

Koncept a použití digitálního dvojčete síťové infrastruktury 5G

Připraveno pro Ministerstvo
průmyslu a obchodu

15.11.2024



**Národní
plán
obnovy**

Logo klienta

Obsah

Definice pojmů.....	4
Manažerské shrnutí.....	6
Management summary	7
1 Úvod.....	8
1.1 Cíle studie.....	8
1.2 Struktura studie	8
2 Obecný koncept digitálních dvojčat	9
2.1 Definice a hlavní atributy digitálních dvojčat.....	9
2.2 Typy, účel a přínosy digitálních dvojčat.....	11
2.3 Případy užití a aplikace digitálních dvojčat v různých vertikálách	14
2.4 Role 5G technologie v konceptu digitálních dvojčat	17
3 Digitální dvojče síťové infrastruktury 5G	19
3.1 Výzvy spojené s 5G a proč je potřeba digitální dvojče pro 5G síť	19
3.2 Vymezení NDT vůči stávajícím nástrojům používaným v oblasti 5G infrastruktury.....	21
3.3 Architektura a proces návrhu digitálního dvojčete 5G sítě	23
3.4 Rizika a výzvy při implementaci digitálních dvojčat pro 5G	25
3.5 Případy užití a případové studie digitálního dvojčete 5G infrastruktury.....	27
4 Budoucnost digitálních dvojčat	29
4.1 Evoluce k 5G Advanced a nové schopnosti pro tvorbu DT	29
4.2 Cesta k 6G a projekt Hexa-X.....	31
4.3 Nové funkcionality 6G přinesou také nové výzvy	33
4.4 Vybrané perspektivní aplikace digitálních dvojčat	36
Příloha 1 – Případová studie: ČVUT - Digitální dvojčata pro predikci kvality signálu mezi zařízeními	39
Příloha 2 – Případová studie: Digitální dvojče skladů díky virtuálním senzorům od InovecTech	43
Příloha 3 – Případová studie: Spirent – digitální dvojče pro IP síť China Mobile	47
Příloha 4 – Případová studie: Digitální dvojče 5G infrastruktury pro Ministerstvo obrany USA.....	50
Příloha 5 – Případová studie: Digitální dvojčata VIAVI pro simulaci kybernetických hrozeb a rollout 5G sítě.	53
Příloha 6 – Případová studie: Digitální dvojče sítě od společnosti BaseN.....	55

Definice pojmů

Digitální dvojče (Digital Twin, DT): Digitální dvojče je virtuální replika fyzické entity nebo procesu, která umožňuje monitorování v reálném čase, simulaci a optimalizaci díky obousměrnému přenosu dat mezi digitální a fyzickou verzí. Tato konektivita umožňuje testování scénářů a zlepšení rozhodovacích procesů.

Digitální dvojče sítě (Network Digital Twin, NDT): Digitální dvojče sítě je digitální dvojče specificky pro síťovou infrastrukturu, které představuje celou síťovou architekturu v reálném čase. Umožňuje operátorům sítě sledovat, testovat a optimalizovat konfigurace sítě bez zásahu do živého prostředí.

Obousměrný přenos dat (Bidirectional Data Transfer): Důležitá funkce digitálních dvojčat, která umožňuje nepřetržitý tok dat mezi fyzickým objektem a jeho digitálním dvojčetem. Zajišťuje, aby obě verze byly aktuální v reálném čase, což umožňuje digitálnímu dvojčeti ovlivňovat fyzické operace a naopak.

Prediktivní údržba (Predictive Maintenance): Tato funkce využívá historická a aktuální data k předpovědi, kdy bude stroj nebo systém potřebovat údržbu. Prediktivní údržba optimalizuje alokaci zdrojů a snižuje nečekané výpadky.

Simulace (Simulation): V kontextu digitálních dvojčat simulace umožňují simulaci scénářů „co kdyby“, kde virtuální modely testují různé provozní strategie, nastavení nebo reakce na možné problémy. Simulace je zásadní pro předcházení nákladným chybám a optimalizaci reálných operací.

Emulace (Emulation): Emulace replikuje chování systému v reálném čase a vytváří realistické testovací prostředí, ale na rozdíl od simulace emulace napodobuje plnou funkčnost systému, nikoli jen vybrané chování nebo reakce. Zatímco simulace je často využívána k prozkoumání různých scénářů, emulace slouží k věrnému napodobení reálného provozu, zejména při testování softwaru nebo integrace systémů.

Průmyslový IoT (Industrial IoT, IIoT): Tento termín označuje aplikaci technologií IoT v průmyslovém prostředí, kde zařízení shromažďují a přenášejí data pro monitorování, údržbu a optimalizaci procesů. IIoT je klíčový pro tvorbu digitálních dvojčat v průmyslových prostředích.

Edge Computing (Edge Computing): Distribuovaný výpočetní rámec, který přibližuje ukládání a zpracování dat ke zdroji (např. k IoT zařízením), čímž snižuje latenci. Edge computing podporuje digitální dvojčata díky rychlému zpracování dat v blízkosti fyzického dvojčete.

Síťové plátkování (Network Slicing): Funkce, která vytváří více virtuálních sítí na sdílené fyzické síťové infrastruktuře. Každý „slice“ může být přizpůsoben konkrétním aplikacím, jako jsou požadavky na nízkou latenci nebo vysokou spolehlivost.

Kyber-fyzikální systémy (Cyber-Physical Systems, CPS): Tyto systémy integrují fyzické procesy s digitálním monitorováním a řízením prostřednictvím sítě. Digitální dvojčata jsou formou CPS, která pomáhá synchronizovat a optimalizovat jak digitální, tak fyzická prostředí.

Monitorování v reálném čase (Real-Time Monitoring): Schopnost digitálních dvojčat nepřetržitě sledovat aktuální stav fyzické entity, což umožňuje okamžité rozhodování a včasné úpravy na základě aktuálních dat.

Propojená digitální dvojčata (Connected Digital Twins): Budoucí koncept, kdy mezi sebou interagují různá digitální dvojčata v rámci jednoho systému (například chytrého města), což vytváří složité, propojené virtuální prostředí, které optimalizuje rozsáhlý provoz.

Preskriptivní analytika (Prescriptive Analytics): Pokročilý analytický proces používaný digitálními dvojčaty k tomu, aby nejen předpovídal výsledky, ale také doporučoval konkrétní kroky k optimalizaci procesů nebo řešení problémů.

Strojové učení (Machine Learning, ML): Podmnožina umělé inteligence, která umožňuje digitálním dvojčatům učit se z dat, rozpoznávat vzorce a postupně se zlepšovat. ML v digitálních dvojčatech zvyšuje přesnost prediktivní a preskriptivní analýzy. Tím umožní vznik autonomních digitálních dvojčat.

Digitální vlákno (Digital Thread): Digitální vlákno je nepřetržitý tok dat a informací propojující různá digitální dvojčata a systémy v průběhu životního cyklu produktu nebo procesu. Umožňuje sledování a sledovatelnost, což podporuje end-to-end optimalizaci.

Synchronizace dat (Data Synchronization): Proces udržování konzistence mezi digitálním dvojčetem a jeho fyzickým protějškem. Zajišťuje, že digitální model odráží změny v reálném čase, což je klíčové pro přesné simulace, aplikace v reálném světě a informovaná rozhodnutí.

Manažerské shrnutí

Digitální dvojče je virtuální replika fyzických entit a/nebo procesů. Digitální dvojčata mají transformační potenciál pro mnoho oblastí, od průmyslu přes energetiku, telekomunikace až po chytrá města, protože urychlují komplexní porozumění, pomáhají optimalizovat rozhodování a zefektivnit činnosti. K hlavním atributům digitálních dvojčat patří obousměrný přenos dat mezi fyzickou entitou a digitální replikou a možnost modelování různých scénářů.

Digitální dvojčata jsou již dnes realitou a pomáhají zvyšovat efektivitu v mnoha oblastech. Mezi lety 2020 a 2025 dojde k desetinásobnému růstu trhu a jen v oblasti digitálních dvojčat pro průmysl má trh hodnotu více než 6 miliard USD.

Většina dnes existujících digitálních dvojčat je ovšem zatím na nízké úrovni z pohledu zralosti. Často se jedná o digitální zobrazení reality se schopností podporovat určité analýzy, ovšem chybí schopnost doporučovat optimální řešení a schopnost přímo ovlivňovat fyzickou entitu. S rozvojem potřebných kompetencí, AI modelů a schopnosti přenášet a zpracovávat velké objemy dat se bude úroveň digitálních dvojčat zvyšovat směrem k preskriptivním a autonomním digitálním dvojčatům schopným samostatného rozhodování a optimalizace fyzické entity.

Digitální dvojčata nám mohou pomoci vysvětlit různé jevy, předpovědět chování, zkoumat alternativy, generovat nám data nebo dokonce provádět změny ve fyzickém světě. Díky tomu mohou přinést firmám a dalším uživatelům řadu benefitů, zejména v oblasti vývoje nových produktů, zvyšování efektivity provozu a úspory nákladů, zvyšování výkonnosti systémů a v neposlední řadě ve zvyšování odolnosti a kybernetické bezpečnosti.

Pro realizaci digitálních dvojčat jsou zásadním prvkem data a jejich přenos v reálném čase. Proto je 5G technologie, včetně IoT variant, ideálním nástrojem pro realizaci digitálních dvojčat prakticky ve všech oblastech a vertikálách. Kromě toho hraje 5G důležitou roli v konceptu propojených dvojčat, kde síťové dvojče tvoří komponentu komplexního systému, který bude zachycovat například celé logistické uzly, chytrá města či továrny.

Technologie 5G přináší mnoho nových možností nejen pro koncové uživatele, ale zejména pro podniky a jejich pokročilou digitalizaci. Zásadní přínosy 5G technologií mají ovšem také svou daň v podobě výrazně vyšší komplexnosti síťové architektury, náročnosti na design, provoz a optimalizaci sítě pro různé případy užití. Právě s řešením těchto výzev může pomoci digitální dvojče síťové infrastruktury (Network Digital Twin – NDT), tedy virtuální model fyzické sítě 5G, který je neustále aktualizován o reálná data. NDT poskytuje živou simulaci fyzické sítě, umožňuje operátorům hodnotit výkon, optimalizovat využití prostředků a detekovat a řešit chyby v kontrolovaném prostředí.

Vývoj digitálních dvojčat 5G sítí bude charakterizován úzkou integrací a vzájemným posilováním s tradičními nástroji v podobě network inventory, monitorovacích nástrojů a testbedů. NDT rozšíří a sjednotí jejich schopnosti. Umožní komplexnější a proaktivnější přístup k řízení sítě. Tato konvergence umožní operátorům využít sílu každého nástroje při současném využití pokročilé analytiky, prediktivního modelování a interakčních schopností NDT.

Posun 5G technologie směrem k 5G Advance přinese nové schopnosti pro podporu tvorby digitálních dvojčat. Zejména zlepšený uplink a nízká latence technologie umožní detailnější a reálnější replikaci fyzických prostředí. Síťová digitální dvojčata jsou podstatným tématem i v rámci diskusí o nových 6G standardech. Lze předpokládat, že role NDT ještě poroste s novými plánovanými funkcionalitami 6G sítí, jako je network sensing (síťové snímání) či ubiquitous communication (všudypřítomná komunikace).

Management summary

Digital twins are virtual replicas of physical entities and/or processes. Digital twins have transformative potential across various verticals, from industry and energy to telecommunications and smart cities, as they accelerate complex understanding, support optimized decision-making, and improve operational efficiency. Key attributes of digital twins include bidirectional data transfer between the physical entity and its digital replica, as well as the ability to model various scenarios.

Today, digital twins are already a reality and are helping to increase efficiency across many areas. Between 2020 and 2025, the market is projected to grow tenfold, with the market for manufacturing digital twins alone estimated at over \$6 billion.

However, most of today's digital twins are still at a low maturity level. Often, they are digital representations of reality with limited analytical support capabilities, lacking the ability to recommend optimal solutions and directly influence the physical entity. As competencies, AI models, and the ability to transmit and process large volumes of data develop further, digital twins will advance toward prescriptive and autonomous systems capable of independent decision-making and optimization of physical entities.

Digital twins can help explain various phenomena, predict behavior, explore alternatives, generate data, or even initiate changes in the physical world. Through these capabilities, digital twins can deliver numerous benefits to companies and other users, particularly in the areas of new product development, increased operational efficiency, cost savings, improved system performance, and, not least, enhanced resilience and cyber security.

Data and real-time transmission are essential for implementing digital twins. Therefore, 5G technology, including its IoT variants, is an ideal tool for implementing digital twins across virtually all fields and verticals. In addition, 5G plays a crucial role in the concept of connected twins, where a network twin forms a component of a complex system that might include entire logistics hubs, smart cities, or factories.

5G technology brings many new possibilities, not only for end-users but especially for enterprises and their advanced digitalization efforts. However, the substantial benefits of 5G technology also come with a cost in the form of significantly higher complexity in network architecture and demands on network design, operation, and optimization for various use cases. Network Digital Twin (NDT), a virtual model of the physical 5G network that is continuously updated with real data, can help address these challenges. NDT provides a live simulation of the physical network, enabling operators to evaluate performance, optimize resource utilization, and detect and resolve issues in a controlled environment.

The development of 5G network digital twins will be characterized by close integration and mutual enhancement with traditional tools, such as network inventory, monitoring tools, and testbeds. NDT will expand and unify their capabilities, allowing for a more comprehensive and proactive approach to network management. This convergence will enable operators to harness the power of each tool while utilizing advanced analytics, predictive modeling, and NDT's interactive capabilities.

The advancement of 5G technology towards 5G Advanced will bring new capabilities to support digital twin creation. Improved uplink and low latency will enable more detailed and realistic replication of physical environments. Network digital twins are also a significant topic in discussions on new 6G standards. It is expected that the role of NDT will grow further with new functionalities planned for 6G networks, such as network sensing and ubiquitous communication.

1 Úvod

1.1 Cíle studie

Cíle studie jsou definované s ohledem na to, že pojem digitální dvojčata, často skloňovaný v souvislosti s digitální transformací, potřebuje hlubší vysvětlení, včetně celého konceptu, který se za ním skrývá a potenciálu, který může přinést firmám v různých vertikálách. Dále si klademe za cíl objasnit roli 5G technologie v konceptu digitálních dvojčat, včetně digitálního dvojčete síťové infrastruktury a jeho využití.

Cíle studie jsou proto stanoveny takto:

1. Poskytnout přehled o konceptu digitálních dvojčat.
2. Analyzovat typy, účel a přínosy digitálních dvojčat v různých odvětvích.
3. Posoudit roli 5G technologií v rámci digitálních dvojčat.
4. Přinést hlubší pohled na digitální dvojče síťové infrastruktury 5G.
5. Poskytnout vizi budoucího vývoje digitálních dvojčat.

1.2 Struktura studie

5G technologie hraje v oblastí digitálních dvojčat dvojí roli:

- Je důležitým nástrojem pro realizaci digitálních dvojčat v různých oblastech a vertikálách.
- Digitální dvojče síťové infrastruktury 5G hraje významnou roli při designu a optimalizaci sítě, stejně jako návrhu a testování nových služeb.

Tomu odpovídá struktura studie, která se zaměří na dvě hlavní oblasti:

- Obecný koncept digitálních dvojčat.
- Digitální dvojčata síťové infrastruktury.

Studie přináší také vhled do další evoluce 5G a 6G technologie a implikace pro koncept digitálních dvojčat.

Přílohy studie tvoří případové studie v podobě konkrétních projektů a řešení pro oblast digitálních dvojčat. Jsme rádi, že jsme mohli do případových studií zahrnout také řešení českých firem a univerzit.

2 Obecný koncept digitálních dvojčat

2.1 Definice a hlavní atributy digitálních dvojčat

2.1.1 Definice digitálních dvojčat

Pojem digitální dvojče patří k populárním termínům v současném technologickém světě. Přesto je tento termín často používán pro systémy a řešení, které ve skutečnosti digitálním dvojčetem v pravém slova smyslu nejsou.

Je možné setkat se s řadou definic pomu Digitální dvojče. Například Gartnerův IT slovník přináší následující:

"Digitální dvojče je virtuální reprezentace reálné entity nebo systému. Implementace digitálního dvojčete je zapouzdřený softwarový objekt nebo model, který zrcadlí jedinečný fyzický objekt, proces, organizaci, osobu nebo jinou abstrakci. Data z více digitálních dvojčat mohou být agregována pro komplexní pohled na řadu reálných entit, jako je například elektrárna nebo město, a jejich související procesy."

V této jinak přehledné definici postrádáme určité podstatné atributy digitálního dvojčete vztahující se k přenosu dat. Ty dále doplňuje definice, kterou přináší Digital Twin Consortium¹:

"Digitální dvojče je virtuální reprezentace reálných entit a procesů, synchronizovaná s určitou frekvencí a přesností. Systémy digitálních dvojčat transformují byznys tím, že urychlují komplexní porozumění, optimální rozhodování a efektivní činnosti. Digitální dvojčata používají data v reálném čase i historická data k reprezentaci minulosti i přítomnosti a k simulaci předpovězených budoucích stavů."

Za klíčové atributy digitálního dvojčete je možné považovat:

- **Přenos dat v reálném čase:** Synchronizace s určitou frekvencí zajišťuje, že digitální reprezentace je neustále aktualizována pomocí dat v reálném čase od svého fyzického protějšku.
- **Obousměrná komunikace:** Koncept synchronizace implikuje obousměrný tok informací, který umožňuje digitálnímu dvojčeti ovlivnit fyzickou entitu a naopak.
- **Simulace scénářů "co kdyby" („what if“):** Schopnost simulovat předpovězené budoucí stavy umožňuje zkoumání různých scénářů a výsledků, což usnadňuje informované rozhodování.

Řešení, které tyto 3 atributy neobsahuje, není možné považovat za plnohodnotné digitální dvojče. V současnosti je takových řešení většina. Za digitální dvojče jsou běžně označovány modely, které jsou věrnou replikou fyzické entity a často jsou do tohoto modelu přenášena data z fyzické entity a model je následně používám k určitým analýzám. Co ovšem v řadě případů chybí:

- **Přenos dat v reálném čase:** data bývají do modelu vkládána dávkově, pracuje s historickými daty.
- **Obousměrná komunikace:** data jsou přenášena z fyzické entity do digitální, ale nikoli naopak.
- **Ovlivnění fyzické entity (souvisí s předchozím bodem):** v modelu zcela chybí funkcionalita, která by vedla k možnosti digitálního dvojčete ovlivnit fyzickou entitu.

*Například v případě **digitálního dvojčete síťové infrastruktury** by se jednalo o funkci, která by automaticky optimalizovala nastavení fyzické sítě v závislosti na provozu a dalších faktorech (self-optimization/ self-healing).*

¹ <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin>

- Simulace „what if“ scénářů: řada modelů je buď pokročilým zobrazením reality, nebo nabízí určité možnosti analýzy, nikoli ale komplexní řešení scénářů.

Znamená to tedy, že by používání označení „digitální dvojče“ pro modely nesplňující všechny výše uvedené parametry bylo zcela chybné?

Ne tak docela. Řada modelů, které všechny parametry nesplňují, je určitým vývojovým stupněm. Technologie digitálních dvojčat je stále mladá a tvůrci digitálních dvojčat musí postupovat v postupných krocích. Díky použití termínu digitální dvojče je alespoň zřejmé, kam model směřuje a jaké má ambice.

Na druhou stranu, bylo by pro všechny zúčastněné efektivní, kdyby bylo digitální dvojče označené z pohledu fáze, ve které se nachází. Podobně jako je tomu u autonomních vozidel, která jsou klasifikována metodikou Society of Automotive Engineers (SAE) na úrovni od 0 (žádná automatizace) až po úroveň 5 (plně autonomní).

2.1.2 Úrovně digitálních dvojčat

V oblasti digitálních dvojčat dochází také k pokusům klasifikovat úroveň digitálních dvojčat, v tomto případě obvykle podle úrovně zralosti. Neexistuje jediná uznávaná klasifikace (jako je tomu u autonomních vozidel), dále proto přinášíme jednu možnou podobu rozlišení úrovně digitálních dvojčat.

Úroveň 0: Základní model

Jedná se o jednoduchou digitální reprezentaci fyzického objektu nebo systému, která je často statická a omezená na základní 3D vizualizace nebo schémata. Neexistuje žádná integrace s daty v reálném čase ani interakce.

Příklad: 3D model vytvořený pomocí CAD, který slouží pouze k vizualizaci a není propojen s aktuálními daty.

Úroveň 1: Deskriptivní digitální dvojče

Digitální dvojče přijímá data od fyzického aktiva a umožňuje monitorování a vizualizaci v reálném čase. Zobrazuje aktuální stav fyzické entity, ale nezahrnuje pokročilé analýzy ani předpovědi.

Příklad: Digitální dvojče, které monitoruje teplotu nebo tlak stroje v reálném čase, ale zobrazuje pouze data bez další analýzy.

Úroveň 2: Prediktivní digitální dvojče

Tato úroveň zahrnuje prediktivní schopnosti, které využívají historická a reálná data k předvídaní budoucích stavů a chování. Digitální dvojče může být doplněno o strojové učení nebo statistické modely, aby předvíдалo potenciální problémy nebo změny výkonu.

Příklad: Digitální dvojče, které předpovídá potřeby údržby stroje na základě trendů v datech a vzorců používání.

Úroveň 3: Preskriptivní digitální dvojče

Na této úrovni digitální dvojče nejen předpovídá budoucí stavy, ale také poskytuje praktické informace a doporučení. Může navrhnout optimální nastavení, úpravy nebo kroky k prevenci problémů nebo ke zlepšení efektivity.

Příklad: Digitální dvojče výrobní linky, které doporučuje úpravy ke snížení spotřeby energie nebo ke zvýšení produkční kapacity.

Úroveň 4: Autonomní digitální dvojče

Nejvyspělejší úroveň, kde je digitální dvojče schopné autonomního rozhodování a jednání. Má uzavřený cyklus s fyzickým aktivem, což umožňuje obousměrnou výměnu dat v reálném čase a automatické úpravy na základě simulací, scénářů „co kdyby“ a poznatků řízených umělou inteligencí.

Příklad: Plně autonomní digitální dvojče v chytré továrně, které optimalizuje operace, objednáva údržbu a přizpůsobuje se změnám v prostředí bez zásahu člověka.

V oblasti síťových digitálních dvojčat by se jednalo o dvojče, které na základě dat v reálném čase předpovídá nutné úpravy konfigurace sítě a tyto konfigurace přímo realizuje na fyzické síti.

Přehled klíčových vlastností podle úrovně digitálního dvojčete:

- Integrace dat v reálném čase: Přítomna od úrovně 1, postupně se stává složitější s každou další úrovní.
- Prediktivní analýza: Zavádí se na úrovni 2. Umožňuje digitálnímu dvojčeti předvídat možné problémy.
- Preskriptivní poznatky: Dostupné na úrovni 3. Umožňuje dvojčeti doporučovat optimální kroky.
- Autonomní rozhodování: Přítomno na úrovni 4, kde digitální dvojče může jednat nezávisle a spravovat svůj fyzický protějšek.

2.1.3 Stručná historie digitálních dvojčat

Koncept digitálního dvojčete – virtuální reprezentace fyzického objektu nebo systému – se vyvíjel několik desetiletí a souvisel s pokroky v simulacích, modelování a informačních technologiích obecně. Během misí Apollo v 60. letech NASA vyvinula fyzické repliky vesmírných lodí pro simulaci a analýzu podmínek. Vytvořila tedy rané formy digitálních dvojčat. Tento přístup se ukázal jako zásadní během mise Apollo 13, kde simulace na Zemi pomohly řešit problémy přímo během letu. Počítačový vědec David Gelernter v roce 1991 představil myšlenku „Mirror Worlds“ (Zrcadlové světy), tedy vizi digitálních reprezentací reálných systémů, která položila konceptuální základy pro dnešní digitální dvojčata.

Termín „digitální dvojče“ byl formálně uveden Michaelem Grievesem v roce 2002 v prezentaci o Product Lifecycle Management (PLM) na University of Michigan. Grieves zde popsal model složený ze tří komponent: fyzického produktu, jeho digitálního protějšku a datových spojení mezi nimi. John Vickers z NASA pak rozšířil Grievesovu práci a začlenil koncept digitálního dvojčete do technologické roadmapy NASA, kde zdůraznil jeho potenciál pro využití v oblasti letectví a kosmonautiky.

S nástupem internetu věcí (IoT) a technologií Průmyslu 4.0 v roce 2010 se pro digitální dvojčata otevřela nová kapitola. Tyto technologie umožnily výměnu dat v reálném čase mezi fyzickými systémy a jejich digitálními protějšky, což výrazně zvýšilo funkčnost a použitelnost digitálních dvojčat napříč různými průmyslovými odvětvími. V roce 2018 pak Ministerstvo obrany USA ve své strategii Digital Engineering definovalo digitální dvojče jako "integrovanou vícefyzikální, víceměřítkovou a pravděpodobnostní simulaci systému, jak byl vyroben," čímž zdůraznilo jeho významnou roli v simulacích složitých systémů.

V současné fázi vývoje digitálních dvojčat hrají zásadní roli technologie, které dříve nebyly dostupné, jako je strojové učení (ML), umělá inteligence (AI) a cloudové služby. Tyto technologie umožňují sběr a analýzu velkých objemů dat v reálném čase a poskytují výpočetní kapacitu potřebnou pro náročné simulace. AI a ML přinášejí digitálním dvojčatům schopnost učit se z historických a aktuálních dat. To umožňuje digitálním dvojčatům nejen predikovat budoucí chování, ale i autonomně optimalizovat provoz a navrhovat řešení v reálném čase. Díky cloudovým službám lze data z různých zdrojů efektivně ukládat, zpracovávat a sdílet, což digitálním dvojčatům umožňuje spolupracovat napříč geograficky rozptýlenými systémy a zařízeními.

2.2 Typy, účel a přínosy digitálních dvojčat

2.2.1 Typy digitálních dvojčat

Definovali jsme digitální dvojčata, včetně jejich rozdělení dle maturity. Toto dělení už představuje určitý druh klasifikace. Digitální dvojčata lze ovšem klasifikovat podle řady různých hledisek. Například podle rozsahu, účelu, životního cyklu, interakce v reálném čase, specifických průmyslových aplikací nebo složitosti datových zdrojů. Rozdělení digitálních dvojčat na různé typy je vhodné pro pochopení jejich dalšího využití.

Níže jsou uvedeny běžné klasifikace, každá s vysvětlením kritérií použitých pro každou kategorii.

Klasifikace podle rozsahu a úrovně integrace

Tato klasifikace se zaměřuje na to, kolik fyzického aktiva nebo systému digitální dvojče představuje, od jednotlivých komponent až po složité systémy:

- **Dvojčata komponent:** Reprezentují jednotlivé komponenty nebo části systému, jako je určitá část motoru nebo senzor. Jsou užitečná pro monitorování specifických prvků a provádění lokalizované prediktivní údržby.
- **Dvojčata aktiv:** Zahrnují celá aktiva, například kompletní stroj, vozidlo nebo turbínu. Umožňují sledovat výkonnost a plánovat prediktivní údržbu celého aktiva.

- **Dvojčata systémů:** Reprezentují celý systém včetně více aktiv a jejich vzájemných vztahů, například výrobní linku nebo dopravní síť. Poskytují pohled na interakce mezi aktivy, což umožňuje optimalizaci na úrovni celého systému.
- **Dvojčata procesů:** Modelují celé procesy nebo pracovní postupy, jako je výrobní proces nebo dodavatelský řetězec. Tato dvojčata umožňují řízení a optimalizaci procesů od začátku až do konce, pomáhají identifikovat úzká místa, neefektivitu a příležitosti pro zlepšení.

Klasifikace podle fáze životního cyklu

Tento přístup klasifikuje digitální dvojčata podle konkrétní fáze životního cyklu aktiva, kterou podporují:

- **Dvojčata pro návrh:** Používají se v konceptuální a návrhové fázi k simulaci a testování nových produktů, prototypů nebo systémů před jejich sestavením. Tato dvojčata pomáhají zkrátit vývojový čas a zlepšit kvalitu návrhu tím, že včas identifikují potenciální problémy.
- **Dvojčata pro provoz a údržbu:** Nasazují se ve fázi provozu pro monitorování, řízení a optimalizaci výkonnosti aktiva v reálném čase. Jsou vhodná pro údržbu, řešení problémů a sledování výkonnosti v každodenním provozu.

Klasifikace podle úrovně interakce v reálném čase

Tato klasifikace je založena na úrovni interakce a synchronizace v reálném čase mezi digitálním dvojčetem a jeho fyzickým protějškem:

- **Statická dvojčata:** Neobsahují vstupy dat v reálném čase a slouží především k analýze historických dat, často na základě datových snímků. Tato dvojčata jsou užitečná ve scénářích, kde není potřeba dat v reálném čase, jako je analýza po události.
- **Synchronizovaná dvojčata:** Pravidelně aktualizovaná data v téměř reálném čase, poskytují blízkou reprezentaci aktuálního stavu fyzického aktiva. Tato dvojčata se běžně používají pro monitorování a rozhodování, poskytují užitečné poznatky bez nutnosti nepřetržité synchronizace.
- **Dvojčata v reálném čase:** Udržují nepřetržitou synchronizaci s fyzickým aktivem, což umožňuje okamžité rozhodování a kontrolu. Tato dvojčata jsou nezbytná v rychlém prostředí, kde je nutná rychlá reakce, například ve výrobě nebo dopravě.

Dále je jistě možné klasifikovat digitální dvojčata podle toho, v jaké oblasti jsou využita. To je blíže popsáno v následující kapitole.

2.2.2 Účel a role digitálních dvojčat

Bez ohledu na typ digitálních dvojčat a oblast jejich použití je možné definovat v obecné rovině účel, respektive účely, k jakému mohou sloužit. To je velmi užitečné pro uvědomění si celé šíře jejich možného využití.

Jedná se zejména o tyto role, které mohou digitální dvojčata plnit:

Vysvětlení jevů: Digitální dvojčata lze použít k vysvětlení toho, co se stalo v minulosti. Například u digitálních dvojčat založených na senzorech lze hledat vzorce a anomálie v hodnotách ze senzorů.

Předpověď chování: Digitální dvojčata mohou být využita k předpovídání budoucího chování. Například na základě historického chování konkrétního senzoru lze předpovídat jeho budoucí hodnoty.

Zkoumání možností: Síla digitálního dvojčete se ukazuje, když můžeme v digitálním světě zkoumat různé alternativy a vyhodnocovat je podle našich požadovaných kritérií.

Změny ve fyzickém světě: Když můžeme na základě zkoumání v digitálním světě provádět změny ve fyzickém světě, využíváme plný potenciál digitálních dvojčat.

Generování dat: Zatímco můžeme zkoumat alternativní scénáře, pokud máme historická data, můžeme také generovat potenciální hodnoty pro testování ve fyzickém světě. Toto použití digitálních dvojčat poskytuje silný nástroj pro práci, když máme neúplná a nejistá data.

2.2.3 Přínosy digitálních dvojčat

S účelem digitálních dvojčat a rolemi, které mohou při svém využití hrát, také úzce souvisí přínosy, které firmám mohou digitální dvojčata poskytnout.

Digitální dvojčata mohou hrát obrovskou roli v životě firem v řadě odvětví a do budoucna značně ovlivnit jejich konkurenceschopnost. Není náhodou, že se jedná o tak často zmiňovaný pojem v souvislosti s digitální transformací. Digitální dvojčata mohou pomoci s inovacemi a produktovým vývojem, stejně jako se zvyšováním provozní efektivity a odolnosti. Dále jsou přínosy digitálních dvojčat rozděleny do hlavních oblastí.

Podpora inovací a vývoje produktů

Digitální dvojčata umožňují simulovat a testovat nové produkty, systémy a procesy ve virtuálním prostředí před jejich skutečným nasazením. Díky možnosti simulovat „co kdyby“ scénáře a analyzovat výsledky mohou firmy rychleji a levněji vyvíjet nové produkty nebo zdokonalovat stávající procesy. Tento proces zkracuje vývojový cyklus a minimalizuje chyby v návrhu.

Příklad: V automobilovém průmyslu lze vytvořit digitální dvojče prototypu nového vozu, které umožňuje simulaci různých podmínek provozu. Tímto způsobem lze optimalizovat výkon a bezpečnost ještě před výrobou fyzického modelu a snížit tak náklady a čas potřebný na vývoj.

Zvýšení provozní efektivity a úspora nákladů

Díky monitorování a analýze v reálném čase mohou digitální dvojčata optimalizovat provozní procesy, snížit spotřebu energie a minimalizovat náklady na údržbu. Poskytují cenné údaje pro přesné plánování a správu zdrojů, což pomáhá dosáhnout vyšší provozní efektivity s menšími náklady.

Příklad: V energetice může digitální dvojče elektrárny sledovat produkci energie a optimalizovat provoz v závislosti na poptávce a podmínkách. Tímto způsobem se snižuje energetická spotřeba, omezuje opotřebení zařízení a optimalizují se náklady na provoz.

Zlepšení výkonu systémů

Digitální dvojčata umožňují průběžně sledovat a analyzovat výkonnost systémů a identifikovat oblasti pro zlepšení. Díky prediktivní analýze mohou digitální dvojčata předvídat potenciální problémy a navrhnout optimalizace.

Příklad: V dopravě může digitální dvojče infrastruktury, například silniční sítě, monitorovat tok dopravy a doporučovat změny ve směrování provozu. Může tak přispět ke zvýšení plynulosti provozu.

Snížení rizik

Digitální dvojčata pomáhají identifikovat a zmírnit rizika ještě předtím, než nastanou. Díky simulacím a prediktivní analýze mohou organizace modelovat různé scénáře, jako jsou výpadky, havárie nebo kybernetické útoky, a vytvářet plány pro zvládnutí krizových situací. Tento přístup přispívá k vyšší bezpečnosti, zajištění kontinuity provozu a ochraně citlivých informací.

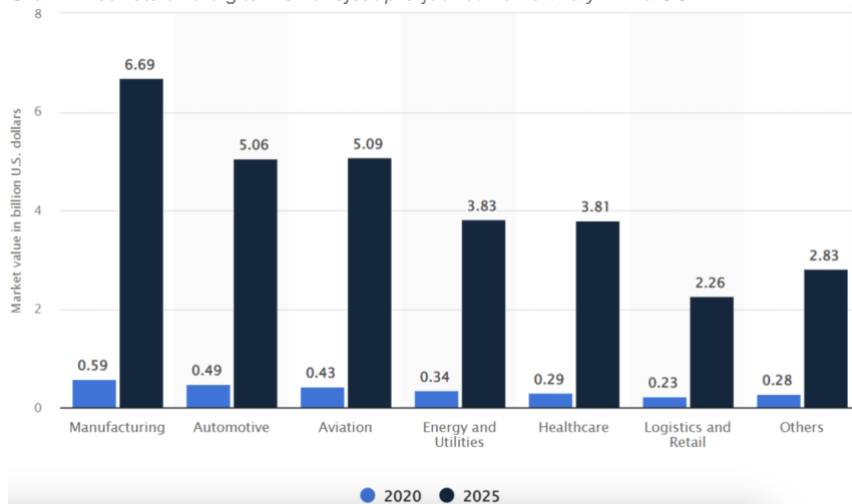
Příklad: V oblasti kybernetické bezpečnosti může digitální dvojče síťové infrastruktury simulovat kybernetické útoky a tím testovat odolnost systému a implementovat ochranná opatření.

2.3 Případy užití a aplikace digitálních dvojčat v různých vertikálách

2.3.1 Přehled trhu a využití digitálních dvojčat ve vertikálách

Digitální dvojčata nacházejí uplatnění v řadě vertikál prostřednictvím velkého množství případů užití. Podle dat společnosti Statista dochází k dramatickému růstu trhu digitálních dvojčat zejména po roce 2020. Jen v oblasti digitálních dvojčat pro oblast výroby má trh hodnotu více než 6 miliard USD.

Graf 1: Hodnota trhu digitálních dvojčat pro jednotlivé vertikály v Mld USD.



Zdroj: Statista²

O mnoho pozadu nezůstávají ani další vertikály jako automotive, letecký průmysl, energetika či zdravotnictví.

Podívejme se blíže na jednotlivé vertikály a typické případy užití v nich. Telekomunikace a jejich případy užití jsou pak shrnuty v kapitole 3.5.

1. Výroba

Digitální dvojčata se stala nezbytným nástrojem ve smart výrobě a Průmyslu 4.0. Vytvořením virtuálních replik strojů, výrobních linek nebo celých továren mohou výrobci sledovat výkon, předpovídat poruchy zařízení a optimalizovat provoz.

Příklady využití:

- **Prediktivní údržba** – Digitální dvojčata umožňují výrobcům sledovat stroje v reálném čase, detekovat rané příznaky opotřebení a naplánovat údržbu dříve, než dojde k poruše.
- **Optimalizace procesů** – V komplexních výrobních procesech digitální dvojčata pomáhají optimalizovat pracovní postupy, identifikovat úzká místa a zefektivňovat výrobu. Simulací různých konfigurací nebo nastavení mohou výrobci najít nejefektivnější přístup k výrobě.

Vzhledem k tomu, že se jedná o nejvýznamější vertikálu pro využití digitálních dvojčat, je jí věnována následující kapitola.

2. Zdravotnictví

Ve zdravotnictví se digitální dvojčata mohou použít k vytváření personalizovaných modelů pacientů nebo lékařských zařízení k lepšímu plánování léčby, sledování pacientů a prediktivní zdravotní péči.

² <https://www.weforum.org/stories/2022/05/digital-twin-technology-virtual-model-tech-for-good/>

Příklad využití:

- Modely specifické pro pacienty – Digitální dvojčata orgánů, jako je srdce nebo plíce, mohou být vytvořena za účelem simulace reakce pacienta na různé způsoby léčby. To umožní lékařům vytvořit personalizované léčebné plány, které snižují rizika a zlepšují výsledky. Například Philips používá digitální dvojčata v kardiologii pro simulaci zákroků a zlepšení plánování operací.
- Správa lékařských zařízení – Nemocnice mohou používat digitální dvojčata pro monitorování výkonu a stavu klíčových lékařských zařízení, jako jsou MRI stroje nebo ventilátory. To umožňuje včasnou údržbu a zajišťuje, že zařízení bude k dispozici, když je potřeba.

3. Energetika a utility

Energetický sektor využívá digitální dvojčata pro optimalizaci výroby, distribuce a spotřeby energie. To je obzvláště důležité, když dochází k přechodu na obnovitelné zdroje, které vyžadují přesné řízení a monitorování.

Příklad využití:

- Řízení energetické sítě – Digitální dvojčata energetických sítí umožňují operátorům monitorovat tok elektřiny, detekovat závady a optimalizovat distribuci energie. S integrací obnovitelných zdrojů digitální dvojčata pomáhají vyvažovat síť a řídit proměnlivé zdroje, jako je solární nebo větrná energie.
- Prediktivní údržba v elektrárnách – Digitální dvojčata zařízení pro výrobu energie (například turbíny a rozvodny) poskytují vhled do případné degradace výkonu a umožňují prediktivní údržbu, která snižuje prostoje a zvyšuje efektivitu.

4. Doprava a automobilový průmysl

Automobilový průmysl využívá digitální dvojčata pro návrh, testování a případně i provoz vozidel. V dopravní infrastruktuře digitální dvojčata pomáhají sledovat a udržovat aktiva, jako jsou silnice, mosty a železniční systémy.

Příklad využití:

- Návrh a testování vozidel – Výrobci automobilů, jako BMW, používají digitální dvojčata pro simulaci a testování návrhů vozidel. Tímto způsobem mohou testovat výkon, bezpečnost a spolehlivost vozidel ve virtuálním prostředí před jejich výrobou.
- Inteligentní dopravní infrastruktura – Města a dopravní úřady využívají digitální dvojčata dopravní infrastruktury ke sledování stavu, řízení dopravního toku a plánování údržby. Například město Singapur využívá digitální dvojče své dopravní sítě k optimalizaci dopravních vzorců.

5. Chytrá města

Digitální dvojčata budou nedílnou součástí rozvoje chytrých měst, kde se mohou použít k vytváření virtuálních modelů celých městských oblastí s integrací dat z budov, dopravy a utilit.

Příklad využití:

- Plánování a rozvoj měst – Plánovači měst využívají digitální dvojčata k simulaci a hodnocení dopadů nových výstaveb, infrastrukturních projektů a populačního růstu na dopravu, znečištění a využívání zdrojů. To pomáhá městům plánovat a realizovat udržitelnější a odolnější městské prostory.
- Řízení krizových situací – Digitální dvojčata umožňují městům simulovat krizové scénáře, jako jsou přírodní katastrofy nebo výpadky infrastruktury. To pomáhá úřadům připravit plány na zvládnutí krizí, což zajišťuje rychlejší a efektivnější reakci na mimořádné události.

6. Logistika a retail

V oblasti retailu a skladování poskytují digitální dvojčata vhled do řízení zásob, optimalizaci uspořádání a chování zákazníků pro zefektivnění provozu a zlepšení spokojenosti zákazníků.

Příklad využití:

- Optimalizace zásob a dodavatelského řetězce – Digitální dvojčata sledují stav zásob, předpovídají poptávku a optimalizují uspořádání skladů. To zajišťuje dostupnost zásob v případě potřeby a minimalizuje náklady na skladování. Například Amazon používá digitální dvojčata pro efektivní řízení složité logistiky a skladovacích operací.
- Optimalizace uspořádání prodejen – Digitální dvojčata prodejen umožňují testování různých uspořádání a umístění produktů, aby se optimalizoval pohyb zákazníků a maximalizovaly prodeje. Díky analýze pohybových vzorců zákazníků mohou prodejci činit rozhodnutí o rozvržení prodejen na základě dat.

7. Letecký průmysl

V leteckém průmyslu se digitální dvojčata používají pro návrh, údržbu a provoz letadel a letecké infrastruktury, včetně aplikací ve správě letového provozu.

Příklad využití:

- Monitorování stavu letadel – Digitální dvojčata letadel sledují stav kritických komponent, jako jsou motory a podvozek, v reálném čase. Analýzou dat z letů umožňují prediktivní údržbu, což snižuje neočekávané prostoje a zvyšuje bezpečnost. Například Airbus používá digitální dvojčata ke sledování stavu dílů letadel a optimalizaci harmonogramů údržby.
- Správa letového provozu – Digitální dvojčata infrastruktury letišť a leteckých sítí pomáhají při řízení toku letového provozu, minimalizují zpoždění a zajišťují efektivní směrování. Digitální dvojčata simulují různé scénáře, jako jsou povětrnostní narušení nebo podmínky vysokého provozu, což optimalizuje správu letového provozu.

Digitální dvojčata se stala hodnotnými nástroji napříč různými průmyslovými odvětvími, umožňujícími lepší monitorování, prediktivní údržbu a provozní efektivitu. S rozvojem technologií, jako jsou AI, IoT a cloud computing, se budou digitální dvojčata dále rozšiřovat a nabízet ještě větší hodnotu při transformaci toho, jak organizace navrhují, provozují a udržují svá aktiva a systémy.

2.3.2 Aplikace digitálních dvojčat ve výrobě

Digitální dvojčata mění rozhodovací procesy ve výrobě. S rostoucími výzvami, jako jsou problémy s dodavatelskými řetězci, drahé energie a nedostatek kvalifikovaných pracovních sil, nabízejí digitální dvojčata řešení pro zvýšení efektivity, škálovatelnosti provozu a zlepšení odolnosti. Poskytují hlubší vhled do výrobních procesů, optimalizují plánování a umožňují testování scénářů „co kdyby“. Digitální dvojčata přispívají k rychlejším, chytřejším a nákladově efektivnějším rozhodnutím.

Hlavní typy digitálních dvojčat ve výrobě.

Digitální dvojčata ve výrobě lze kategorizovat podle jejich rozsahu (jedná se o dobu klasifikace obsažené v kapitole 2.2.1, ovšem aplikovanou přímo na konkrétní vertikálu výroby)³:

1. Dvojčata produktů: Tato dvojčata zachycují detailní informace o jednotlivých produktech a podporují kontrolu kvality, vývoj a zlepšování produktů.
2. Dvojčata aktiv: Představují výrobní aktiva, jako jsou stroje a zařízení. Díky IoT zařízením a senzorům poskytují dvojčata aktiv přehled v reálném čase, což umožňuje prediktivní údržbu a optimalizaci spotřeby energie, výnosů a průchodnosti.
3. Dvojčata továren: Pokrývají celé výrobní linky a integrují data z výrobních informačních systémů (MES), ERP a dalších systémů. Jsou užitečná pro dynamické plánování výroby a analýzu scénářů „co kdyby“ v nastaveních a rozloženích výroby.
4. End-to-end digitální dvojčata: Pokrývají celý dodavatelský řetězec, od dodavatelů až po výrobu a distribuci. Nabízejí pokročilé možnosti plánování a pomáhají řídit složitost dodavatelského řetězce.

³ Sean Camarella, Michael P. Conway, Kevin Goering, and Mark Huntington. *Digital Twins: The Next Frontier of Factory Optimization*. McKinsey & Company, January 2024.

Funkce digitálních dvojčat ve výrobě.

Digitální dvojčata vytvářejí komplexní model výrobního prostředí, používají data v reálném čase k simulaci výsledků a provádějí analýzy „co kdyby“ napříč různými výrobními scénáři. Pokročilá digitální dvojčata také podporují automatizované plánování výroby, buď s dohledem člověka, nebo plnou automatizací.

U nově budovaných továren (tzv. „greenfield“ provozů) digitální dvojčata validují návrh rozložení, optimalizují využití prostoru a odhadují potřeby zásob. V zavedených továrnách identifikují úzká místa, řídí zásoby a optimalizují tok materiálů pomocí aktuálních dat. Digitální dvojčata podporují jak dlouhodobá rozhodnutí, jako jsou projekty kontinuálního zlepšování, tak i rozhodnutí v reálném čase, například úpravy plánů výroby.

Realizace škálovatelného digitálního dvojčete.

Úspěšné digitální dvojče vyžaduje modulární a škálovatelný technologický stack, který integruje data z různých zdrojů a vytváří jednotný zdroj pravdy. Klíčové kroky při budování škálovatelného digitálního dvojčete zahrnují:

1. **Integrace dat:** Sběr dat z MES, ERP, inventárních systémů a IoT senzorů, jejich čištění a strukturování pro účely simulace.
2. **Vytvoření jednotného datového modelu:** Software pro integraci dat standardizuje a kategorizuje informace. To umožňuje efektivní využití dat napříč různými továrními provozy.
3. **Simulace a optimalizace:** Software pro diskrétní simulaci vytváří přesný virtuální model továrny, zatímco optimalizační software identifikuje nejlepší výrobní sekvence. Moderní techniky jako strojové učení (ML) a transferové učení umožňují digitálním dvojčatům přizpůsobovat se změnám v reálném čase a dynamicky zlepšovat výrobní výkon.

Úspěšná implementace digitálních dvojčat je velmi náročný proces. Doporučuje se proto iterativní přístup k vývoji digitálních dvojčat, který začíná konceptem pro ověření proveditelnosti a dopadu dvojčete, následovaný vytvořením minimálního životaschopného produktu (MVP) a jeho připojením k datovým zdrojům v reálném čase.

2.4 Role 5G technologie v konceptu digitálních dvojčat.

Digitální dvojče má potenciál stát se významným nástrojem digitalizace firem, zejména těch průmyslových.

Klíčovým atributem digitálního dvojčete jsou ovšem **data a jejich přenos**, pokud možno v reálném čase, mezi fyzickým objektem a jeho digitální replikou. S rostoucí úrovní digitálních dvojčat rostou také nároky na množství, kvalitu, spolehlivost a bezpečnost těchto datových toků.

Masivní sběr dat z aktiv umožňuje rozvoj (zejména průmyslového) **IoT**. **5G** je pak ideální technologie pro spolehlivý přenos těchto dat. Může se dle požadavků daného systému jednat také o různé IoT varianty 5G technologie, například RedCap, NB-IoT či Cat-M. 5G je technologie dostatečně výkonná, bezpečná (zejména v porovnání s jinými mobilními technologiemi) a současně flexibilní a škálovatelná (v porovnání s pevnými datovými technologiemi). Díky tomu je ideálním nástrojem pro realizaci digitálních dvojčat prakticky ve všech oblastech a vertikálách.

Detailní popis využití 5G technologie pro oblast IoT je možné nalézt ve studii „**Propojení prvků komunikace internetu věcí (IoT) a 5G sítí**“.

Popis vlastností 5G sítí a jejich využití pro digitalizaci firem je pak možné nalézt ve studii „**Využívání 5G a jiných sítí elektronických komunikací pro potřeby digitalizace podniků včetně využití moderních informačních systémů**“

Obě studie byly připraveny pro Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Digitální dvojče v sobě tedy spojuje témata využití 5G pro digitalizaci firem a problematiku IoT.

Role 5G v konceptu digitálních dvojčat je ovšem ještě širší. Je možné ji rozdělit takto:

1. 5G jako technologie umožňující efektivní tvorbu digitálních dvojčat pro různé vertikály a případy užití.
2. Síťové digitální dvojče 5G jako součást propojených digitálních dvojčat.

Propojená digitální dvojčata patří k očekávaným budoucím trendům, kterými se budou ubírat digitální dvojčata a jejich využití, jak je popsáno blíže v kapitole 4.4. Síťová digitální dvojčata přitom budou často jedním z elementů propojeného systému. A to z toho důvodu, že v rámci digitalizace napříč různými vertikálami prakticky vždy bude hrát důležitou roli konektivita. Síť, a často půjde o 5G síť, najdeme v chytrých továrnách, logistických uzlech, nemocnicích nebo chytrých městech. Digitální dvojče těchto sítí bude logicky důležitou komponentou celého systému propojených digitálních dvojčat, které umožní optimalizaci provozu těchto komplexních systémů jako jsou celé továrny či města.

3 Digitální dvojče síťové infrastruktury 5G

3.1 Výzvy spojené s 5G a proč je potřeba digitální dvojče pro 5G síť

Technologie 5G přináší mnoho nových možností nejen pro koncové uživatele, ale zejména pro podniky a jejich pokročilou digitalizaci. Nejen vysoké přenosové rychlosti, vysoká spolehlivost a nízká latence. Ale také možnost využití MEC pro zpracování velkých objemů dat blízko zdroje, garantované parametry QoS díky network slicing či privátním sítím. To jsou vše přínosné vlastnosti 5G spojené s novou architekturou 5G sítí, jejíž základem jsou softwarově definované sítě, virtualizované síťové funkce a oddělení user plane a control plane.

Detailní popis vlastností 5G sítí a privátních 5G sítí je možné nalézt ve studii **“Využívání 5G a jiných sítí elektronických komunikací pro potřeby digitalizace podniků včetně využití moderních informačních systémů“**

Podstata softwarově definovaných sítí a principy fungování network slicing jsou pak vysvětleny ve studii **“Využití systému plátkování 5G sítí pro veřejné a neveřejné sítě“**

Obě studie byly připraveny pro Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Zásadní přínosy 5G technologií mají ovšem také svou daň v podobě výrazně vyšší komplexnosti síťové architektury, náročnosti na design, provoz a optimalizaci sítě pro různé případy užití.

Hlavní výzvy 5G jsou tedy:

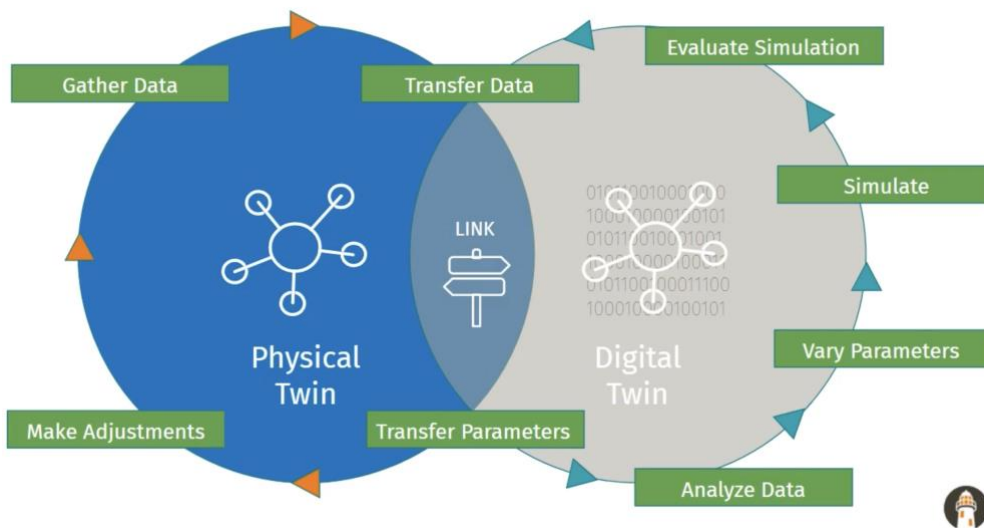
- **Zvýšená složitost sítě:** 5G sítě jsou navrženy s ultra vysokými rychlostmi, nízkou latencí a masivními požadavky na konektivitu, které musí podporovat různá odvětví a pokročilé aplikace jako Průmysl 4.0, autonomní vozidla, elektronické zdravotnictví, nebo kritickou komunikaci (PPDR). Správa takto heterogenních požadavků při udržování vysoké výkonnosti v dynamických prostředích je velmi náročná.
- **Network slicing a virtualizace:** Dynamická přidělování prostředků napříč více virtuálními plátky sítě zvyšují provozní složitost. To znamená, že je třeba zajistit optimální výkon pro různé aplikace, z nichž každá má jiné úrovně služby (SLA) a požadavky na kvalitu služeb (QoS).
- **Rychlost vývoje a časté aktualizace:** Rychlý vývoj softwaru a infrastruktury v 5G, včetně častých aktualizací, nových služeb a pokroků ve virtualizaci, vyžaduje robustní, cenově efektivní testovací prostředí, které minimalizuje rizika při implementaci (deploymentu).
- **Kybernetická bezpečnost:** S rostoucí složitostí sítí se zvyšuje i jejich zranitelnost, což ztěžuje zajištění komplexní kybernetické bezpečnosti.

Právě s řešením těchto výzev může pomoci digitální dvojče síťové infrastruktury (Network Digital Twin – NDT).

Podívejme se nejdříve na jeho definici:

Digitální dvojče síťové architektury 5G (NDT) je virtuální model fyzické sítě 5G, který je neustále aktualizován o reálná data. To umožňuje obousměrný tok informací mezi fyzickým a virtuálním prostředím, což zajišťuje, že se digitální dvojče vyvíjí souběžně s reálnou sítí. NDT poskytuje živou simulaci fyzické sítě, umožňuje operátorům hodnotit výkon, optimalizovat využití prostředků a detekovat a řešit chyby v kontrolovaném prostředí.

Obrázek 1: Digitální dvojče a obousměrné propojení s fyzickým dvojčetem.



Zdroj: Spirent

NDT je tedy virtuální replika mobilní sítě, která může zrcadlit reálné chování fyzické sítě a umožňuje operátorům:

1. Simulovat a předpovídat výkon sítě: NDT pomáhá operátorům modelovat chování sítě, jako je přetížení provozu, před zavedením změn v reálných podmínkách.
2. Provádět virtuální testování: Dvojče umožňuje testování nových služeb a aktualizací v bezpečném simulovaném prostředí. Operátoři mohou simulovat různé podmínky sítě, jako jsou kyberútoky, vysoká zátěž sítě a selhání hardwaru, aniž by ohrozili živou síť.
3. Zlepšit rozhodování: NDT umožňuje automatizované řízení a optimalizaci sítě prostřednictvím reálných analytických dat, která se zpětně integrují do sítě pro zlepšení poskytování služeb.
4. Zrychlit nasazení: Nové služby, aktualizace a vylepšení mohou být testovány a doladěny virtuálně, což zkracuje čas potřebný k uvedení nových případů použití 5G na trh.

Potvrzením takto vymezeného účelu využití 5G digitálního dvojčete a toho, že může skutečně přispět k řešení výše uvedených výzev spojených s nasazením a provozem 5G technologií, je společná aktivita společností Spirent a Ericsson⁴. Tyto společnosti a jejich projekt mají s technologií digitálních dvojčat následující cíle:

- 1) zrychlit dobu validace nového 5G případu použití z měsíců na hodiny, dokonce i minuty;
- 2) sdílet výsledky testů mezi vývojem a provozem během několika minut;
- 3) snížit náklady na nasazení nových služeb, péči a údržbu/odstraňování problémů;
- 4) umožnit aktivní zajištění a údržbu testováním virtuální infrastruktury 5G sítě za účelem nalezení potenciálních problémů;
- 5) podporovat automatizaci a optimalizaci sítě;
- 6) usnadnit network slicing pomocí softwarově definovaných sítí (SDN) a virtualizace síťových funkcí (NFV);

⁴ H. X. Nguyen, R. Trestian, D. To and M. Tatipamula, "Digital Twin for 5G and Beyond," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 2, pp. 10-15, February 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000343.

- 7) testovat více cest slicingu najednou nasazením funkcí potřebných pro nový případ použití. Například ve scénáři sdílené infrastruktury v 5G sítích by digitální dvojče, které je schopné sledovat změny sítě v reálném čase, umožnilo nástrojům umělé inteligence simulovat a předpovídat budoucí výpadky.

3.2 Vymezení NDT vůči stávajícím nástrojům používaným v oblasti 5G infrastruktury.

Pokud se podíváme na definici NDT a jeho účel, zjistíme, že už nyní operátoři používají nástroje, které jim v daných oblastech pomáhají a mají tak s Network Digital Twin určitý překryv či podobnost. Jedná se zejména o tyto nástroje:

- **Network inventory**, tedy evidence sítě, která je věrným digitálním obrazem reálné fyzické sítě a všech jejích prvků.
- **Monitoring sítě**, tedy systémy pro sledování stavu sítě v reálném čase.
- **Testbed**, tedy testovací prostředí do jisté míry kopírující produkční prostředí pro testování nových konfigurací scénářů apod.

Podívejme se proto v detailu na to, v čem se s NDT překrývají a v čem se naopak liší:

1. Systémy správy sítě - Network inventory:

- **Překrývání:** Systémy Network inventory uchovávají podrobné záznamy o fyzických a logických prvcích sítě, včetně konfigurací, propojení a topologie sítě. Poskytují statický pohled na síť. To zahrnuje vizualizace a vztahy mezi aktivy, podobně jako základní funkce NDT.
- **Rozdíly:** Zatímco systémy Network inventory jsou primárně statické a popisné, NDT jsou dynamické a zaměřují se na modelování v reálném čase. NDT se může přizpůsobit reálným změnám v podmínkách sítě, aktualizovat svůj model a poskytovat prediktivní vhledy. Tato schopnost umožňuje NDT simulovat dopady změn téměř v reálném čase a jde tak nad rámec pouhé vizualizace.

2. Nástroje pro monitorování sítě:

- **Překrývání:** Monitorovací nástroje nepřetržitě sbírají telemetrická a výkonnostní data ze sítě. Poskytují přehledy o stavu v reálném čase, detekci chyb a mechanismy pro zasílání upozornění. Toto reálné zobrazení stavu fyzické sítě se překrývá s vizualizací poskytovanou NDT.
- **Rozdíly:** Tradiční monitorovací nástroje se často zaměřují na úzké oblasti, jako je sledování specifických metrik nebo KPI. NDT naopak integruje data z různých zdrojů a vytváří holistický model. Nejenže detekuje problémy, ale také simuluje a analyzuje výsledky konfigurací sítě nebo zásahů, což umožňuje prediktivní údržbu a proaktivní plánování. Kromě toho NDT poskytují obousměrné spojení mezi fyzickou sítí a její digitální replikou, což umožňuje interakce v reálném čase.

3. Testbed:

- **Překrývání:** Testbed slouží k experimentování s novými službami, konfiguracemi a k testování odolnosti sítě v různých scénářích. To odpovídá jedné z klíčových funkcí NDT, což je umožnění bezpečného testování a hodnocení změn sítě bez dopadu na živé prostředí.
- **Rozdíly:** Testbed, přestože je schopné simulovat podmínky reálného světa, jsou často izolovaná a statická prostředí. Nemají stejnou úroveň interakce a synchronizace v reálném čase s fyzickou sítí, jakou mají NDT. NDT jdou nad rámec izolovaných testovacích prostředí tím, že udržují synchronizaci v reálném čase s fyzickou sítí, což umožňuje neustálé úpravy výkonnosti, prediktivní simulace a diagnostiku chyb založenou na reálných datových tocích.

Co tedy odlišuje NDT od tradičních síťových nástrojů?

1) Synchronizace v reálném čase a obousměrná interakce:

NDT vytvářejí nepřetržitý, obousměrný odkaz mezi fyzickou sítí a její digitální replikou. To znamená, že když se fyzická síť změní (např. kvůli modifikaci topologie nebo změnám v přenosu dat), digitální dvojče je automaticky aktualizováno, aby tyto změny odráželo. Naopak lze akce nebo konfigurace testované na digitálním dvojčeti přímo aplikovat na fyzickou síť. Tato dynamická, synchronní propojení umožňují operátorům identifikovat potenciální problémy proaktivně a přijímat rozhodnutí založená na datech.

2) Komplexní integrace více domén:

NDT integrují různé zdroje dat a oblasti pod jeden unifikovaný rámec, zahrnující data o inventury, monitorovacích datech, historických výkonnostních záznamech a dokonce i datech o chování uživatelů. Tato integrace umožňuje komplexní modelování a prediktivní analýzu, což tradiční nástroje nemusí dosáhnout vzhledem ke své více specializované a izolované povaze.

3) Prediktivní a preskriptivní analýza:

NDT nejsou jen reaktivní (jako tradiční nástroje, které detekují a upozorňují na chyby), ale jsou také proaktivní a preskriptivní. Mohou simulovat scénáře „co kdyby“, provádět analýzy dopadů a automaticky optimalizovat konfigurace sítě. Tato prediktivní schopnost umožňuje operátorům předcházet možným výpadkům, optimalizovat přidělování prostředků a simulovat budoucí podmínky sítě.

4) Pokročilé využití umělé inteligence a strojového učení:

NDT využívají AI/ML algoritmy k provádění hluboké analýzy chování sítě a nabízejí samoléčení, detekci anomálií a optimalizaci. Zatímco tradiční nástroje mohou používat monitorování na základě pravidel nebo jednodušší algoritmy, NDT využívají AI/ML k identifikaci složitých vzorců, odvozování korelací a autonomnímu návrhu řešení nebo úprav.

Je možné shrnout, že NDT se od tradičních nástrojů liší svou dynamickou, synchronní integrací, prediktivními analytickými schopnostmi a komplexním pokrytím více oblastí. Zatímco tradiční nástroje jsou velmi cenné pro zobrazení stavu sítě, vizualizaci inventáře (network inventory) a testování izolovaných scénářů, NDT tyto schopnosti rozšiřuje o kontinuální synchronizaci, simulace založené na optimalizaci a proaktivní snižování rizik. NDT v podstatě fungují jako pokročilá inteligentní vrstva, která nepřetržitě monitoruje, simuluje, optimalizuje a přizpůsobuje síť – což jde nad rámec stávajících systémů pro Network inventory, monitorovací nástroje a Testbed prostředí.

Jak bude pravděpodobně vypadat koexistence tradičních nástrojů s digitálními dvojčaty 5G sítí?

Vývoj 5G sítí a vznik digitálních dvojčat sítě (NDT) povede k přechodné fázi, kdy budou tradiční nástroje, jako jsou Network inventory, nástroje pro monitorování sítě a Testbed, i nadále hrát důležitou roli, NDT je bude doplňovat. Navíc mohou být tradiční nástroje do jisté míry využité při realizaci NDT.

Podívejme se na jejich možnou roli ve vztahu k NDT blíže:

Network Inventory Systems:

- **Přínos pro NDT:** Tyto systémy udržují základní data o fyzické a logické konfiguraci sítě. Při počátečním vytváření NDT jsou tato detailní data zásadní pro přesnou konstrukci digitální repliky topologie sítě a její konfigurace.
- **Koexistence:** Systémy Network inventory budou nadále existovat vedle NDT. Poskytují základní statická data, na kterých NDT staví. Naopak NDT mohou nabídnout další vrstvu vizualizace a analýzy v reálném čase nad tímto statickým inventářem. Tato koexistence je tedy komplementární, protože systémy inventury fungují jako statické referenční body, zatímco NDT nabízejí dynamické pohledy a simulace.

Nástroje pro monitorování sítě:

- **Přínos pro NDT:** Monitorovací nástroje generují telemetrická data a výkonnostní data v reálném čase. Tato data jsou zásadní pro to, aby NDT udržovala aktuální pohled na stav a provozní stav sítě. Historická data z monitorovacích nástrojů navíc mohou pomoci při školení prediktivních modelů v rámci NDT.
- **Koexistence:** NDT se silně spoléhají na monitorovací nástroje jako zdroje dat v reálném čase. Zatímco NDT mohou rozšířit přehled díky predikcím a doporučovat optimalizace, tradiční monitorovací nástroje zůstávají nezbytné pro průběžný sběr surových telemetrických dat. NDT zde tedy spíše než nahrazení působí jako vyšší vrstva pro analýzu a rozhodování.

Testbed:

- **Přínos pro NDT:** Testbedy poskytují kontrolované prostředí pro validaci nových služeb, konfigurací sítě a scénářů selhání před jejich nasazením. Toto prostředí poskytuje klíčová data pro budování a ověřování modelů NDT, zejména při vytváření simulací neobvyklých scénářů, které se v živé síti vyskytují jen zřídka.

- **Koexistence:** I když NDT mohou simulovat a předpovídat dopady změn ve virtuálním prostředí, testbedy zůstanou užitečné pro validaci scénářů, které jsou příliš složité nebo riskantní pro testování v produkčním prostředí nebo vyžadují interakci se specifickými hardwarovými komponenty. V průběhu času mohou být testbedy více integrovány s NDT, což umožní hladký přechod mezi simulovanými a reálnými prostředími.

Nahradí NDT tradiční nástroje? Krátká odpověď zní ne, alespoň ne v dohledné budoucnosti.

Zavádění NDT bude pravděpodobně postupné, nikoliv revoluční. Implementace NDT vyžaduje značné investice do integrace dat, modelovacích schopností a interoperability systémů. Tradiční nástroje poskytují klíčové datové zdroje a infrastrukturu pro budování těchto digitálních dvojčat. Jak budou NDT zralé, rozšíří schopnosti těchto nástrojů spíše než aby je učinily zastaralými.

Vývoj digitálních dvojčat 5G sítí bude charakterizován úzkou integrací a vzájemným posilováním s tradičními nástroji. Systémy Network inventory, monitorovací nástroje a testbed budou i nadále hrát klíčovou roli při budování a validaci NDT. Namísto nahrazení těchto nástrojů NDT spíše rozšíří a sjednotí jejich schopnosti, čímž umožní komplexnější a proaktivnější přístup k řízení sítě. Tato konvergence umožní operátorům využít sílu každého nástroje při současném využití pokročilé analytiky, prediktivního modelování a interakčních schopností NDT.

3.3 Architektura a proces návrhu digitálního dvojčete 5G sítě

3.3.1 Architektura a komponenty digitálního dvojčete 5G sítě

Architektura digitálního dvojčete sítě 5G (NDT) ⁵ je navržena jako modulární a škálovatelná, aby odrážela dynamickou a distribuovanou povahu 5G sítí. Klíčové komponenty architektury zahrnují:

1. Data

NDT vyžaduje rozsáhlé množství dat, aby udržovalo synchronizaci s fyzickou sítí. Tato data zahrnují:

- Konfigurační data (směrovací tabulky, metriky rozhraní, detaily zařízení).
- Telemetrická data (výkonnostní metriky v reálném čase).
- Informace o topologii (struktura sítě a propojení).

2. Modely

NDT používá modely založené na datech, které emulují chování síťových komponent. Tyto modely replikují síťové funkce, jako jsou základnové stanice (gNodeBs), jádro sítě a zařízení uživatelů. Modely zajišťují, že virtuální síť se chová jako její fyzický protějšek, což umožňuje přesné simulace provozu, směrování a interakcí na úrovni služeb.

3. Rozhraní

Standardizovaná rozhraní jsou důležitá pro propojení digitálního dvojčete jak s fyzickou sítí, tak s externími aplikacemi. Tato rozhraní zajišťují volný tok dat mezi systémy, což umožňuje nepřetržité aktualizace a interakce v reálném čase. Existují dva hlavní typy rozhraní:

- Fyzické na digitální: Rozhraní umožňující výměnu dat mezi fyzickými prvky sítě a jejich virtuálními reprezentacemi.
- Aplikační vrstva: Rozhraní umožňující externím aplikacím, jako jsou systémy orchestrace sítě a nástroje pro umělou inteligenci, interakci s NDT.

⁵ M. Sanz Rodrigo, D. Rivera, J. I. Moreno, M. Álvarez-Campana and D. R. López, "Digital Twins for 5G Networks: A Modeling and Deployment Methodology," in IEEE Access, vol. 11, pp. 38112-38126, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267548.

4. Mapování

Mapování se týká vztahu mezi fyzickými prvky sítě a jejich digitálními dvojčaty. Tento vztah může být:

- Jeden na jednoho: Přímá synchronizace mezi jedním fyzickým prvkem a jeho virtuálním protějškem.
- Mnoho na jednoho: Situace, kdy je více fyzických prvků mapováno na jedno virtuální dvojče, což umožňuje modelování rozsáhlých sítí.

5. NFV (Network Functions Virtualization - Virtualizace síťových funkcí)

NFV je zásadní pro virtualizaci síťových služeb, jako jsou firewally a směrovače, nahrazením tradičního hardwaru softwarovými síťovými funkcemi. NFV umožňuje operátorům nasazovat tyto funkce dynamicky v rámci digitálního dvojčete.

6. Řízení a orchestrace (MANO)

MANO rámec spravuje životní cyklus virtualizovaných síťových funkcí (NFV) v NDT. Zahrnuje orchestraci, přidělování prostředků a monitorování, které zajišťuje, že NFV jsou nasazeny a spravovány efektivně.

7. Bezpečnostní brány

Aby byla zajištěna bezpečná komunikace mezi fyzickým a digitálním dvojčetem, NDT zahrnují šifrovací protokoly, jako je TLS a post-quantová kryptografie (PQC). Tyto brány chrání citlivá data přenášená mezi oběma prostředími.

3.3.2 Vytvoření digitálního dvojčete sítě: Proces a kroky

Proces vytvoření digitálního dvojčete 5G sítě zahrnuje několik specifických fází, které zajišťují přesnou reprezentaci a synchronizaci sítě v reálném čase. Následující kroky popisují možnou metodiku vytvoření digitálního dvojčete⁶:

Fáze 1: Shromažďování dat

Tato fáze zahrnuje shromažďování dat z fyzické sítě pomocí agentů. Tito agenti shromažďují data o topologii, konfiguraci hardwarových zdrojů, směrovacích tabulkách, šířce pásma a dalších relevantních parametrech pomocí protokolů, jako jsou SNMP, ALTO a ICMP. Tato data jsou poté odeslána do centrálního systému správy, který vytváří komplexní model fyzické sítě.

Fáze 2: Modelování

Jakmile jsou data shromažďována, použijí se k vytvoření sémantického modelu sítě. Tento model abstrahuje složitost fyzické sítě do spravovatelné virtuální reprezentace. Cílem je optimalizovat využití prostředků bez replikace každého prvku fyzické sítě, což zajišťuje efektivitu a cenovou dostupnost digitálního dvojčete.

Fáze 3: Adaptace

Model dat je adaptován pro nasazení v architektuře NFV. V této fázi se používají šablony, jako jsou VNFD (popisovače virtuálních síťových funkcí), které definují virtuální zdroje a zajišťují kompatibilitu s virtualizačními platformami, jako je OpenStack.

Fáze 4: Nasazení NFV

Digitální dvojče je nasazeno pomocí NFV infrastruktury. Architektura podporuje flexibilní možnosti nasazení, buď monolitické (všechny VNF v jedné instanci), nebo distribuované (VNF nasazeny na více virtuálních instancích). Nasazení je řízeno systémem MANO, které orchestruje virtuální prvky tak, aby zrcadlily chování fyzické sítě.

Fáze 5: Provisioning

Provisioning zahrnuje konfiguraci digitálního dvojčete tak, aby se chovalo stejně jako fyzická síť. Nástroje jako ANSIBLE automatizují proces nasazení tím, že spouštějí specifické playbooky navržené pro virtuální prostředí.

⁶ M. Sanz Rodrigo, D. Rivera, J. I. Moreno, M. Álvarez-Campana and D. R. López, "Digital Twins for 5G Networks: A Modeling and Deployment Methodology," in IEEE Access, vol. 11, pp. 38112-38126, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267548.

Fáze 6: Propojení

Tato fáze zajišťuje komunikaci v reálném čase mezi fyzickým a digitálním dvojčetem. Bezpečnostní brány jsou použity k přenosu dat mezi oběma prostředími, což zajišťuje, že oba systémy zůstávají synchronizovány. Komunikace je řízena pomocí protokolů pro zasílání zpráv, jako jsou MQTT nebo RabbitMQ.

Fáze 7: Zpětná vazba a kontinuální optimalizace

Poslední fáze zahrnuje vytvoření okruhu zpětné vazby, kdy se digitální dvojče průběžně aktualizuje na základě telemetrických dat z fyzické sítě v reálném čase. To umožňuje NDT detekovat problémy v síti, optimalizovat výkon a umožnit proaktivní reakce na události v síti, jako jsou výpadky nebo bezpečnostní hrozby. Tato fáze také podporuje testování nových služeb a aktualizací před jejich nasazením v živé síti.

3.4 Rizika a výzvy při implementaci digitálních dvojčat pro 5G

Vytvoření digitálního dvojčete sítě (NDT) pro 5G infrastrukturu přináší řadu výzev a rizik. Dále je analýza klíčových výzev a souvisejících rizik na základě dostupných poznatků⁷.

Hlavní výzvy a rizika:

1. Rizika kybernetické bezpečnosti:

NDT replikuje celou infrastrukturu sítě 5G, včetně jejích dat, protokolů a operací. To znamená, že citlivá data z fyzické sítě jsou zrcadlena v digitálním dvojčeti, což ho činí náchylným k kybernetickým hrozbám. Průnik do digitálního dvojčete by mohl vést k neoprávněnému přístupu a potenciálnímu odhalení konfigurací sítě, vzorců provozu a citlivých uživatelských dat. Z tohoto důvodu je klíčové zajistit robustní opatření pro kybernetickou bezpečnost, jako je šifrování, bezpečné komunikační protokoly a postkvantová kryptografie. Implementace těchto opatření však zvyšuje složitost a náklady na údržbu NDT.

2. Interoperabilita a kompatibilita:

Ekosystém 5G se vyznačuje heterogenními technologiemi a prostředím více dodavatelů. Zajištění, že NDT dokáže přesně emulovat různé prvky (např. základnové stanice, jádro sítě, IoT zařízení) a technologie (např. network slicing, virtualizované funkce), představuje značnou výzvu. Prostředí více dodavatelů vede k různým komunikačním standardům a formátům dat, což vyžaduje sofistikované integrační schopnosti v rámci NDT pro zachování bezproblémové interoperability.

3. Vysoká komplexnost a nároky na zdroje:

NDT musí přesně modelovat dynamické a vyvíjející se komponenty sítě 5G, včetně změn konfigurace v reálném čase, aktualizací hardwaru a network slicing. Tato vysoká úroveň složitosti vyžaduje pokročilé modelování dat a neustálou synchronizaci mezi fyzickými a digitálními protějšky. Navíc vytvoření reálné synchronizace a toku dat mezi fyzickou sítí a jejím digitálním dvojčetem vyžaduje značný výpočetní výkon a úložné kapacity, což zvyšuje náklady.

4. Náklady a nejistota návratnosti investic (ROI):

Nasazení a údržba NDT vyžadují značné investice jak do technologií, tak do lidských zdrojů. Potřeba pokročilých softwarově definovaných sítí, nástrojů pro emulaci a zabezpečených bran se promítá do významných počátečních nákladů. Vzhledem k tomu, že NDT je stále relativně novou technologií, je hodnocení její návratnosti investic spekulativní. Mnoho organizací čelí výzvám při ospravedlňování těchto investic bez jasných důkazů o dlouhodobých úsporách nebo zvýšení efektivity.

5. Riziko neúplné nebo nepřesné replikace:

Úspěšnost NDT závisí na jeho schopnosti přesně replikovat reálnou síť. Nedostatečný sběr dat nebo nedostatečná emulace určitých síťových funkcí může vést k digitálnímu dvojčeti, které se chová odlišně od svého fyzického protějšku. Tato nepřesnost by mohla podkopat hodnotu NDT, protože rozhodnutí založená na chybném digitálním dvojčeti by vedla k suboptimálním výsledkům nebo selháním.

⁷ Huan X. Nguyen et al., "Digital Twin for 5G and Beyond," *IEEE Communications Magazine* 59, no. 2 (February 1, 2021): 10–15, <https://doi.org/10.1109/mcom.001.2000343>.

6. Závislost na vyvíjejících se standardech:

Technologie 5G se stále vyvíjí, standardy a protokoly jsou často aktualizovány nebo měněny. To přidává další vrstvu složitosti, protože NDT musí být neustále aktualizováno, aby odpovídalo nejnovějším standardům. Pokud se tyto změny nebudou pravidelně implementovat, může dojít k nesouladu mezi fyzickou sítí a jejím digitálním dvojčetem.

Možná koncepční opatření k zmírnění rizik a výzev:

1. Komplexní strategie kybernetické bezpečnosti:

Implementace silných bezpečnostních opatření na každé komunikační vrstvě mezi fyzickými a digitálními dvojčaty pomocí postkvantové kryptografie a protokolů Transport Layer Security (TLS) je nezbytná. Měly by být prioritou pravidelné hodnocení bezpečnostního postavení NDT, včetně penetračního testování a simulací reálných útoků.

2. Rámec pro interoperabilitu založený na standardech:

NDT by mělo dodržovat uznávané standardy, jako jsou standardy navržené ETSI nebo IETF pro virtualizaci a integraci síťových funkcí. Tím by se zvýšila kompatibilita a integrace s různými technologiemi 5G a prostředím více dodavatelů.

3. Využití agilního vývoje:

Vzhledem k rychlému pokroku v oblasti 5G je nezbytný flexibilní přístup k vývoji NDT. Využití agilních metodik, včetně rámce pro průběžnou integraci a nasazování (CI/CD) umožňuje organizacím aktualizovat a optimalizovat jejich digitální dvojčata v reakci na změny standardů, protokolů nebo hardwaru.

V souladu s agilními principy je také strategie postupného nasazování. Ověření v rané fázi pomocí modulárních prototypů a rozsáhlých simulací může pomoci doladit NDT před plnohodnotnou implementací.

Tato opatření, pokud budou efektivně implementována, mohou firmám pomoci lépe se orientovat ve složitostech a rizicích spojených s vytvářením a využíváním digitálního dvojčete sítě pro infrastrukturu 5G.

3.5 Případy užití a případové studie digitálního dvojčete 5G infrastruktury

V kapitole 3.1 byly uvedeny důvody využití digitálních dvojčat 5G infrastruktury a jejich účel. V obecné rovině jsou to simulace různých stavů sítě, podpora monitoringu stavu sítě a její optimalizace, zrychlení rozhodování, nasazování nových funkcí a v neposlední řadě posunutí testování na novou kvalitativní úroveň.

Podívejme se ovšem na to, jaké konkrétní případy užití může 5G NDT pomoci řešit. Vzhledem k tomu, že se jedná o technologii skutečně mladou, jedná se o ilustrativní výčet, který se jistě bude rychle rozšiřovat.

Následující příklady ukazují, jak digitální dvojčata přispívají k rozvoji v oblasti C-V2X testování, chytrých továren, správy provozu CSP a dalšího pokroku v oblasti Open RAN, emulace rádiových kanálů a zabezpečení 5G sítí:

1. NDT pro testování vozidel C-V2X⁸:

Digitální dvojčata umožňují virtuální testování připojených a autonomních vozidel (CAVs) simulací různých silničních podmínek a parametrů sítě. Digitální dvojče pomáhá snižovat počet ujetých kilometrů při fyzickém testování a umožňuje zkoumání různých scénářů, jako jsou povětrnostní podmínky, dopravní vzorce a přechody mezi základnovými stanicemi 5G.

2. NDT pro modelování a optimalizaci privátní 5G sítí pro Průmysl 4.0:

Průmysl 4.0, například v podobě chytrých továren, má náročné požadavky, jako je ultra nízká latence, vysoká spolehlivost a bezpečná komunikace. Digitální dvojčata poskytují mechanismus pro modelování, plánování a optimalizaci privátních 5G sítí, čímž zajišťují vysokou synchronizaci zařízení a minimalizují rušení sítě.

3. Využití NDT pro poskytovatele komunikačních služeb (zejména MNOs) pro plánování a řízení kvality služeb (QoS):

Poskytovatelé komunikačních služeb (CSP) mohou používat digitální dvojčata k nepřetržitému modelování a validaci toho, jak by se síťové funkce a procesy měly chovat v reálném čase. Digitální dvojčata umožňují CSP testovat různé konfigurace sítě a proaktivně je optimalizovat. Tím mohou udržovat kvalitu služeb (QoS) na požadované úrovni, a to i při dynamicky se měnících podmínkách.

4. NDT pro 5G poskytované v cloudu:

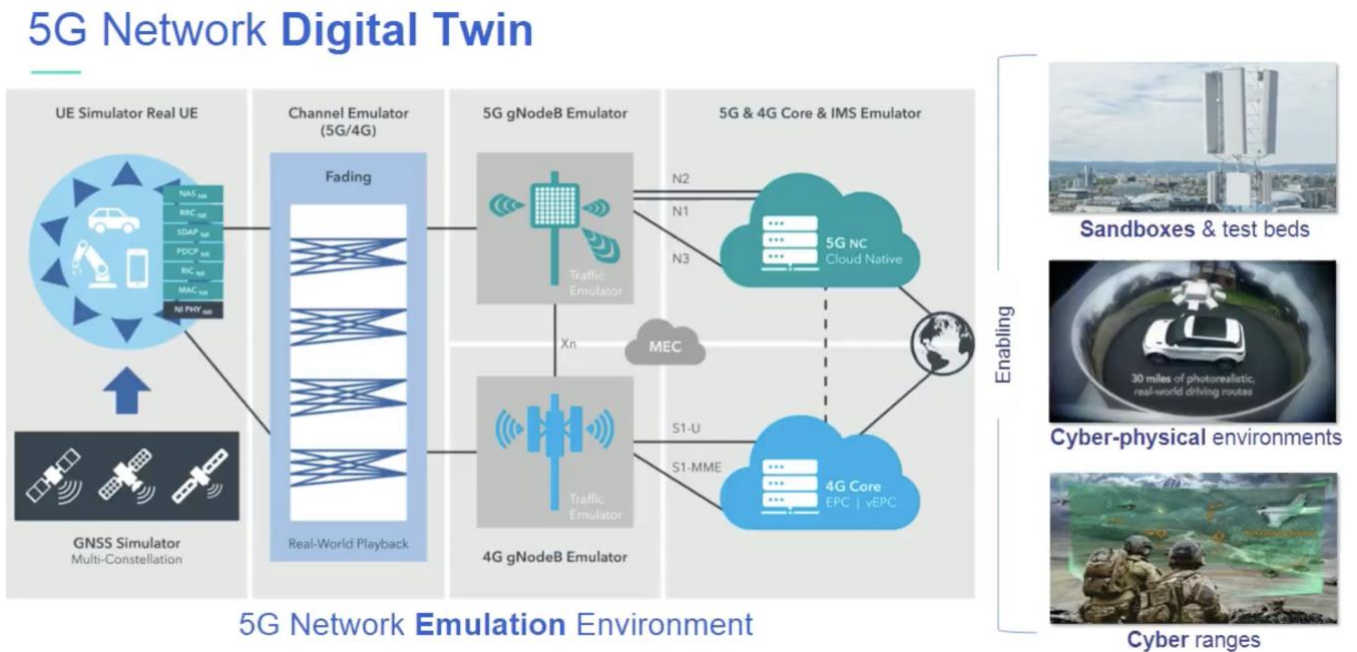
Globální poskytovatelé cloudových služeb (tzv. hyperscalers), hostují cloudové verze 5G CORE a případně také Open RAN (O-RAN). Čelí výzvě v oblasti interoperability vzhledem k nutné spolupráci s více dodavateli a také vzhledem k požadavkům na zajištění nízké latence i při cloudovém nasazení služeb. Digitální dvojčata poskytují sandboxové prostředí pro testování a validaci výkonu různých konfigurací cloudové 5G infrastruktury.

⁸ Spirent, *Simplifying 5G with a Network Digital Twin* (White paper), 2022.

5. Emulace rádiových kanálů 5G:

Digitální dvojčata emulují různé RF kanály (pod 6 GHz a mmWave) a technologie RAN, jako je Massive MIMO a směřování paprsků (beam forming). Tato emulace umožňuje testování základnových stanic a výkonu sítě v komplexních rádiových podmínkách. NDT tak urychluje nasazení 5G validací výkonu RF a optimalizací konfigurace sítě za realistických podmínek.

Obrázek 2: Využití 5G NDT pro emulaci rádiových kanálů a dalších prvků sítě



Zdroj: Spirent

6. Emulace bezpečnostních hrozeb:

Digitální dvojčata se používají k emulaci bezpečnostních hrozeb v prostředí 5G. Vytvářením a testováním různých scénářů útoků pomáhají dvojčata preventivně identifikovat zranitelnosti a navrhnout opatření. NDT tak pomáhají zvyšovat bezpečnost 5G sítí poskytováním kontinuálního hodnocení a proaktivního řízení hrozeb.

7. Emulace network slicing:

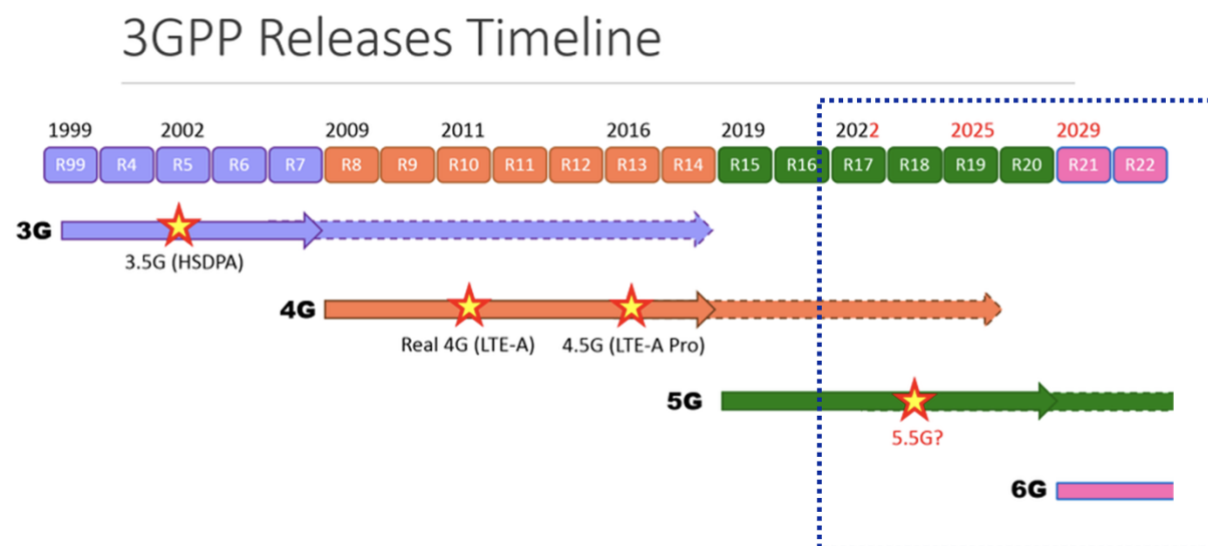
Digitální dvojčata emulují více síťových režů s různými konfiguracemi a výkonnostními kritérii. To umožňuje poskytovatelům služeb testovat a validovat aplikace specifické pro dané síťové řezy, aniž by ovlivnili celou síť. NDT tímto způsobem pomáhá nalézt efektivní alokaci zdrojů a optimalizaci výkonu pro kritické 5G služby.

4 Budoucnost digitálních dvojčat

4.1 Evoluce k 5G Advanced a nové schopnosti pro tvorbu DT

Jakkoli ještě nedošlo k plnému využití potenciálu 5. generace mobilních sítí, některé funkcionality ještě nejsou komerčně dostupné nebo jen v omezené míře (například network slicing), jiné funkcionality nejsou ještě plně standardizované (například passive IoT), probíhá již naplno diskuse standardů směrem k 6G. Jak ukazuje následující obrázek, nacházíme se nyní v etapě vývoje 5G advanced, které je spojovacím můstkem k 6G.

Obrázek 3: Časová osa standardizace směrem k 6G

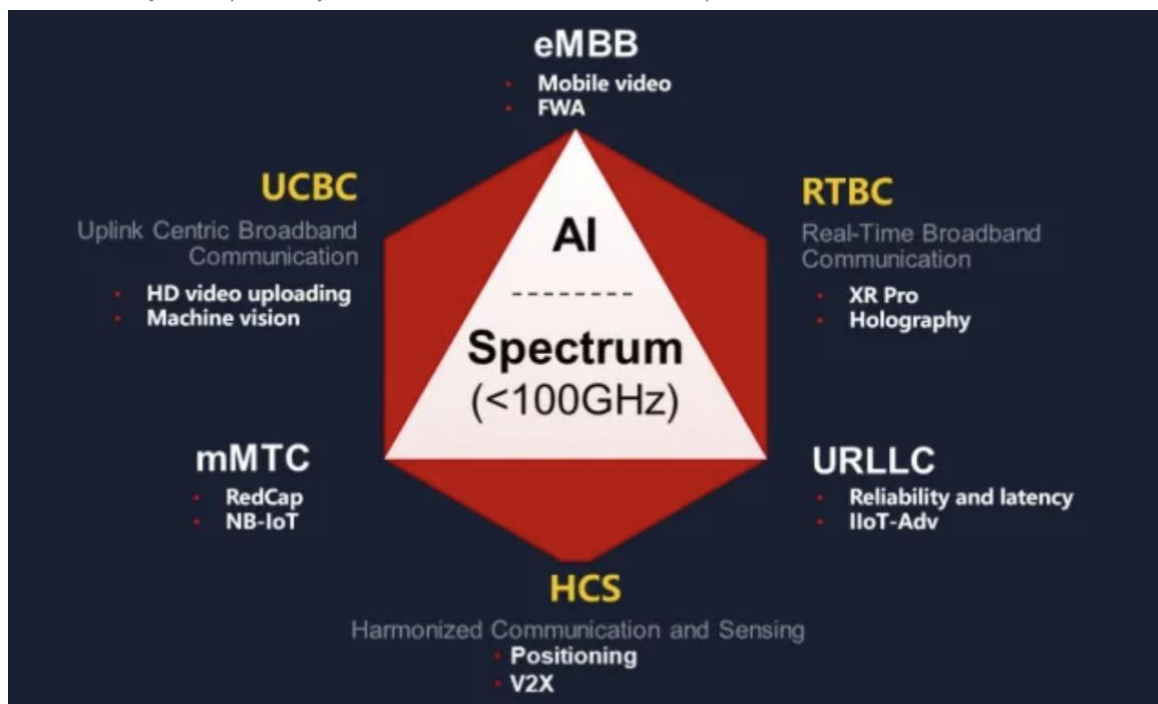


Zdroj: Business Finland

5G Advanced

5G Advanced představuje významný vývoj technologie 5G, zaměřený na odstranění limitů stávajících 5G sítí a přípravu na další pokrok směrem k 6G. Zlepšuje hlavní aspekty 5G, aby uspokojil rostoucí poptávku po inovativních službách.

Obrázek 4: Trojúhelník používaný k definování 5G se stal šestiúhelníkem pro 5G Advanced



Zdroj: Tech Junction⁹

Hlavní technologická vylepšení v rámci 5G Advanced jsou následující:

Tři nové scénáře využití:

- Uplink Centric Broadband Communications (UCBC): UCBC zlepšuje výkon uplinku, což je zásadní pro aplikace vyžadující vysoké objemy datového přenosu směrem nahoru, jako je například strojové vidění.
- Real-Time Broadband Communications (RTBC): RTBC nabízí ultraširoké pásmo a vysokou spolehlivost, což podporuje aplikace jako holografická komunikace, které vyžadují vysoké přenosové rychlosti a minimální latenci.
- Harmonized Communication and Sensing (HCS): HCS integruje komunikaci s přesným snímáním, což je klíčové pro aplikace jako propojená vozidla, drony a průmyslovou automatizaci, kde je nezbytná nízká latence a přesná lokalizace.

Přidáním těchto scénářů 5G Advanced rozšiřuje původní model IMT 2020 a transformuje výkonnostní trojúhelník 5G na šestiúhelník, čímž pokrývá širší spektrum aplikací.

Zvýšená kapacita a výkon sítě:

- Rychlosti uplinku se očekávají až do 1 Gbps, zatímco latence by měla klesnout z 20 ms na 5 ms. To umožní efektivnější a spolehlivější přenosy dat, což je zásadní pro aplikace v reálném čase.
- Vylepšení sítě umožňují 5G Advanced zvládat výrazně větší počet připojení – až 100 miliard připojených zařízení do roku 2030 ve srovnání se současnými 1,3 miliardami.

⁹ <https://techjunction.co/tech-question/new-5g-advanced-use-cases/>

Rozšířená podpora pokročilých aplikací:

- Holografická komunikace: Díky nízké latenci a vysoké propustnosti umožňuje 5G Advanced poskytovat imerzivní zážitky, jako je holografie, což zlepšuje jak osobní, tak profesionální komunikaci.
- Autonomní vozidla: S přesností lokalizace na úroveň centimetrů a ultra nízkou latencí zvyšuje 5G Advanced spolehlivost a bezpečnost autonomních vozidel.
- Rozšířená a virtuální realita (AR/VR): Vyšší přenosové rychlosti a nižší latence činí zážitky v AR/VR realističtějšími a pohlcujícími, což podporuje aplikace ve vzdělávání, zdravotnictví a zábavě.

Chytrá města a městská konektivita:

- 5G Advanced podporuje dynamický provoz chytrých měst, umožňuje tok dat v reálném čase po celém městě, čímž optimalizuje služby, zvyšuje efektivitu a snižuje environmentální dopad.
- Vysoká hustota připojení umožní nové městské aplikace, jako je inteligentní řízení dopravy, energeticky efektivní infrastruktura a systémy veřejné bezpečnosti.

Dopad 5G Advanced na digitální dvojčata:

V případě digitálních dvojčat umožňuje zlepšený uplink a nízká latence technologie 5G Advanced detailnější a reálnější replikaci fyzických prostředí. To podporuje složité aplikace v oblastech, jako je výroba, logistika a zdravotnictví. Vyšší kapacita sítě také umožňuje digitálním dvojčatům spravovat a synchronizovat rozsáhlá data z různých IoT zařízení. Tato schopnost je důležitá, jelikož digitální dvojčata se stále více stávají nedílnou součástí propojených systémů.

4.2 Cesta k 6G a projekt Hexa-X.

V rámci Evropské unie hraje podstatnou roli v tranzici směrem k 6G projekt Hexa-X¹⁰.

Projekt Hexa-X je klíčová evropská výzkumná iniciativa zaměřená na vývoj základních technologií pro síť 6G. Projekt je financován Evropskou unií v rámci programu Horizon 2020 a jeho cílem je upevnit pozici Evropy jako lídra ve výzkumu a inovacích v oblasti 6G. Projekt Hexa-X připravuje půdu pro 6G tím, že definuje rané standardy, řeší technické výzvy a stanovuje klíčové výkonnostní požadavky. Výsledky projektu Hexa-X ovlivní návrh sítě 6G. Má zajistit soulad se strategickými cíli Evropy v oblasti technologické suverenity, environmentální udržitelnosti a digitální transformace.

Projekt Hexa-X má definované následující klíčové cíle:

1. Výzkum případů využití a aplikací pro 6G: Hexa-X identifikuje potenciální aplikace pro 6G, včetně inteligentní dopravy, pokročilé zdravotní péče, průmyslové automatizace a imerzivní rozšířené reality (XR).
2. Rozvoj klíčových technologií pro 6G: Projekt se zaměřuje na klíčové technologie 6G, jako jsou:
 - Umělá inteligence (AI) a strojové učení (ML) pro správu, automatizaci a optimalizaci sítí.
 - Síť sítí pro bezproblémovou integraci pozemních a nepozemských sítí (například satelitních, dronových a námořních sítí).
 - Subterahertzové frekvenční pásma pro podporu ultra vysokorychlostní a nízkolatenční komunikace.
3. **Podpora digitálních dvojčat a rozhraní mezi člověkem a strojem (HMI – Human Machine Interface):** Hexa-X zkoumá technologie digitálních dvojčat a nová HMI jako způsoby propojení fyzického a digitálního světa, umožňujícího zpětnou vazbu a ovládání v reálném čase.

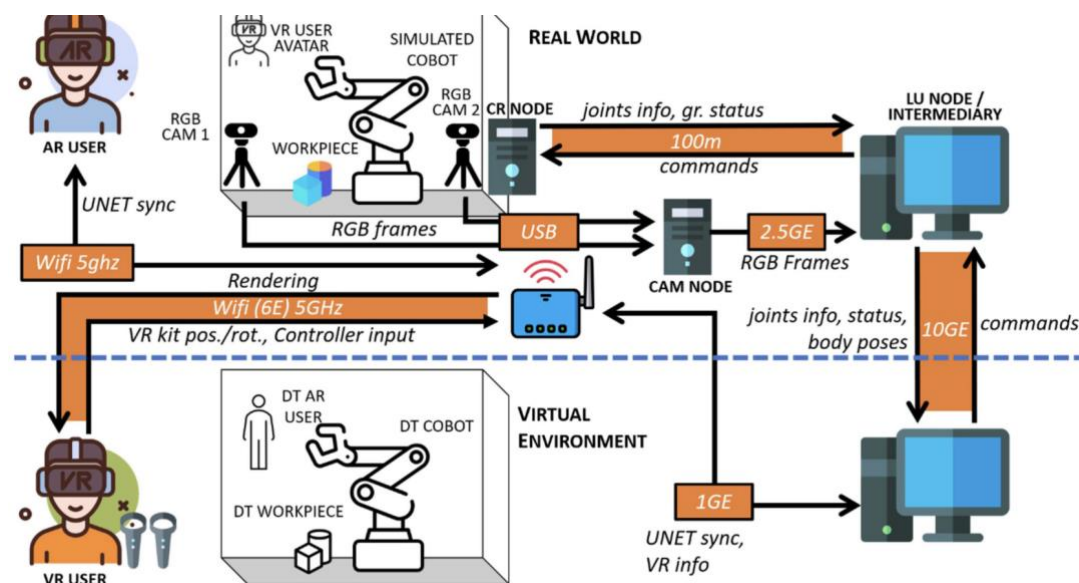
¹⁰ <https://hexa-x.eu>

4. Podpora udržitelnosti a energetické efektivity: Cílem projektu je, aby byly sítě 6G energeticky efektivnější a ekologičtější, a proto se zaměřuje na vývoj zelených technologií a mechanismů pro úsporu energie.
5. Zajištění bezpečnosti a ochrany soukromí: Hexa-X se věnuje budování bezpečných architektur pro 6G s ohledem na nově vznikající kybernetické hrozby a výzvy v oblasti ochrany soukromí.

Podpora digitálních dvojčat a propojení fyzického a digitálního světa tedy patří k jednomu z hlavních cílů projektu Hexa-X.

Nové technologie digitálních dvojčat a rozhraní člověk-stroj (HMI) hrají důležitou roli při umožnění nových 6G případů užití a realizace konvergence fyzického, digitálního a lidského světa. Projekt Hexa-X představil a analyzoval nové technologie HMI a digitálního dvojčete a zkoumal jejich aplikace v budoucích systémech 6G.¹¹

Obrázek 5: Architektonický přehled příkladu interakce člověk-stroj v průmyslovém prostředí pomocí digitálních dvojčat



Zdroj: Hexa-X D7.2

V rámci projektu Hexa-X jsou definované zejména tyto případy užití digitálních dvojčat v 6G systémech:

Kolaborativní roboti s digitálními dvojčaty: Digitální dvojčata na pracovišti lze vylepšit z hlediska lokalizace a vizualizace, zatímco digitální dvojče místního uživatele lze vylepšit tím, že umožní rekonstrukci pozice celého těla pomocí počítačového vidění (CV) a technik AI. To umožňuje sofistikovanější scénáře HMI, ale vyžaduje další připojený hardware a může vyvolat přehodnocení síťových požadavků.

Adaptace funkčního rozdělení na bázi digitálního dvojčete pro průmyslové sítě: Koncepte řídicího systému na bázi digitálního dvojčete je navržena pro určení optimálního funkčního rozdělení ve velkém průmyslovém RAN, který se skládá z heterogenních buněk. Tato RAN je zodpovědná za poskytování konektivity jak pevným stanicím, tak pohyblivým AGV nasazeným pro různé úkoly, jako je přeprava dílů a monitorovací aktivity v průmyslové oblasti.

Digitální dvojčata pro emergentní inteligenci: Rozsáhlá přístupová kapacita a plné pokrytí 6G umožňují vznik emergentní inteligence (EI) v rozsáhlých sítích. Škálování systému a zajištění efektivní komunikace mezi agenty však představuje výzvy. K vyřešení tohoto problému lze nasadit masivní twinning, který umožní rozhodovacímu motoru agentů EI sídlit v jejich digitálních dvojčatech. Agenti komunikují s cloudovými servery hostujícími jejich digitální dvojčata, čímž snižují režii signalizace, zlepšují efektivitu zdrojů a snižují latenci.

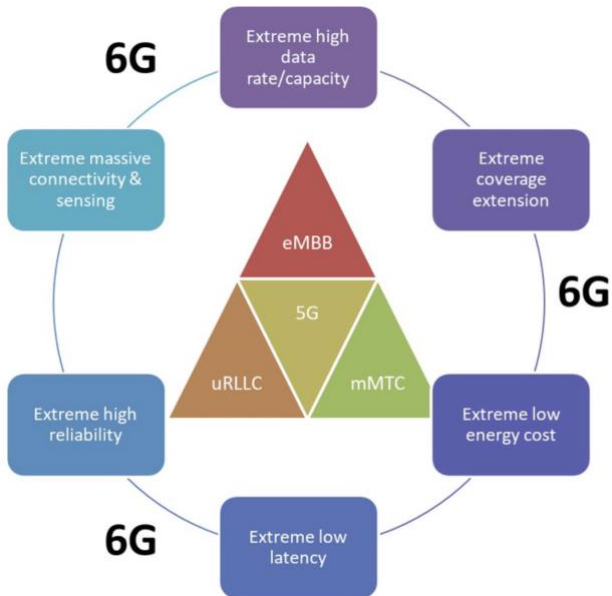
4.3 Nové funkcionality 6G přinesou také nové výzvy

Vývoj 6G sítí přinese několik zásadních funkcionalit, které jdou nad rámec schopností 5G. Tyto nové vlastnosti mají podpořit náročnější aplikace, posílit konektivitu a využít data v reálném čase způsobem, který dosud nebyl možný. Tyto inovace však

¹¹ <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/6/hexa-x-laying-the-foundation-for-6g>

také výrazně zvyšují složitost sítě – a to i nad rámec komplexity 5G. To dále zdůrazňuje potřebu nástrojů, jako jsou digitální dvojčata sítě, která mohou efektivně spravovat a optimalizovat tyto nové systémy.

Obrázek 6: Rozšíření schopností sítě z 5G k 6G



Zdroj: Asghar, Memon & Hämäläinen¹²

Následující přehled představuje klíčové funkce 6G, tak jak jsou v této chvíli diskutované a plánované. Včetně toho, jakou komplexitu představují a možné role digitálních dvojčat při řešení těchto výzev.

1. Síťové snímání (Network Sensing)

V 6G může síťová infrastruktura fungovat jako masivní snímací nástroj tím, že používá a analyzuje rádiové vlny k detekci okolního prostředí. Tato schopnost umožňuje sítím shromažďovat údaje o pohybu, detekci objektů a dokonce i o povrchových texturách, což podporuje aplikace, jako je autonomní řízení, monitorování životního prostředí a řízení měst.

Síťové snímání přináší náročné požadavky na zpracování signálu a analýzu dat v reálném čase. Síť musí rozlišovat mezi standardními komunikačními daty a informacemi ze snímání, což vyžaduje pokročilé algoritmy AI a vysoký výpočetní výkon.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata mohou simulovat schopnosti síťového snímání a poskytnout virtuální prostředí pro testování algoritmů snímání, posouzení jejich přesnosti a optimalizaci strategií zpracování signálů. To umožní operátorům vyladit snímací protokoly před jejich nasazením v reálných sítích.

2. Ubiquitous Communications a integrace satelitní komunikace

6G bude usilovat o bezproblémovou globální konektivitu integrací pozemních, vzdušných a satelitních sítí. Tato schopnost zajistí pokrytí v odlehlých a nedostatečně obsluhovaných oblastech, což umožní přístup pro aplikace jako zásahy při katastrofách, vzdálená zdravotní péče a globální konektivita IoT.

Správa konektivity napříč různými prostředími – například při přepínání mezi pozemními a satelitními odkazy – bude vyžadovat vysoce dynamické směrovací protokoly a pokročilé mechanismy předání. Navíc bude nezbytná interoperabilita mezi různými standardy sítí a komunikačními protokoly mezi satelity a pozemními sítěmi.

¹² Asghar, Z.A.; Memon, S.A.; Hämäläinen, J. Evolution of Wireless Communication to 6G: Potential Applications and Research Directions. *Sustainability* 2022.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata pomohou modelovat a testovat plynulé předání (handover) mezi pozemní a satelitní konektivitou a posuzovat výkon napříč různými prostředím. Tato simulace sníží riziko selhání sítě během reálného nasazení a zajistí stabilitu služeb, což bude zásadní pro aplikace vyžadující spolehlivou konektivitu v izolovaných oblastech.

3. Automatizace sítě řízená AI a autonomní systémy

6G bude výrazně spoléhat na AI pro automatizaci sítě, což umožní síti samostatně optimalizovat, samoopravovat se a dokonce předvídat uživatelské požadavky. Síť se tak bude moci v reálném čase přizpůsobit měnícím se podmínkám a zajistit optimální výkon a alokaci zdrojů.

Automatizace řízená AI přidá vrstvy rozhodovacích algoritmů a modelů strojového učení, které budou vyžadovat průběžné aktualizace a velké množství dat v reálném čase. Implementace samo-optimalizujících se sítí bude rovněž vyžadovat složitou komunikaci mezi jednotlivými jednotkami pro kolektivní rozhodování, jak je vidět u emergentní inteligence.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata poskytnou kontrolované prostředí pro testování AI modelů a rozhodovacích algoritmů, což umožní inženýrům sledovat, jak autonomní systémy reagují na simulované změny v síti. To pomůže identifikovat potenciální problémy v AI algoritmech a podporovat průběžné zlepšování funkcí autonomních sítí.

4. Vysoce přesné určování polohy a lokalizace

Nad rámec tradiční lokalizace pomocí GPS budou sítě 6G usilovat o přesnost na úrovni centimetrů pomocí pokročilého snímání a analýzy rádiových vln. Vysoce přesná lokalizace bude zásadní pro autonomní vozidla, řízení dronů a aplikace rozšířené reality.

Dosažení této přesnosti bude vyžadovat pokročilé lokalizační algoritmy, přesnou kalibraci senzorů a integraci více zdrojů lokalizačních dat. To přinese další nároky na infrastrukturu sítě a bude vyžadovat ultra nízkou latenci pro poskytování lokalizačních informací v reálném čase.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata umožní simulaci vysoce přesného určování polohy ve virtuálním prostředí a testování, jak různé proměnné (například povětrnostní podmínky, překážky nebo hustota zástavby) ovlivňují přesnost lokalizace. To pomůže zpřesnit lokalizační algoritmy a zajistit spolehlivý výkon před nasazením v živých sítích.

5. Integrovaná komunikace a snímání pro IoT a chytrá prostředí

6G bude mít za cíl integrovat komunikaci se snímáním mezi miliardami IoT zařízení, což umožní síti podporující chytrá města, továrny a domácnosti. Například senzory budou moci monitorovat podmínky prostředí a přenášet data v reálném čase pro aplikace, jako je kontrola znečištění nebo řízení energie.

Současné zpracování komunikace a snímání mezi masivním množstvím IoT zařízení bude vyžadovat robustní síť schopnou spravovat vysoké objemy datového provozu a zajišťovat synchronizaci mezi zařízeními. Navíc bude složité dosáhnout energetické efektivity, protože zařízení IoT často pracují s omezenou energií.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata budou moci emulovat chytrá prostředí s propojenými IoT zařízeními a umožní simulaci toků dat a interakcí mezi zařízeními. To pomůže operátorům pochopit potenciální úzká místa, optimalizovat synchronizaci zařízení a zajistit efektivní zpracování dat.

6. Rozšířená realita (XR) a holografická komunikace

6G sítě budou podporovat plně pohlcující (immersive) zážitky, včetně virtuální a rozšířené reality (VR/AR), a holografické komunikace pro aplikace ve vzdělávání, zdravotnictví a zábavě.

XR a holografické aplikace budou vyžadovat extrémně vysoké přenosové rychlosti, minimální latenci a synchronizaci mezi více datovými proudy. Podpora těchto aplikací bude náročná, protože bude vyžadovat neustálou optimalizaci výkonu sítě a přesné zpracování dat.

Možná role digitálních dvojčat: Digitální dvojčata budou replikovat nároky XR a holografické komunikace v kontrolovaném prostředí, což operátorům umožní testovat schopnost sítě udržet konzistentní výkon při vysoké datové zátěži. Tato simulace identifikuje slabiny výkonu a umožní úpravy před nasazením tak, aby splnila požadavky uživatelské zkušenosti.

Vysoká složitost 6G kvůli těmto pokročilým funkcím učiní digitální dvojčata sítí prakticky nezbytnými nástroji zejména pro provozovatele těchto sítí a celý návazný ekosystém. Celkově vzato, pokročilé funkce 6G výrazně zvýší složitost síťového provozu, což učiní digitální dvojčata nezbytnými pro efektivní návrh, testování a správu v reálném čase. Digitální dvojčata poskytnou bezpečné virtuální prostředí pro průběžnou optimalizaci, čímž zajistí, že 6G sítě budou odolné, efektivní a schopné podporovat budoucí aplikace.

4.4 Vybrané perspektivní aplikace digitálních dvojčat

Aplikace digitálních dvojčat se bude nepochybně dále vyvíjet, a to směrem k čím dál sofistikovanějším a zejména propojenějším modelům. Vzhledem k tomu, že síťová konektivita je prvkem, který obsahuje velká část digitalizovaných provozů a systémů napříč všemi vertikálami, může digitální dvojče síťové infrastruktury hrát roli nejen přímo v telekomunikační oblasti, ale může být jedním z prvků propojených systémů v řadě dalších oblastí. Vybrané perspektivní oblasti aplikace digitálních dvojčat jsou popsány dále:

1. Propojená digitální dvojčata a kyber-fyzikální systémy

Evoluce digitálních dvojčat (DT) směřuje k propojenějším a kooperativnějším systémům, často označovaným jako "propojená digitální dvojčata." Tento koncept jde nad rámec jednotlivých DT a zahrnuje sítě dvojčat, které spolu komunikují a sdílejí data, což umožňuje komplexnější a dynamičtější reprezentace složitých systémů.

Propojená digitální dvojčata zahrnují integraci několika DT, přičemž každé představuje odlišná fyzická aktiva nebo procesy, do soudržné sítě. Toto propojení umožňuje výměnu dat v reálném čase a spolupráci mezi různými komponenty, čímž se usnadňuje holistický pohled a správa složitých systémů.

V urbanistickém plánování mohou propojená DT integrovat data z dopravy, utilit a infrastruktury za účelem optimalizace městských operací, zvyšování udržitelnosti a zlepšování kvality života obyvatel.

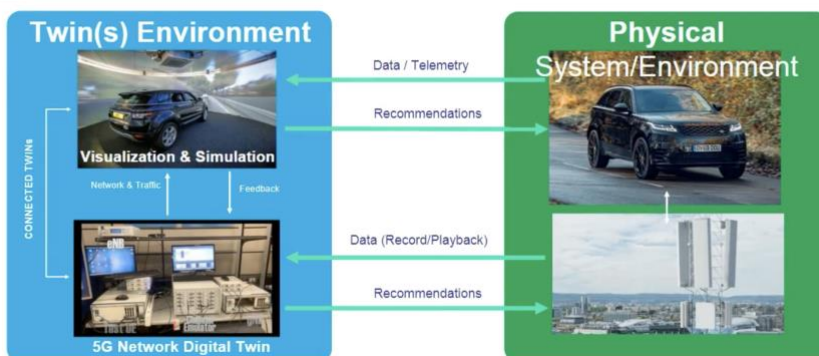
Ve výrobě umožňují propojená DT synchronizaci výrobních linek, dodavatelských řetězců a údržby zařízení.

Propojená DT mohou reprezentovat různé aspekty péče o pacienta, od jednotlivých orgánů po celé zdravotnické systémy. Tato integrace umožňuje personalizované léčebné plány, simulaci lékařských procedur a zlepšené výsledky pro pacienty. Výzkumníci například vyvíjejí digitální dvojčata orgánů, jako je srdce, aby simulovali léčbu před skutečnými zákroky.

V energetickém sektoru mohou propojená DT monitorovat a spravovat výrobu, distribuci a spotřebu energie. Tento propojený přístup může zvyšovat spolehlivost sítě, integrovat obnovitelné zdroje energie a optimalizovat využití energie.

Obrázek 7: Propojená digitální dvojčata automotive a sítě

Connected Twins & Cyber-Physical systems



Zdroj: Spirent

2. Cyber range (kybernetické trenažéry) - simulace rizik a nápravných opatření

Kybernetické trenažéry jsou simulovaná digitální prostředí, která umožňují bezpečné testování strategií a postupů v oblasti kybernetické bezpečnosti. Tyto trenažéry budou moci využívat digitální dvojčata k napodobení chování celé sítě nebo konkrétních zařízení.

Pomocí kybernetických trenažerů budou moci organizace simulovat různé scénáře útoků, testovat reakce bezpečnostních týmů a identifikovat slabá místa v infrastruktuře kybernetické bezpečnosti. Například finanční instituce mohou simulovat kybernetické útoky na transakční systémy, aby vyškolily pracovníky v reálné reakci na incident.

Kybernetické trenažéry budou umožňovat organizacím testovat nápravná opatření, jako je izolace zasažených částí sítě nebo nasazení automatizovaných obranných mechanismů. Využitím DT poskytují zpětnou vazbu o dopadech útoku a čase obnovy, což pomáhá organizacím vylepšovat postupy ochrany a odolnosti.

Tyto kybernetické trenažéry s podporou DT budou přínosné zejména pro oblasti jako kritická infrastruktura, sítě, energetika, obrana a zdravotnictví, kde je kybernetická bezpečnost zásadní.

3. Modely pro doporučení a provozní efektivitu

Digitální dvojčata budou umožňovat vytváření systémů doporučení, které využívají data v reálném čase, historické výkonnostní záznamy a prediktivní analýzy k optimalizaci provozu a zlepšení rozhodování. Díky simulaci různých provozních scénářů budou moci tyto systémy nabídnout doporučení vedoucí ke zvýšení efektivitu a snížení nákladů.

Ve výrobě a v oblasti utilit mohou rekonstrukční enginy založené na DT doporučovat plány údržby na základě aktuálních dat o zařízení a historických vzorců využití. Budovy a továrny mohou díky systémům doporučení snižovat spotřebu energie. Například DT model HVAC systému může doporučit energeticky úsporná nastavení na základě obsazenosti budovy, počasí a historických dat. V logistice pomohou rekonstrukční enginy optimalizovat úroveň zásob, trasy přepravy a harmonogramy dodávek. Neustálou analýzou dat v dodavatelském řetězci mohou DT předvídat narušení a navrhnout alternativní trasy či dodavatele, což zvyšuje flexibilitu a odolnost dodavatelských sítí.

4. CI/CD kontinuální testování sítí

CI/CD (Continuous Integration/Continuous Deployment) systémy, které jsou klíčové pro agilní vývoj softwaru, jsou stále relevantnější i pro provoz sítí, zejména v telekomunikacích. DT v budoucnu vytvářet virtualizované síťové prostředí, kde lze průběžně testovat aktualizace a změny.

Pro telekomunikační poskytovatele bude umožňovat DT rychlé testování a validaci síťových aktualizací, od softwarových oprav až po hardwarové konfigurace, v rámci virtuálního prostředí, které věrně napodobuje živou síť. To bude minimalizovat prostoje a umožňovat rychlejší zavádění nových služeb.

Integrace DT s CI/CD kanály bude podporovat automatizované testování, kdy je každá změna kódu nebo nastavení sítě validována v digitálním dvojčeti před živým nasazením. Tato automatizace bude zvyšovat přesnost a snižuje riziko lidské chyby, což je kritické v sektorech vyžadujících vysokou dostupnost a spolehlivost.

Jak se sítě vyvíjejí s příchodem 5G, edge computingu a network slicing, CI/CD s podporou DT bude podporovat rychlou iteraci a testování potřebné k tomu, aby splňovaly dynamické požadavky nové generace aplikací.

5. Simulace ve zdravotnictví a personalizovaná medicína

Digitální dvojčata ve zdravotnictví budou vytvářet modely jednotlivých pacientů na základě jejich zdravotních dat, což umožní vysoce personalizované léčebné plány. Tato dvojčata mohou simulovat reakce na různé možnosti léčby, což lékařům umožní vybrat nejúčinnější a nejméně invazivní přístup.

Chirurgové a medici budou moci pomocí digitálních dvojčat trénovat složité procedury ve virtuálním prostředí, čímž získávají dovednosti a jistotu před skutečnými zákroky. V krizových situacích mohou poskytovat DT ve zdravotnictví spolehlivý způsob simulace a nácviku vysoce rizikových procedur.

6. Řízení a optimalizace chytrých měst

Digitální dvojčata pro chytrá města budou shromažďovat data z dopravy, energetiky, vodohospodářství a veřejné infrastruktury. To poskytne komplexní přehled o provozu města. Umožňují tak předvídat problémy, jako je dopravní zácpa nebo nedostatek energie, a reagovat proaktivně.

DT umožní plánovačům měst modelovat dopady různých scénářů, jako je zvýšená doprava nebo nové stavební projekty. To podpoří lepší rozhodování zaměřené na udržitelnost a pomůže městům snižovat emise a efektivněji hospodařit s prostředky.

7. Retail a spotřebitelské chování

Obchodní řetězce budou moci využít digitální dvojčata k simulaci uspořádání obchodu a zákaznických toků, optimalizovat rozmístění regálů, umístění produktů a alokaci personálu za účelem maximalizace prodeje. Tento přístup bude cenný pro e-commerce sklady, kde optimalizace rozložení zrychluje a zpřesňuje plnění objednávek.

Shrnutí:

Budoucnost digitálních dvojčat má transformační potenciál napříč různými sektory, od autonomního řízení a kybernetické bezpečnosti až po personalizovanou medicínu a řízení chytrých měst. Každý z těchto scénářů ukazuje, jak se DT vyvíjejí z pouhých replik na proaktivní, prediktivní a inteligentní agenty. Díky schopnosti umožnit kontinuální testování, řízení rizik, provozní optimalizaci a získávání dat v reálném čase se digitální dvojčata mohou stát důležitým prvkem růstu a inovací ve světě. Využití digitálně-fyzické integrace může přinést neporovnatelnou agilitu při vývoji v různých oblastech a zároveň zvyšování provozní efektivity.

Příloha 1 – Případová studie: ČVUT - Digitální dvojčata pro predikci kvality signálu mezi zařízeními

Katedra telekomunikací v rámci Fakulty elektrotechnické ČVUT pod vedením profesora Bečváře připravila koncept využití modelu digitálního dvojčete pro predikci kvality signálu mezi dvěma zařízeními.

Dále je tento model popsán, včetně možného přínosu pro budoucí využití v 5G a 6G sítích:

Úvod do problému

Ve bezdrátových sítích je klíčové udržovat vysokou kvalitu komunikace mezi zařízeními. Tradičně se kvalita kanálu (síla a spolehlivost signálu mezi dvěma zařízeními) měří přímo prostřednictvím referenčních signálů. Tento přístup je však náročný na rádiové zdroje a energii, protože vyžaduje časté vysílání referenčních signálů a měření jejich kvality přijímačem, zejména v sítích, kde komunikuje velké množství zařízení.

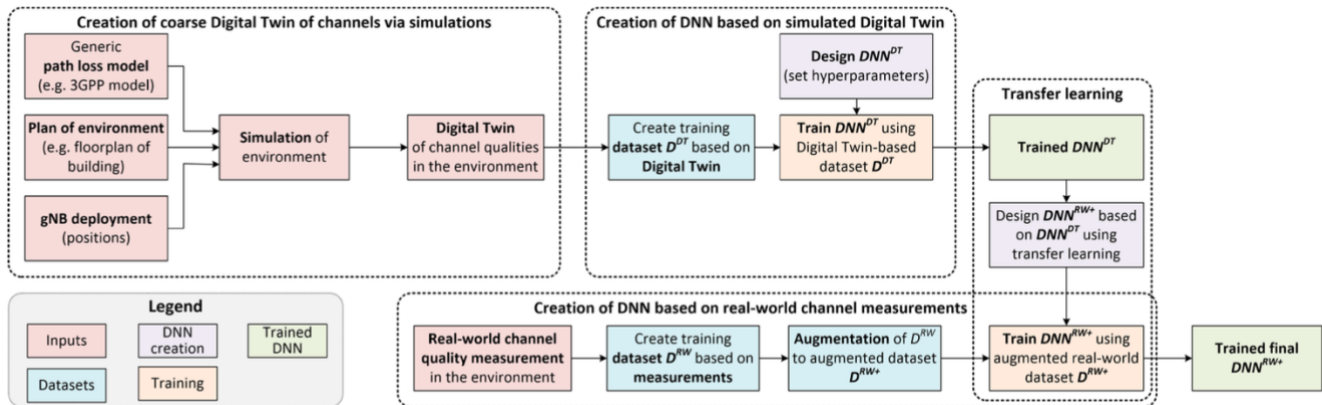
Koncept digitálního dvojčete pro predikci kanálu

Digitální dvojče je virtuální model, který odráží vlastnosti a chování fyzického prostředí sítě. V tomto kontextu pomáhá s predikcí kvality kanálu prostřednictvím simulace podmínek v síti. Digitální dvojče pro predikci kvality kanálu v bezdrátové komunikaci využívají strojové učení, zejména hluboké neuronové sítě (DNN), k odhadu síly signálu mezi dvěma zařízeními na základě údajů ze sousedních referenčních bodů (například základnových stanic).

Tento přístup využívá digitální dvojče jako jednoduchou virtuální reprezentaci reálného prostředí, což umožňuje predikci na základě kombinace syntetických a reálných dat pomocí transfer learningu (přenosu učení), což je technika, při níž je model natrénovaný na syntetických datech vylepšen a zpřesněn pomocí reálných dat.

Postup predikce kanálu pomocí digitálních dvojčat

Obrázek 8: Přehled navrhovaného řešení pro predikci kvality kanálu založeného na hrubém a nízko-složitostním digitálním dvojčeti kombinovaném s rozšířenými reálnými měřeními prostřednictvím transfer learningu

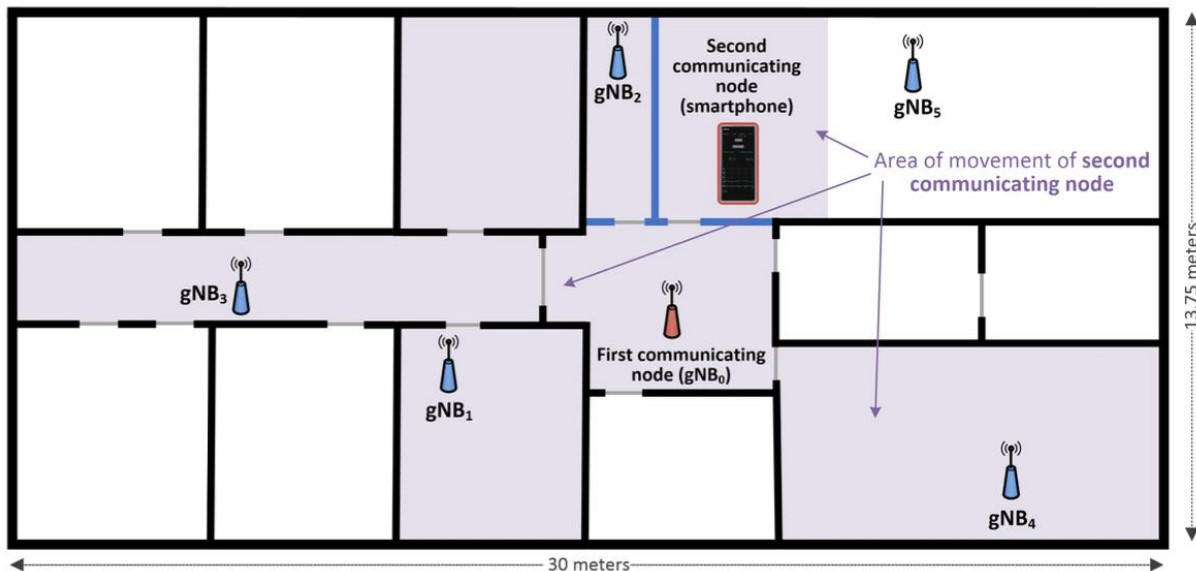


Zdroj: Becvar et. al.¹³

1. Digitální dvojče generuje syntetická data pro natrénování modelu DNN. Tato data zahrnují kvality kanálu z komunikujících zařízení k okolním referenčním uzlům (základnovými stanicemi nebo přístupovými body). Tvorbou velkých objemů trénovacích syntetických dat se model stává dostatečně robustním pro predikci kvality kanálu v různých scénářích bez rozsáhlého sběru reálných dat.
2. Integrace reálných dat a transfer learning: Pro zvýšení přesnosti se do modelu trénovaném na syntetických datech integrují reálná měření prostřednictvím transfer learningu. Zatímco digitální dvojče poskytuje základ, transfer learning model upravuje na základě skutečných měření v síti. Tato kombinace syntetických a reálných dat snižuje chyby predikce, protože model se naučí zohledňovat praktické podmínky v síti, které digitální dvojče zcela nezohledňuje.
3. Kontinuální zlepšování a validace: Model je průběžně validován a aktualizován pro zajištění spolehlivosti. Při reálném testování dosáhlo vyvinuté digitální dvojče založené na DNN chyby menší než 0,7 dB při predikci kvality kanálu – úroveň přesnosti dostatečná pro praktické využití v bezdrátových sítích.

¹³ Zdenek Becvar, Jan Plachy, Pavel Mach, Anastas Nikolov, David Gesbert: *Machine Learning for Channel Quality Prediction: From Concept to Experimental Validation* (IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS)

Obrázek 9: Půdorys pro experimenty se skutečnými pozicemi pěti referenčních uzlů reprezentovaných základnovými stanicemi gNB1 – gNB5. Základnové stanice gNB3 a gNB4 jsou umístěny na stropě (≈3 m nad podlahou), zatímco základnové stanice gNB1, gNB2 a gNB5 jsou umístěny na podlaze.



Zdroj: Becvar et. al.¹⁴

Výhody digitálního dvojčete pro predikci kanálu

Tato metodologie přináší několik výhod pro správu sítě:

- Předpověď místo přímého měření kvality kanálu minimalizuje potřebu vysílání referenčních signálů, čímž se uvolňuje šířka pásma pro přenos skutečných dat a uspoří se energie komunikujících zařízení.
- Systém je škálovatelný napříč různými velikostmi a hustotami sítí, což jej činí použitelným pro různé komunikační scénáře, od hustých městských sítí, přes kampusové sítě v průmyslu, až po rozsáhlé IoT systémy.
- Snížení potřeby rozsáhlých reálných měření snižuje provozní náklady, protože data lze generovat synteticky pomocí digitálního dvojčete.
- Digitální dvojčata je vhodné i náročná prostředí, jako jsou vnitřní prostory, kde se signály často odrážejí a degradují kvůli stěnám a dalším překážkám.

Praktické aplikace

Použití digitálního dvojčete při predikci kvality kanálu podporuje provozovatele sítí několika způsoby:

- Díky predikci kvality kanálu mohou operátoři dynamicky upravovat síťové zdroje, vyvažovat zátěž a zlepšovat celkový výkon sítě.
- Jelikož jsou náročná měření minimalizována, zařízení šetří energii, což je zvláště důležité pro bateriově napájená IoT zařízení v rozsáhlých nasazeních.
- Prediktivní modely umožňují předběžné úpravy síly signálu nebo konfigurace zařízení, čímž zvyšují uživatelský komfort stabilními spojeními.

¹⁴ Zdenek Becvar, Jan Plachy, Pavel Mach, Anastas Nikolov, David Gesbert: *Machine Learning for Channel Quality Prediction: From Concept to Experimental Validation* (IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS)

Potenciál do budoucnosti

I když je současný důraz kladen na využití digitálních dvojčat pro síť 5G, metodologie může být rozšířena i na síť nové generace, jako je 6G. Tyto budoucí síť pravděpodobně zahrnou ještě pestřejší využití, od rozšířené reality (AR) po vysoce spolehlivé komunikace s nízkou latencí (URLLC), což činí prediktivní modely cenným aktivem pro provozovatele sítí. Digitální dvojčata se budou vyvíjet a zahrnovat sofistikovanější modely strojového učení, případně i s využitím posilovaného učení pro přizpůsobování v reálném čase.

Závěr:

Tato případová studie ilustruje významné využití technologie digitálního dvojčete při predikci kvality bezdrátového kanálu. Vytvořením virtuálního modelu, který je kombinován s reálnými měřeními, umožňuje přístup na bázi DNN digitálního dvojčete pro přesné a efektivní predikce kvality kanálu. To zvyšuje efektivitu sítě, snižuje náklady a optimalizuje alokaci zdrojů. Vzhledem k tomu se digitální dvojče stává důležitým nástrojem pro moderní i budoucí bezdrátové komunikační síť.

Příloha 2 – Případová studie: Digitální dvojče skladů díky virtuálním sensorům od InovecTech

Virtuální sensor je zobecněním fyzického senzoru ve virtuální realitě. Jde o SW aplikaci, která má na vstupu digitální obraz (např. výroby) a na výstupu dává jednoduše interpretovatelný a integrovatelný signál v čase. Tuto technologii InovecTech udělal škálovatelnou, dostupnou a efektivní pro výrobu díky rozvoji edge zařízení s výpočetní kapacitou klasického počítače (např. RaspberryPi) a kamerami a díky rozvoji umělé inteligence. Virtuální senzory přirozeně přepojují digitální obraz výroby získaný pomocí kamer s digitálním dvojčetem výroby, t.j. modelem výroby použitelným pro kontrolu a optimalizaci.

Základní informace o poskytovateli řešení

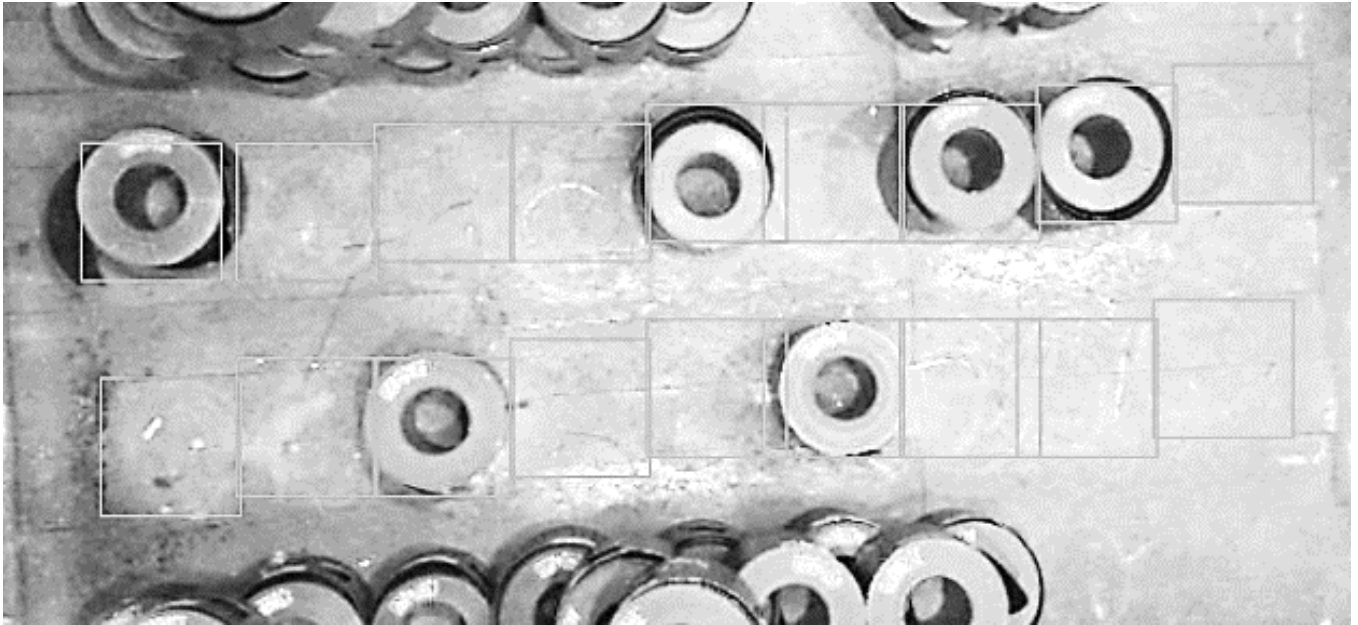
InovecTech je globálním průkopníkem technologie virtuálních IoT senzorů ve výrobě, což je přístup využívající umělou inteligenci k flexibilnímu sběru dat z výrobních prostor, skladů a dopravy. Univerzální edge zařízení s kamerami je rychle nasazeno a okamžitě začne sbírat vizuální data. Umělá inteligence s člověkem ve smyčce, rozdělena do více vrstev mezi edge a cloud, analyzuje tato data do snadno interpretovatelných a ověřitelných signálů, které u skladů nebo interní logistiky obsahují veškeré potřebné údaje ke sledování pohybu materiálu a mobilních zařízení (VZV, jeřáby, dopravníky atd).

Zákazníci, uživatelé a jejich potřeby

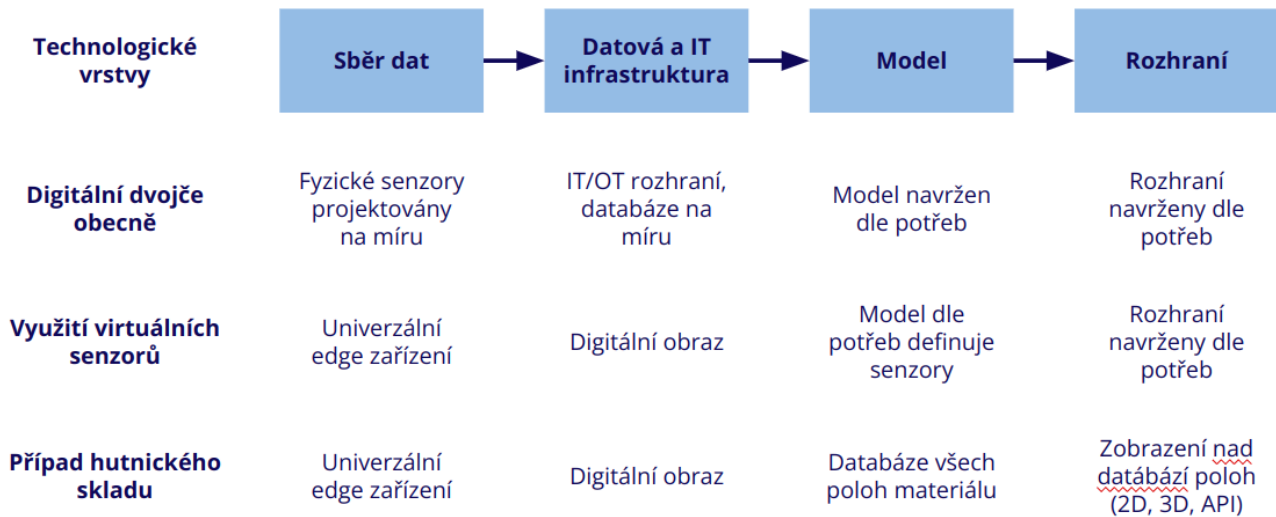
Těžký průmysl v EU se nachází v těžké situaci. Nepředvídatelné regulace (zejm. CO₂) a nezvládnutá evropská energetická politika způsobují velké riziko a další podinvestování průmyslu, hliníkárný zavírají, ocelárny mají velmi drahý kapitál a vyžadují neobvykle rychlou návratnost projektů. Bez ohledu na dekarbonizační iniciativy, interní logistiku meziproductů nebo finálních produktů má smysl optimalizovat ve všech závodech. Právě skladování je v těžkém průmyslu náročné, protože vysoká hmotnost materiálu zvyšuje potřebné investiční náklady, takže plně automatické sklady mají návratnost v řádu desítek let. Zatímco prvotní hutnická výroba (vysoká, elektrická pec, konvertor, odlévání) je protkaná standardními ověřenými senzory pro sběr dat, již skladování jedinců (brám, kontisliktů, ingotů, slitků atd.) a interní logistika absorbující variabilitu výroby mají obrovský potenciál digitalizace. Většina skladů nemá ani definované skladové místa a materiál je položen na podlaze skladu ukládán do kop nebo pyramid nebo věží. Protože tyto pyramidy jsou neustále přeskládány, nalezení konkrétního jedince je náročné a řešení většiny oceláren [ref] na světě je vysílání pracovníků mezi materiál, co vytváří prostor pro úrazy, přehřátí pracovníka, zabírá množství času a tak snižuje efektivitu práce. Skladníci potřebují fyzicky ve skladu najít nebo alespoň potvrdit polohu jedince. Kvalita, logistika a manažment potřebuje mít přehled v reálném čase a možnost zpětně zjistit historii pro každý produkt. V digitalizovaném skladu je hledání polohy pouhým vybráním hodnoty z databáze místo "houbaření" svítka na plochách často několika hektarů. Situace je zhoršená vlastnostmi materiálu, často vysokou teplotou, nemožností umístit štítek např. na kostku šrotu atd. Cílem digitalizace skladu je ideálně kompletní přehled polohy jakéhokoliv jedince nebo mobilního zařízení v každém čase.

Případ užití

Firma je velká ocelárna s komplexním skladem za teplou válcovnou, kde se schází variabilita od válcovny, dělicích linek, zákazníků, studené válcovny a dalších skladů. Obsahuje všechny metody transportu svítků, jeřáby, dopravník a vozíky, nakládání na vlaky, dopravník a do kamionů, procesy vzorkování, skládání. Nejsou jednoznačně definovaná skladová místa.



Cílem digitalizace je tedy získat co nejpřesnější reprezentaci skladu jakožto $x_i(t)$, t.j. polohu $x(x,y,z)$ každého jedince i v každém čase t , z této reprezentace je pak snadné kromě rychlého nalezení jedince ve skladu provést další analýzy, např. počet přeložení, lead time (tzv. days of inventory) i detailně plánovat vyskladňování nebo optimalizovat rozložení. Na tento úkol jsou virtuální senzory ideální protože není zapotřebí komplexní integrace, dat z PLC nebo jakýchkoliv fyzických senzorů kromě jedné identifikace jedince (zjišťujeme z již přítomného robota na začátku skladu / výstupu z linky atd.).



Implementace digitálního dvojčete obecně vyžaduje iterativní ladění všech technologických vrstev, každá iterace představuje velké náklady a čas, někdy i týdny na jednu změnu v senzorce nebo modelu. Místo toho, přístup virtuálních senzorů omezuje toto iterativní ladění pouze na vrstvu uživatelského rozhraní a instalaci virtuálních senzorů, která může trvat jednotky sekund a být provedena operátorem výroby. V tomto případě je model standardní, takže digitální dvojče skladu může být dodáno jako "plug&play".



3D vizualizace rekonstruovaná pomocí fotogrammetrického 3D modelu budovy kombinovaného s daty o polohách z databáze systému InoWare

Produkt/řešení a jeho implementace

InoWare je digitální dvojče interní logistiky založené na datech z virtuálních senzorů zpracujících data z edge kamer pomocí umělé inteligence. Kamery vytváří digitální obraz, ve kterém jsou instalovány (virtuální) senzory zaplnění různých skladových poloh a (virtuální) senzory poloh a zaplnění mobilních zařízení. Data ze senzorů jsou integrovány do 3D trajektorií každého jedince. Koncept se liší od známého konceptu Amazon Go

Je možné retrofitovat starší sklady s nízkými náklady (zatím co koncept Amazon Go pracuje s novými sklady a kombinuje metody počítačového vidění s fyzickými senzory, zejm. váhami)

Je možné sledovat pouze větší objekty, které jsou dobře viditelné ze stacionárních kamer nad skladem

Pro ochranu soukromí pracovníků je implementováno zamlžení postav, v současnosti je 100% anonymizace zajištěna uměle sníženým rozlišením edge kamer, co omezuje minimální velikost sledovaných objektů na min 0.1m² povrchu (např. u skladu 10 tis. m² je třeba asi 300 kamier).

Vrstva rozhraní obsahuje interaktivní webové aplikace pro prohlížení dat a skladových KPI, 2D a 3D vizualizaci a API (aplikační rozhraní) pro zákaznické systémy (např. celo-firemní WMS) automaticky užívající data z digitálního dvojčete.

5G/P5G

5G není zcela nevyhnutné pro digitalizaci pomocí virtuálních senzorů. Ale vzhledem k tomu, že virtuální senzory přenášejí obraz s vysokým rozlišením, představuje využití privátní 5G sítě zajištění skutečně stabilní a dostatečně kvalitní služby. Další velkou výhodou využití privátní 5G sítě je možnost flexibilního umístování a přemísťování virtuálních senzorů.

Důvod zvolení tohoto řešení

Řešení bylo vybráno po půl roku trvající zkoušce srovnávající 7 různých technologií. Pouze tato technologie má potenciál použití na všechny hutnické sklady. Již jiné technologie na tomto komplexním skladu naprosto selhali. Výhody digitálního dvojčete pomocí virt senzorů na edge je:

- Prakticky neomezená spolehlivost - možnost dohledání jedince zpětně ze záznamů, které díky redundanci nepřerušeně sledují všechny pohyby ve skladu
- Využitelnost na všechny sklady včetně skladů horkého (>300°C) materiálu, vlhkých a prašných prostředí
- Škálovatelnost - náklady na pořízení jsou přímo úměrné velikosti skladu, je možné digitalizovat menší sklady (do 1000m²) i oblasti o rozloze v řádu km², kalibrace je prováděna rychle pomocí SW a na straně uživatele není třeba nové specialisty
- Bezpečná instalace, >99.9% dat zůstává on premise, takže není ohrožení dostupnosti při menších výpadcích internetu ani nejsou vysoké požadavky na tok dat do cloudu
- Integrace dalších analýz - integrovány jsou analýzy OEE (vytížení) mobilních zařízení, 3D a 2D vizualizace skladu, integrace na jiné WMS, ERP, příp. další informační systémy
- Rychlost instalace - digitalizace skladu může být do týdne
- Rychlejší návratnost oproti jiným technologiím zejm. díky standardizaci - standardní řešení se vyvíjí pro více zákazníků

Status projektu

Projekt ve aktuálně integrován do provozu. InovecTech tuto technologii nasadil již v 5 výrobních skladech 2 velkých výrobců v těžkém průmyslu, 2 další projekty jsou rozpracované a diskuse probíhají s dalšími 5 společnostmi.

Hodnocení a přínosy projektu

- Přínosy se kvantifikují, zatím bylo kvalitativně potvrzeno
- Šetření času pracovníků na hledání materiálu, co automaticky zlepšuje produktivitu a bezpečnost
- Lepší předvídatelnost plánu výroby a plánování směn
- Rychlejší pravidelná inventura

Možnost využití a budoucí aplikace

Přepočítávají se přínosy a náklady tabletů pro jeřábníky, pracuje se na spolupráci se skladníky na přidání svitků, které se do skladu dopravili v nestandardním režimu (posledních 5% spolehlivosti) a automatická identifikace chyb v evidenci, snížení latence (v současnosti probíhá simulace na základě dat z virtuálních senzorů pouze 2-4x denně) a nákladů na provoz a údržbu.

Technologie z pohledu nákladů a spolehlivosti již nyní vysoce převyšuje alternativy využívající fyzické senzory na mobilní zařízení nebo technologie kamer na mobilních zařízeních. Technologie značení materiálu RFID, čárovými nebo 2D kódy je použitelná pouze ve výjimečných případech. Virtuální senzory mají výhodu oproti konstrukci celé VR v nižším potřebném počtu kamer, přímé interpretaci a jednodušší možnost zásahu člověka. Autonomní drony nejsou zatím dostatečně bezpečné a vyvinuté pro náročné podmínky hutnických skladů a potřebují spolehlivé a dostatečně viditelné značení jedinců. Technologie na bázi kamer s vyšším rozlišením nebo speciálních 2D senzorů (např LIDAR nebo RGBD) trpí velmi nákladným HW na pořízení a hlavně údržbu.

Protože technologie je založená na v současnosti rychle vyvíjených technologiích umělé inteligence, předpokládáme v příštích 5 letech další celkové zlepšení spolehlivosti, snížení latence a nákladů. V současnosti je nejlepší aplikace v hutnictví, kde není možné použití RFIDs, které mají nízkou spolehlivost, technologie je zatím v porovnání s RFID nákladnější pro malé nekovové výrobky uloženy v krabicích recyklovaných v rámci výroby. Náklady ale s vývojem klesají, takže zřejmě bude technologie výhodnější i pro širší kategorie skladů.

Příloha 3 – Případová studie: Spirent – digitální dvojče pro IP síť China Mobile

Základní informace o poskytovateli řešení

Spirent Communications je předním globálním poskytovatelem řešení pro testování, zajištění kvality sítí a jejich analýzy. Specializuje se na pomoc zákazníkům při řízení komplexity 5G, síťové infrastruktury a cloudových služeb. Díky desetiletím zkušeností společnost Spirent slouží vývojářům, poskytovatelům komunikačních služeb a provozovatelům podnikových sítí. Umožňuje jim dosahovat špičkového výkonu a spolehlivosti.

Zákazníci, uživatelé a jejich problémy a potřeby

V této případové studii byl klíčovým zákazníkem China Mobile, který čelil výzvám spojeným s nasazením a řízením své pátevní sítě na bázi SRv6, která podporuje jejich infrastrukturu IPv6, cloud a 5G. V rámci své transformační strategie potřeboval China Mobile ověřit a optimalizovat své sítě nové generace tváří v tvář rostoucí složitosti vyplývající z nových technologií a zvyšujícího se rozsahu sítě.

Hlavní problémy, kterým čelil China Mobile, zahrnovaly:

- Vysoké náklady a striktní časové požadavky na testování rozsáhlé síťové infrastruktury.
- Potřeba validace složitých síťových funkcí, včetně nových protokolů, jako je SRv6.
- Omezení v testovacích prostředích laboratoří, které nemohla účinně emulovat živý scénář sítě.
- Nedostatečná validace stability, spolehlivosti a funkčnosti sítě, což vedlo k potenciálním rizikům při nasazení v reálném provozu.

Případ použití

China Mobile si stanovil za cíl využít platformu Network Digital Twin (NDT) k dosažení několika cílů:

- Emulovat a testovat chování rozsáhlé sítě SRv6, která zahrnovala stovky routerů a mnoho přístupových přepínačů.
- Simulovat síťový provoz a podmínky reálného světa pro testování odolnosti a spolehlivosti jejich pátevní sítě SRv6.
- Ověřit předem síťové konfigurace a optimalizovat scénáře nasazení bez nutnosti fyzického testování.

Produkt/Řešení a jeho implementace

Společnost Spirent nasadila svou platformu Network Digital Twin, která zahrnovala klíčové komponenty jako:

- Spirent TestCenter, generátor síťového provozu a emulátor protokolů, navržený k replikaci rozsáhlých síťových prostředí.
- Impairment Tool, který emuloval podmínky reálné sítě, jako je latence, kolísání signálu a přetížení.

Během implementace společnost Spirent úzce spolupracovala s týmy pro výzkum a vývoj, provozními týmy China Mobile i výrobcí síťového vybavení, aby přizpůsobila a rozšířila integraci platformy Digital Twin s externími zařízeními.

Důvod zvolení tohoto řešení

China Mobile si vybrala řešení společnosti Spirent díky jeho jedinečné kombinaci komplexních emulačních schopností, flexibility a škálovatelnosti. Schopnost platformy podporovat stovky síťových zařízení, simulovat podmínky reálného provozu a provádět podrobná protokolová hodnocení efektivně splňovala jejich potřeby. Navíc osvědčené odborné znalosti společnosti Spirent v oblasti síťového zajištění představovaly silnou hodnotu.

Stav projektu:

Nasazení platformy Network Digital Twin bylo součástí probíhající iniciativy na zdokonalení a modernizaci infrastruktury China Mobile na bázi SRv6. Projekt začal jako Proof of Concept (PoC), který demonstroval proveditelnost a výhody tohoto řešení. Následně pokračovala úzká spolupráce pro další optimalizaci a testování, kdy China Mobile plánovala plné nasazení.

Hodnocení a přínosy projektu:

Mezi kvantifikovatelné přínosy realizované společností China Mobile patřilo:

Úspora nákladů až 90 % při nastavování a testování rozsáhlých síťových scénářů.

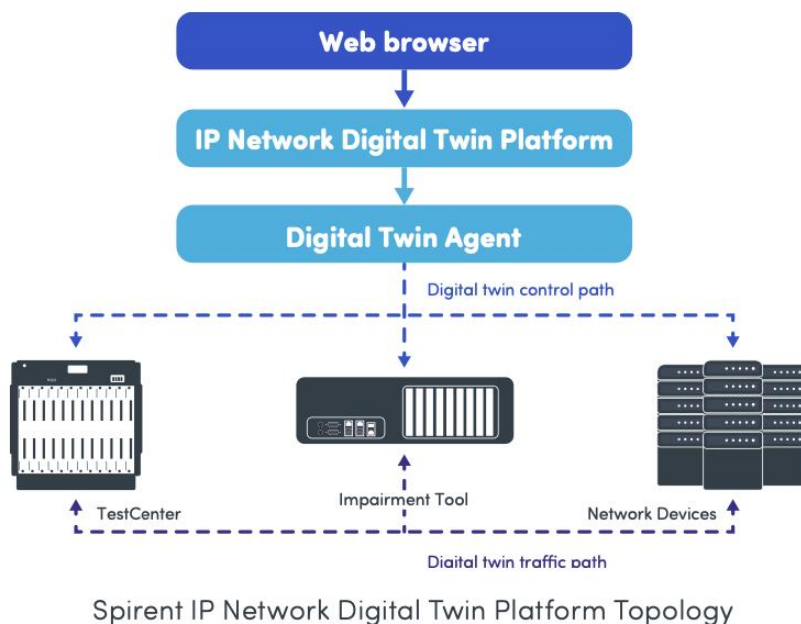
- 70% snížení doby testování, což významně zrychlilo uvedení nových služeb a technologií na trh.
- Zlepšení verifikačních a provozních schopností, které eliminovalo více než 90 % lidských chyb.
- Zlepšená spolupráce mezi týmy pro výzkum a vývoj a provozními týmy, což vedlo k vyšší efektivitě při nasazení a řešení problémů.

Možnost využití a budoucí aplikace:

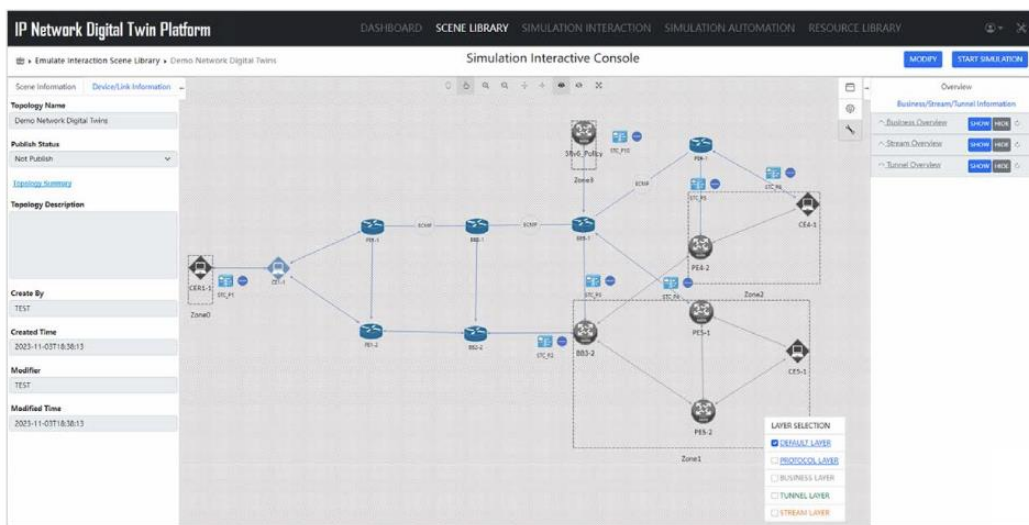
Řešení Digital Twin společnosti Spirent je škálovatelný, softwarově definovaný testovací rámec, který umožňuje China Mobile neustále testovat a validovat změny sítě, optimalizovat konfigurace a preventivně identifikovat bezpečnostní zranitelnosti. Budoucí aplikace zahrnují podporu nových případů využití 5G, jako jsou chytré továrny, autonomní vozidla a rozsáhlé nasazení IoT.

Úspěšné nasazení u China Mobile dokazuje škálovatelnost a flexibilitu přístupu Digital Twin, což z něj činí přesvědčivé řešení pro ostatní poskytovatele služeb, kteří se chtějí přechodu na pokročilé síťové protokoly a architektury věnovat.

Obrázek 10: Schéma IP network digital twin platformy



Spirent IP Network Digital Twin Platform Topology



Zdroj: Spirent - IP Network Digital Twin Platform for China Mobile

Shrnutí:

Řešení Network Digital Twin společnosti Spirent pro China Mobile ukazuje, jak mohou emulovaná prostředí zjednodušit a optimalizovat procesy validace sítí v rozsáhlých, složitých implementacích. Řešení se osvědčilo při snižování nákladů, zvyšování efektivity a minimalizaci rizik v dynamických a vyvíjejících se síťových ekosystémech. Tato případová studie zdůrazňuje potenciál pro replikaci podobných řešení v různých vertikálách, jako jsou chytrá města, automatizace průmyslu a kritická komunikační infrastruktura.

Příloha 4 – Případová studie: Digitální dvojče 5G infrastruktury pro Ministerstvo obrany USA.

Základní informace o poskytovateli řešení

Spirent Communications je předním globálním poskytovatelem řešení pro testování, zajištění kvality sítí a jejich analýzy. Specializuje se na pomoc zákazníkům při řízení komplexity 5G, síťové infrastruktury a cloudových služeb. Díky desetiletím zkušeností společnost Spirent slouží vývojářům, poskytovatelům komunikačních služeb a provozovatelům podnikových sítí. Umožňuje jim dosahovat špičkového výkonu a spolehlivosti.

Zákazníci, uživatelé a jejich problémy a potřeby

Hlavním uživatelem v této případové studii je americké Ministerstvo obrany (DoD). Obranný sektor USA čelí významné výzvě: zajistit bezpečnou, spolehlivou a rychlou komunikaci v konfliktních a rychle se měnících prostředích. S nástupem 5G vidí Ministerstvo obrany potenciál pro zlepšení úkolů kritických pro mise, jako je velení a řízení, dohled, logistika a výcvik. Složitost integrace 5G sítí, v kombinaci s nepředvídatelnými podmínkami v terénu, rušeními a kybernetickými hrozbami, představuje značné riziko pro úspěšnost misí.

Identifikované potřeby zahrnovaly:

- Spolehlivé komunikační sítě v dynamických a konfliktních prostředích.
- Ověřování technologií 5G pro bezpečné a efektivní nasazení v terénu.
- Testovací schopnosti pro složité scénáře zahrnující velké množství zařízení nebo uživatelů.
- Řízení kybernetických rizik v komunikacích v oblasti obranného komplexu.

Případ použití

Řešení Digital Twin společnosti Spirent bylo použito k řešení složitostí při nasazení sítí podporovaných technologií 5G pro obranné účely. Konkrétní případy použití zahrnovaly:

- Chytré základny a sklady: Zefektivnění provozu a logistiky pomocí IoT a 5G konektivity.
- Distribuované velení a řízení na taktických hranicích: Zajištění robustních komunikací pro mise kritické operace.
- Aplikace rozšířené reality pro bojový výcvik: Zlepšení výcviku vojáků prostřednictvím simulace realistických podmínek a prostředí.

Produkt/Řešení a jeho implementace

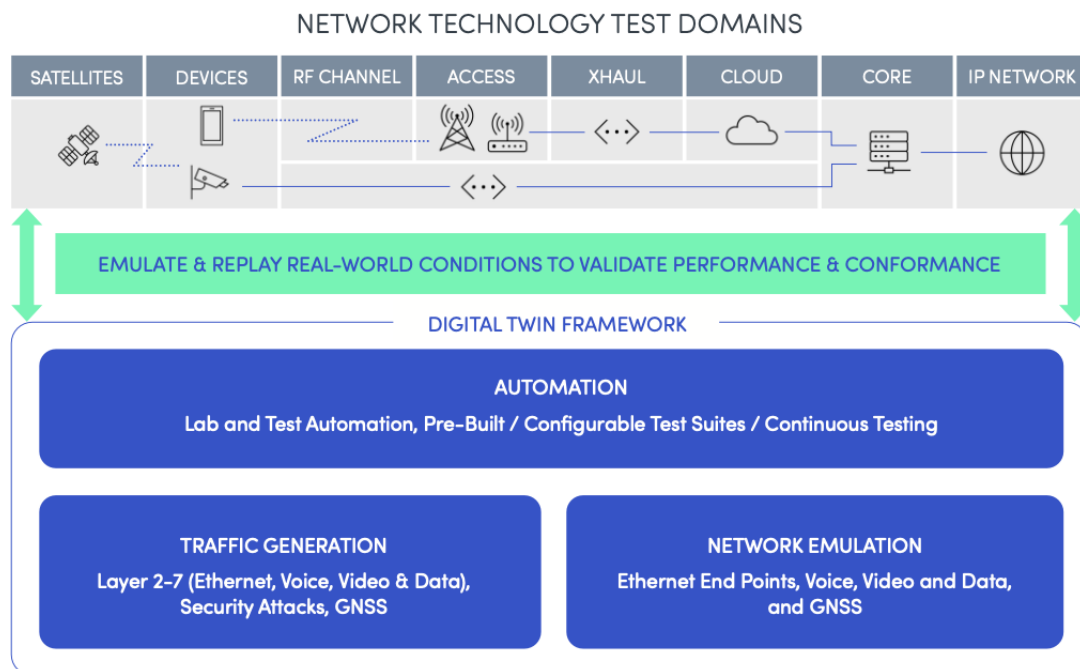
Společnost Spirent nasadila své řešení 5G Network Digital Twin, které poskytuje komplexní testovací prostředí prostřednictvím emulace sítí a provozu. Řešení využívá emulované dvojče komunikační sítě pro testování výkonu, odolnosti a bezpečnosti technologií a služeb ve vysoce náročných scénářích, které se očekávají při obranných aplikacích.

Implementace řešení zahrnovala:

- Generování provozu a emulaci sítí, které zahrnovaly syntetický provoz, kybernetické útoky, rušení signálu a simulované výpadky.
- Integraci komerčních a emulovaných prvků, což umožnilo kombinované testovací scénáře, které odrážejí jak laboratorní, tak reálné podmínky.

Orchestrace prostřednictvím automatizace, umožňující efektivní koordinaci a realizaci složitých testovacích scénářů.

Obrázek 11: Testované oblasti síťové technologie



Zdroj: Spirent – Digital Twin Solutions for U.S. Defense

Důvod zvolení tohoto řešení

Řešení Digital Twin bylo vybráno kvůli své schopnosti:

- Poskytnout okamžitý přístup k pokročilému testovacímu prostředí 5G sítě bez nutnosti významné kapitálové investice.
- Zajistit end-to-end ověření sítě v bezpečném a řízeném prostředí.
- Minimalizovat rizika neefektivního testování tím, že poskytuje plně přizpůsobitelné a opakovatelné testovací prostředí.
- Využít odborné znalosti společnosti Spirent v oblasti kybernetické bezpečnosti a zajištění kvality sítí pro optimalizaci návrhu a realizace rozsáhlých síťových testů.

Stav projektu

Řešení je v současné době aktivně používáno, přičemž pokračuje jeho vylepšování a integrace do širšího rámce obranných komunikačních strategií. Spirent nadále spolupracuje s obrannými komunitami na zlepšování možností nasazení a testování 5G. Cílem probíhajícího projektu je optimalizovat přechod z laboratorního testování na reálné podmínky v terénu.

Hodnocení a přínosy projektu

Mezi hlavní přínosy projektu patří:

- Zrychlené přijetí technologií 5G v obranném sektoru.
- Snížení kapitálových investic do fyzické infrastruktury pro rozsáhlé testování díky využití pokročilé emulace digitálních dvojčat.
- Zlepšená spolupráce mezi obranným a komerčním sektorem, což zvyšuje integraci nových technologií.
- Zvýšení úspěšnosti misí díky snížení rizik a zvýšení spolehlivosti komunikace v konfliktních prostředích.

Možnost využití a budoucí aplikace

Řešení Digital Twin společnosti Spirent má prokázanou škálovatelnost a všestrannost, díky čemuž je ideální pro další obranné aplikace a další oblasti. Rámec je vysoce přizpůsobitelný různým prostředím, od chytrých skladů a autonomních vozidel až po

vícedoménové sítě velení a řízení. Úspěšné nasazení v obraně naznačuje potenciál pro replikaci v sektorech, jako jsou veřejná bezpečnost, kritická infrastruktura a chytrá města, kde je bezpečná a spolehlivá komunikace klíčová.

Shrnutí:

Řešení Digital Twin společnosti Spirent pro Ministerstvo obrany USA ilustruje sílu emulovaných testovacích prostředí při validaci a optimalizaci komunikace 5G. Díky simulaci reálných podmínek poskytla společnost Spirent flexibilní a spolehlivé řešení pro zajištění, aby komunikace kritické pro mise byly bezpečné, efektivní a odolné.

Příloha 5 – Případová studie: Digitální dvojčata VIAVI pro simulaci kybernetických hrozeb a rollout 5G sítě.

Základní informace o poskytovateli řešení

VIAVI Solutions je předním globálním poskytovatelem řešení pro testování, monitorování a zajištění kvality pokročilých komunikačních sítí. Společnost se specializuje na poskytování komplexních nástrojů pro validaci, optimalizaci a zabezpečení 5G sítí a dalších technologií. Řešení VIAVI se zaměřují na zajištění vysokého výkonu, spolehlivosti a uživatelské zkušenosti ve všech fázích implementace sítí.

Zákazníci, uživatelé a jejich problémy a potřeby

Primárními zákazníky VIAVI jsou poskytovatelé telekomunikačních služeb, výrobci zařízení (NEMs) a podniky, které musí spravovat stále složitější síťové architektury. S příchodem 5G a přechodem na 6G čelí zákazníci několika výzvám:

- Zvýšená složitost sítí způsobená otevřenými a virtualizovanými architekturami, edge computingem a cloudovými infrastrukturami.
- Potřeba optimalizovat a automatizovat provoz sítí s využitím AI/ML.
- Rizika bezpečnosti vyplývající z rostoucích kybernetických hrozeb a častých aktualizací softwaru.

Případ použití

Digitální dvojčata VIAVI, pod portfoliem NITRO Wireless, byla efektivně využita pro řešení dvou klíčových případů použití:

1. Nasazení softwarových aktualizací: Před nasazením softwarových aktualizací v živé síti umožňuje digitální dvojče simulovat scénáře během víkendu. Operátoři tak mohou simulovat realistické objemy provozu, detekovat problémy v Radio Access Network (RAN) a zajistit hladký průběh aktualizace.

2. Detekce kybernetických hrozeb: Řešení Digital Twin od VIAVI umožňuje simulovat kybernetické útoky a malware scénáře v bezpečném laboratorním prostředí. To pomáhá operátorům testovat a zdokonalovat jejich strategie mitigace rizik a zajistit, aby obranné mechanismy zůstaly silné i proti nově vznikajícím hrozbám.

Produkt/ řešení a jeho implementace

Digitální dvojče společnosti VIAVI je postaveno na řešeních TM500 a TeraVM, která emulují základnové stanice, jádro sítě a scénáře reálného provozu. Tato digitální dvojčata replikují síť operátora v kontrolovaném prostředí pomocí emulátorů RAN a core sítě v kombinaci s realistickými scénáři provozu a kybernetických hrozeb. Řešení umožňuje komplexní emulaci všech klíčových síťových prvků, včetně uživatelských zařízení (UE), základnové stanice (BTS), jádra sítě a RAN Intelligent Controller (RIC).

Důvod zvolení tohoto řešení

Řešení VIAVI bylo vybráno několika předními poskytovateli telekomunikačních služeb díky své schopnosti:

- Realisticky zrcadlit složité síťové scénáře v laboratorním prostředí.
- Poskytnout end-to-end viditelnost od laboratorního testování až po nasazení v terénu.
- Validovat AI/ML algoritmy a výkonnost sítě za různých podmínek, což je zásadní pro optimalizaci otevřených a virtualizovaných síťových architektur.
- Zlepšit rozhodování prostřednictvím automatizovaného testování a zvýšení inteligence v celé síti.

Stav projektu

Řešení Digital Twin společnosti VIAVI je aktivně nasazeno v rámci platformy NITRO Wireless a využíváno operátory a poskytovateli komunikačních služeb po celém světě. Řešení není pouze Proof of Concept (PoC), ale jedná se o komerčně dostupný nástroj, který byl široce přijat pro různé aplikace testování a zajištění kvality sítí.

Hlavní přínosy, které řešení VIAVI přináší:

- Snížení obchodních rizik: Testováním softwarových aktualizací a změn sítě v digitálním dvojčeti před nasazením lze předejít nákladným chybám a výpadkům služeb.
- Zvýšená bezpečnost sítě: Schopnost simulovat kybernetické útoky a zdokonalovat strategie mitigace rizik vedla k robustnějším obranným mechanismům.
- Automatizace a úspora nákladů: Automatizovaná povaha testování digitálního dvojčete snižuje potřebu fyzických zdrojů a zrychluje uvádění nových služeb na trhu.

Možnost využití a budoucí aplikace

Úspěch řešení Digital Twin společnosti VIAVI zdůrazňuje jeho škálovatelnost a všestrannost pro použití v různých vertikálách. Tento přístup není vhodný pouze pro telekomunikační sítě, ale může být efektivně replikován pro chytrá města, kritickou infrastrukturu, soukromé 5G sítě a průmyslový IoT. Jak se průmysl posouvá směrem k 6G, očekává se, že digitální dvojče bude hrát ústřední roli při validaci aplikací nové generace a optimalizaci provozu v reálném čase.

Řešení Digital Twin společnosti VIAVI ukazuje přínos emulace složitých síťových prostředí pro bezpečné a efektivní ověřování sítí. Řešení adresuje klíčové výzvy, jako je spolehlivost softwaru, kybernetické hrozby a složitosti otevřených a virtualizovaných sítí. Díky tomu je VIAVI digitální dvojče přínosný nástroj při evoluci směrem k 5G a 6G.

Příloha 6 – Případová studie: Digitální dvojčete sítě od společnosti BaseN

BaseN, společnost specializující se na řešení pro správu sítí, vyvinula pokročilou platformu digitálního dvojčete, která je zaměřená na síťovou infrastrukturu. Toto digitální dvojčete sítě (Network Digital Twin - NDT) nabízí robustní situační přehled a škálovatelnost s cílem optimalizovat výkon sítě a zvýšit její spolehlivost. Systém NDT společnosti BaseN zpracovává až 70 Gbit/s dat v reálném čase z různých zákaznických sítí. Poskytuje průběžné informace o stavu sítě, výkonu a potenciálních problémech.

Klíčové funkce digitálního dvojčete sítě

Technologie digitálního dvojčete sítě od společnosti BaseN integruje klíčové funkce, které z něj činí univerzální nástroj pro správu sítí:

- **Monitorování v reálném čase a situační přehled:** Zachycením telemetrických dat v reálném čase poskytuje NDT přesný obraz o stavu sítě, včetně informací o výkonu zařízení, úrovních služeb a vzorcích provozu. Operátoři sítě získávají situační přehled, který jim umožňuje rychle identifikovat potenciální problémy a anomálie.
- **Prediktivní údržba a proaktivní řešení poruch:** S využitím schopností strojového učení předvídá digitální dvojčete poruchy dříve, než k nim dojde, čímž umožňuje prediktivní údržbu. Operátoři mohou preventivně řešit problémy, čímž se vyhýbají výpadkům služeb a zajišťují spolehlivost sítě.
- **Optimalizace sítě a plánování kapacit:** NDT podporuje strategické plánování prostřednictvím predikce požadavků na kapacitu, řízení rozšiřování sítě a návrhu vylepšení. Pomocí prediktivního modelování dokáže simulovat scénáře, jako je optimalizace tras a přidělování zdrojů, což zlepšuje efektivitu a schopnost sítě reagovat.
- **Zákaznický přístup:** Unikátní aspekt NDT společnosti BaseN je jeho design zaměřený na zákazníky, který zahrnuje digitální dvojčata jednotlivých zákazníků. Tato dvojčata zákazníků (DToC) zvyšují personalizaci služeb prostřednictvím analýzy vzorců využívání služeb zákazníky, predikci jejich potřeb a přizpůsobení nabídky služeb.

Výhody pro poskytovatele telekomunikačních služeb

Digitální dvojčete sítě od společnosti BaseN přináší poskytovatelům telekomunikačních služeb několik výhod:

- **Jednotný pohled na aktiva a provoz sítě:** NDT konsoliduje data z různých zdrojů na jediné, komplexní platformě. Integruje informace z různých systémů pro správu sítě, IoT zařízení a zákaznických databází a poskytuje sjednocený pohled na celé síťové prostředí.
- **Vylepšené rozhodování a odolnost:** Díky detailnímu pohledu na aktiva a provoz v reálném čase NDT umožňuje operátorům sítě rychle činit informovaná rozhodnutí. Tento situační přehled podporuje provozní odolnost, zejména během nečekaných událostí nebo období vysoké poptávky.
- **Optimalizované využití zdrojů:** Prostřednictvím prediktivního modelování pomáhá NDT operátorům efektivně alokovat zdroje. Identifikuje málo využívané zdroje a přiděluje je podle předpokládané poptávky, čímž maximalizuje nákladovou efektivitu a minimalizuje provozní náklady.
- **Sdílený/společný pohled:** NDT umožňuje sjednocovat pohledy ze strany zákazníka, poskytovatele a případných třetích stran, pokud existují. Dvojčata zákazníků (DToC) mají společný průnik a datový základ s dvojčetem poskytovatele jiných stakeholderů (subkontraktoři zákazníka nebo poskytovatele). To zvyšuje provázanost, snižuje nadbytečnou komunikaci, provozní náklady, zvyšuje rychlost řešení problémů či adoptaci nových služeb a celkovou zvyšuje spokojenost zákazníka s využíváním služeb.

BaseN vidí budoucnost, ve které digitální dvojčete sítě slouží jako hlavní entita řídící a optimalizující provoz sítě autonomně. Tento přístup přesahuje tradiční správu sítí tím, že umožňuje rychlejší inovační cykly, urychluje zavádění nových služeb a minimalizuje dopady na životní prostředí optimalizací spotřeby energie. Díky začlenění udržitelných metrik NDT nejen zlepšuje efektivitu sítě, ale také naplňuje širší cíle firemní odpovědnosti vůči životnímu prostředí.



Grant Thornton

www.granthornton.cz

© 2024 Grant Thornton Advisory k.s. All rights reserved.

Grant Thornton Advisory k.s. je česká firma Grant Thornton International Ltd. (Grant Thornton International). Odkazy na Grant Thornton se vztahují ke Grant Thornton International nebo ke členským firmám. Grant Thornton International a členské firmy nejsou mezinárodním partnerstvím. Služby jsou nezávisle poskytovány jednotlivými členskými firmami.