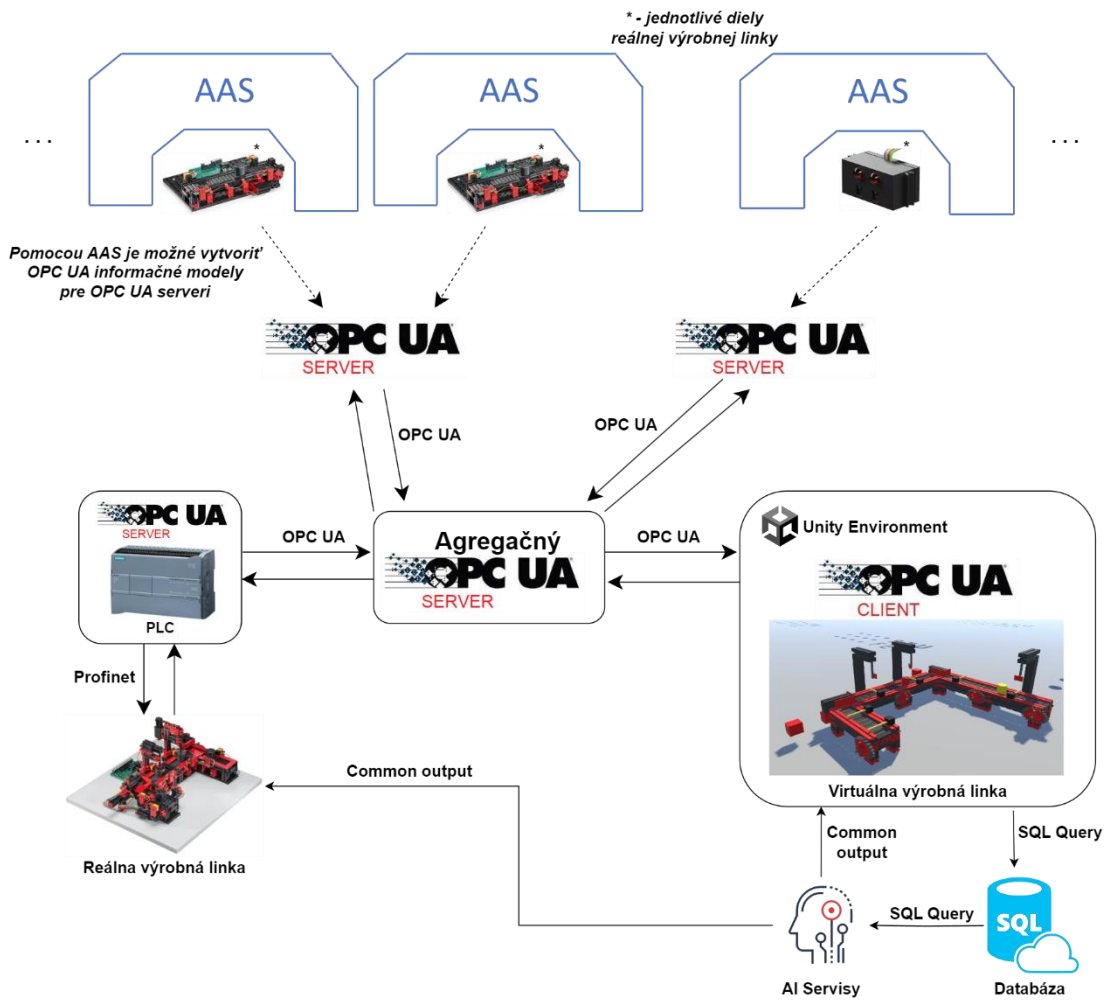


hodnoty či už na príslušnom OPC UA serveri alebo na agregáčnom OPC UA serveri, druhému je hodnota automaticky odzrkadlená.

V rámci reálnej entity je využitá edukačná výrobná linka od firmy fischertechnik, ktorá je riadená PLC Siemens S7-1200. Na PLC možno jednoducho vytvoriť OPC UA server, ktorý možno zagregovať a dokážeme s ním tak v rámci platformy ľahko komunikovať. Alternatívne možno využiť aj simulačné PLC v prostredí PLCSIM, ktoré dokáže byť plnohodnotnou náhradou fyzického PLC.

Virtuálna entita je vytvorená v Unity, pričom pri zostavení virtuálnej linky vieme využiť práve súbory nahraté v AAS, ako sú CAD modely pre jednotlivé časti linky či skripty, ktoré ich majú obsluhovať. Knižnica OPC UA klienta následne zabezpečí komunikáciu medzi agregáčným OPC UA serverom a virtuálnou výrobnou linkou.

Virtuálna entita je ďalej rozšírená o databázu zabezpečujúcu uchovanie dát z reálneho aj virtuálneho výrobného procesu a AI servisy, ktoré môžu tieto dáta ďalej analyzovať a ich výstup môže slúžiť na optimalizáciu výrobného procesu, prediktívnu údržbu, simuláciu „what-if“ scenárov, ...



Obrázok 13: Návrh architektúry digitálneho dvojčata využitím interoperabilných technológií

## Referencie

- [1] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [2] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [3] “Industry 4.0 and the digital twin.” Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>
- [4] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, “Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
- [5] C. Qian, X. Liu, C. Ripley, M. Qian, F. Liang, and W. Yu, “Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions,” *Future Internet*, vol. 14, no. 2. MDPI, Feb. 01, 2022. doi: 10.3390/fi14020064.
- [6] D. M. Botín-Sanabria, S. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, and J. de J. Lozoya-Santos, “Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 6. MDPI, Mar. 01, 2022. doi: 10.3390/rs14061335.
- [7] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, and R. Hofmann, “Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6981, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12146981.
- [8] “OPC Unified Architecture, Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things.” OPC Foundation, 2022.
- [9] F. Pethig, S. Schriegel, A. Maier, and J. Otto, *Industrie 4.0 Communication Guideline Based on OPC UA*. VDMA Verlag GmbH, 2017. Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available:

[https://www.researchgate.net/publication/320035806\\_Industrie\\_40\\_Communication\\_Guideline\\_Based\\_on OPC-UA](https://www.researchgate.net/publication/320035806_Industrie_40_Communication_Guideline_Based_on OPC-UA)

- [10] S. Bieller, “Faster robot communication through the OPC Robotics Companion Specification.”
- [11] “Details of the Asset Administration Shell - Part 1.” Plattform Industrie 4.0, 2020. Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.zvei.org/en/press-media/publications/details-of-the-asset-administration-shell>
- [12] “Structure of the Administration Shell.” Plattform Industrie 4.0, 2018. Accessed: Mar. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-trilaterale-coop.html>