

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta informatiky a informačných technológií

Evidenčné číslo: FIIT-16768-120897

Dávid Truhlář

# Výskum v oblasti technológie digitálneho dvojčata

Bakalárska práca

Vedúci záverečnej práce: Ing. Matej Petřík

Január 2025



Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta informatiky a informačných technológií

Evidenčné číslo: FIIT-16768-120897

**Dávid Truhlář**

# **Výskum v oblasti technológie digitálneho dvojčata**

Bakalárska práca

Študijný program: Informatika

Študijný odbor: Informatika

Školiace pracovisko: Ústav počítačového inžinierstva a aplikovanej informatiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Matej Petřík

Január 2025





## ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Autor práce: Dávid Truhlář  
Študijný program: Informatika  
Študijný odbor: Informatika  
Evidenčné číslo: FIIT-16768-120897  
ID študenta: 120897  
Vedúci práce: Ing. Matej Petřík  
Vedúci pracoviska: Ing. Katarína Jelemenská, PhD.

Názov práce: **Výskum v oblasti technológie digitálneho dvojčata**

Jazyk, v ktorom sa práca  
vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania: Digitálne dvojča je inovatívna technológia, ktorá mení spôsob, akým chápeme a interagujeme s fyzickými objektami, procesmi či systémami. Digitálne dvojča je virtuálna alebo digitálna kópia fyzického objektu, systému alebo procesu, pričom sa snaží zachytiť a kopírovať čo najpresnejšie jeho vlastnosti. Technológia digitálneho dvojčata zohráva kľúčovú rolu v Priemysle 4.0 kvôli možnostiam monitorovania, simulácie a automatizácie v reálnom čase. Vďaka týmto možnostiam využitie tejto technológie umožňuje nové úrovne inovácie a optimalizácie naprieč rôznymi odvetvami a taktiež má potenciál akcelerovať vývoj v týchto oblastiach. Preskúmajte využitie technológie digitálneho dvojčata a jej aplikácie. Zamerajte sa na preskúmanie konceptu digitálneho dvojčata, na spôsob jeho implementácie a taktiež aj na dostupné technológie na jeho tvorbu. Vytvorte prehľad dostupných riešení, navrhnete spôsob vytvorenia jednoduchého digitálneho dvojčata, ktoré bude kópiou fyzického objektu alebo systému. Navrhnuté riešenie implementujte a overte jeho funkčnosť. Literatúra: 1. Singh, Maulshree, et al. "Digital twin: Origin to future." Applied System Innovation 4.2 (2021): 36. 2. Crespi, Noel, Adam T. Drobot, and Roberto Minerva. The Digital Twin. Cham: Springer International Publishing, 2023. 3. Jones, David, et al. "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review." CIRP journal of manufacturing science and technology 29 (2020): 36-52.

Rozsah práce: 40

Termín odovzdania práce: 12. 05. 2025

## Čestné prehlásenie

Čestne vyhlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne, na základe konzultácií a s použitím uvedenej literatúry.

V Bratislave, 3.1.2025

.....

Dávid Truhlář



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Formulácia problému a riešenie</b>	<b>3</b>
2.1	Formulácia problému . . . . .	3
2.2	Technický literárny prehľad . . . . .	4
2.3	Prehľad riešenia (na vysokej úrovni) . . . . .	6
2.4	Hodnotenie rizík . . . . .	9
2.5	Udržateľnosť a environmentálny dopad . . . . .	10
2.6	Zamestnateľnosť . . . . .	12
	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>13</b>
<b>A</b>	<b>Harmonogram práce</b>	

# Zoznam obrázkov

2.1	Model zrkadlených priestorov . . . . .	4
2.2	Architektúra komponentov Open5GS, srsRAN a UERANSIM . . . .	7
2.3	Návrh riešenia (High level) . . . . .	8



# Zoznam použitých skratiek

<b>AMF</b>	Funkcia riadenia prístupu a mobility (Access and Mobility Management Function)
<b>AUSF</b>	Funkcia autentifikačného servera (Authentication Server Function)
<b>BP</b>	Bakalárska práca
<b>DT</b>	Digitálne dvojča (Digital Twin)
<b>GDPR</b>	Všeobecné nariadenie o ochrane údajov (General Data Protection Regulation)
<b>gNB</b>	Node B novej generácie (Next Generation Node B)
<b>IoT</b>	Internet vecí (Internet of Things)
<b>IT</b>	Informačné technológie
<b>ML</b>	Strojové učenie (Machine Learning)
<b>PCF</b>	Funkcia politiky a účtovania (Policy and Charging Function)
<b>RAN</b>	Rádiová prístupová sieť (Radio Access Network)
<b>SMF</b>	Funkcia riadenia relácií (Session Management Function)
<b>UDM</b>	Jednotná správa údajov (Unified Data Management)
<b>UDR</b>	Jednotné úložisko údajov (Unified Data Repository)
<b>UE</b>	Užívateľské zariadenie (User Equipment)
<b>UPF</b>	Funkcia používateľskej roviny (User Plane Function)



# Kapitola 1

## Úvod

Problematika digitálneho dvojčaťa (DT) je v súčasnosti jednou z najviac sa rozvíjajúcich oblastí IT [1], nachádzajúca svoje uplatnenie v priemysle [2], zdravotníctve [3], ako aj v telekomunikáciách [4]. Tieto virtuálne repliky fyzických objektov alebo systémov umožňujú simuláciu a predikciu správania, čo vedie k efektívnejším procesom a lepšiemu rozhodovaniu.

Hlavnými výzvami v oblasti DT pre 5G siete je zaistenie presnosti modelovania a predikcie správania siete v reálnom čase [5]. Zároveň ide o multidisciplinárnu výzvu, vyžadujúcu kombináciu poznatkov z oblasti telekomunikácií, strojového učenia a softvérového inžinierstva. Interdisciplinárny charakter témy zdôrazňuje potrebu prepojenia teoretických vedomostí s praktickými schopnosťami s cieľom prispieť k inovatívnym riešeniam v oblasti 5G sietí.

Práca si kladie za cieľ využiť dostupné nástroje, ako sú Open5GS [6], UERANSIM [7] a srsRAN [8], na vytvorenie DT, ktoré dokáže predpovedať stav siete na základe aktuálnych a historických údajov. Tato schopnosť predikovať budúce stavy bude mať veľký prínos pri optimalizovaní sieťových zdrojov.



# Kapitola 2

## Formulácia problému a riešenie

### 2.1 Formulácia problému

Digitálne dvojča (DT) je technológia, ktorá sa čoraz častejšie využíva ako nástroj na modelovanie, navrhovanie a prototypovanie [9]. V rámci 5G technológie ide o presnú digitálnu repliku siete, ktorá si s reálnou sieťou vymieňa dáta obojsmerne, v reálnom čase, v snahe zlepšiť manažment siete či zrýchliť vývoj 5G sietí [10].

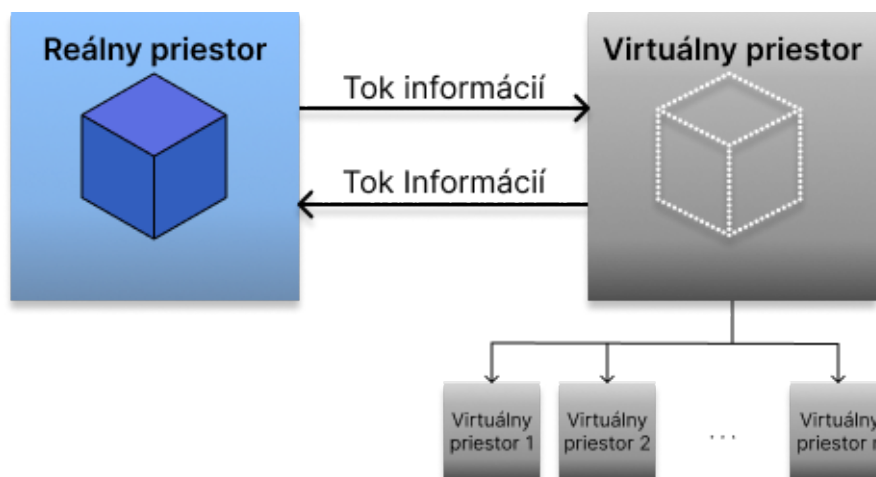
Hoci 5G siete ponúkajú nízku latenciu a vysokú rýchlosť, sú limitované v predikcii správania, a to pre dynamiku používateľov, zaťaženie či zmeny prostredia [11]. DT by mohlo tieto výzvy prekonať predpoveďami budúceho stavu siete, čím by na základe aktuálneho zaťaženia siete umožnilo dynamické riadenie alokácie zdrojov a zlepšilo celkovú výkonnosť systému [12].

Zásadnú výzvu predstavuje práca s veľkým objemom dát, v reálnom čase, ktorá si vyžaduje vysokú výpočtovú silu, zaťažujúcu hardvér [13] a rovnako tak zachovanie nízkej latencie pri dosahovaní vysokej presnosti simulácie, potrebnej na predikciu budúceho stavu siete. Samotný model a konfigurácia DT predstavujú časovo a implementačne komplexné časti spomínaného riešenia [14].

## 2.2 Technický literárny prehľad

Pojem digitálneho dvojčata sa v posledných rokoch, predovšetkým v technických oblastiach, spomína stále častejšie. Vzhľadom na digitalizáciu, ktorá je prítomná v každom sektore, sa transformácia hmatateľného sveta do sveta bitov a pixelov stáva prirodzeným výsledkom tohto trendu.

V technickej literatúre sa DT definuje ako virtuálna reprezentácia fyzického objektu, medzi ktorými prebieha automatizovaný bilaterálny tok dát v reálnom čase [15]. Tok dát zabezpečuje presné zrkadlenie správania oboch týchto entít [10]. Vlastnosť zrkadlenia, vid' Obr. 2.1, poskytuje mnohé výhody ako napríklad možnosti monitorovania v reálnom čase, preventívnej údržby [16], či urýchlenie procesu vývoja, pretože eliminuje potrebu prototypovania v každej fáze vývoja [17].



Obr. 2.1: Model zrkadlených priestorov (Mirrored Spaces Model) tak, ako ho vo svojej práci navrhol Grieves [18]. Tento model sa skladá z troch komponentov - reálny priestor (Real Space), virtuálny priestor (Virtual space) a spájací mechanizmus (Linking Mechanism) [15], ktorý prúdi automatizovane oboma smermi medzi týmito priestormi. Virtuálny priestor vytvára digitálnu reprezentáciu reálnych objektov a podporuje viacero virtuálnych systémov na analýzu, simuláciu alebo predikciu správania fyzických objektov.

Vo svojom výskume Enders a Hoßbachová [1] identifikovali sektory, kde je používanie digitálneho dvojčaťa najrozšírenejšie. Patria sem výroba [19], letecký priemysel [20], energetika [21], automobilový priemysel [22], námorníctvo [23], petrochemický priemysel [24], poľnohospodárstvo [25], zdravotníctvo [26], verejný sektor [27] a ťažba [28].

Taktiež identifikovali tri hlavné využitia digitálneho dvojčaťa v týchto oblastiach [4]: ovládanie, simulovanie a monitorovanie. To však ani zďaleka nepokrýva všetky možnosti a spôsoby využitia. Digitálne dvojča dnes nájde uplatnenie aj pri dizajnovaní, validácii, predchádzaní chýb, trénoch, optimalizácii a predikcii.

Ak sa chceme pozrieť na reálne aplikácie DT, Huawei implementoval DT na monitorovanie výrobných liniek [29], zatiaľ čo mestá ako Bristol [30] či Singapur [31] používajú DT na efektívne riadenie inteligentných mestských systémov. V týchto scenároch DT umožňuje predikciu zlyhaní, optimalizáciu zdrojov a minimalizáciu prestojov. Podobné prístupy sú použiteľné aj v telekomunikáciách, kde DT dokáže simulovať a predikovať správanie sietí v reálnom čase.

V oblasti telekomunikácií sa čoraz viac využívajú pri simuláciách rádiových prístupových sietí (RAN), monitorovaní jadra siete a optimalizácii zdrojov. Napríklad Siemens nasadzuje DT na správu a optimalizáciu sieťových komponentov [16]. Podobne, ZTE a China Mobile [32] úspešne aplikovali technológiu digitálneho dvojčaťa na zlepšenie 5G konektivity pre vysokorýchlostnú železničnú trať v južnej Číne. Pomocou presného 3D modelu infraštruktúry popri trati optimalizovali výkonnosť 5G siete, čím dosiahli pokrytie na úrovni 98,5% a rýchlosti sťahovania presahujúce 300 Mbps.

Tieto úspešné implementácie demonštrujú širokú škálu výhod technológie DT v telekomunikáciách, od optimalizácie pokrytia po zvyšovanie kvality služieb. Napriek tomu však existujú určité obmedzenia, ako napríklad zložitosť nasadenia [33], šká-

lovateľnosť [34] a presnosť simulácií [35], ktoré je potrebné prekonať pri vývoji nových riešení.

## 2.3 Prehľad riešenia (na vysokej úrovni)

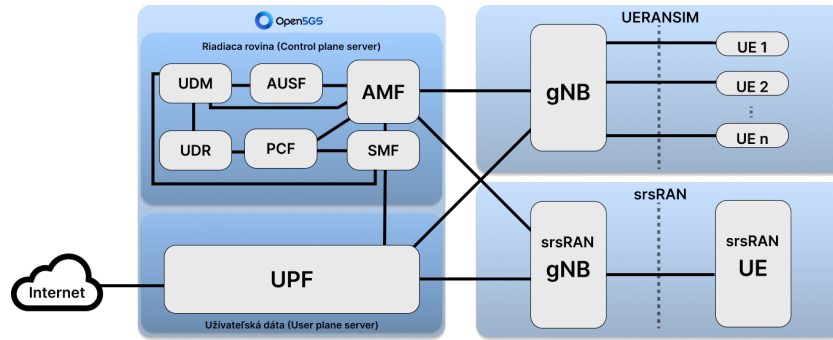
Cieľom tohto projektu je vytvoriť DT 5G siete, ktoré bude schopné v reálnom čase napodobňovať správanie skutočnej siete na základe historických a aktuálnych pozorovaní a predikcií jej budúcich stavov. Tento systém poskytne hodnotné nástroje pre optimalizáciu a analýzu výkonu 5G sietí, pričom jeho implementácia zahŕňa kombináciu otvorených softvérových riešení a pokročilých metód spracovania dát v spojení s vytvorením vhodného modelu strojového učenia.

DT bude simulovať kľúčové aspekty 5G siete prostredníctvom troch hlavných komponentov: Open5GS pre implementáciu jadra siete, srsRAN pre simuláciu rádiového prístupu (RAN) a UERANSIM pre emuláciu užívateľských zariadení (UE) a testovanie rôznych scenárov. Kombináciou týchto nástrojov bude možné modelovať tok dát v sieti a analyzovať metriky ako latencia, priepustnosť a stabilita spojenia. Tieto údaje budú slúžiť ako vstup pre strojové učenie, ktoré umožní predpovedať budúce stavy a zmeny v sieti.

Každý komponent DT plní špecifickú úlohu. Open5GS zaisťuje základné funkcie na správu riadiacej roviny (control plane) a užívateľských dát (user plane). Jeho flexibilná architektúra umožňuje jednoduché prepojenie s inými nástrojmi a podporuje najnovšie štandardy 5G. srsRAN simuláciou pokrýva rádiový prístup a umožňuje testovať rôzne konfigurácie siete, čo pomáha zistiť ich vplyv na celkovú výkonnosť. Na druhej strane, UERANSIM sa zameriava na emuláciu správania zariadení pripojených k sieti. Generuje realistickú prevádzku, či už ide o videohovory alebo masívne pripojenie IoT zariadení. Táto kombinácia nástrojov umožňuje komplexnú analýzu a testovanie, čo je kľúčové pre vytvorenie spoľahlivého predikčného



modelu. Architektúra a konkrétne prepojenia častí jednotlivých komponentov je zobrazené v Obr. 2.2 nižšie.

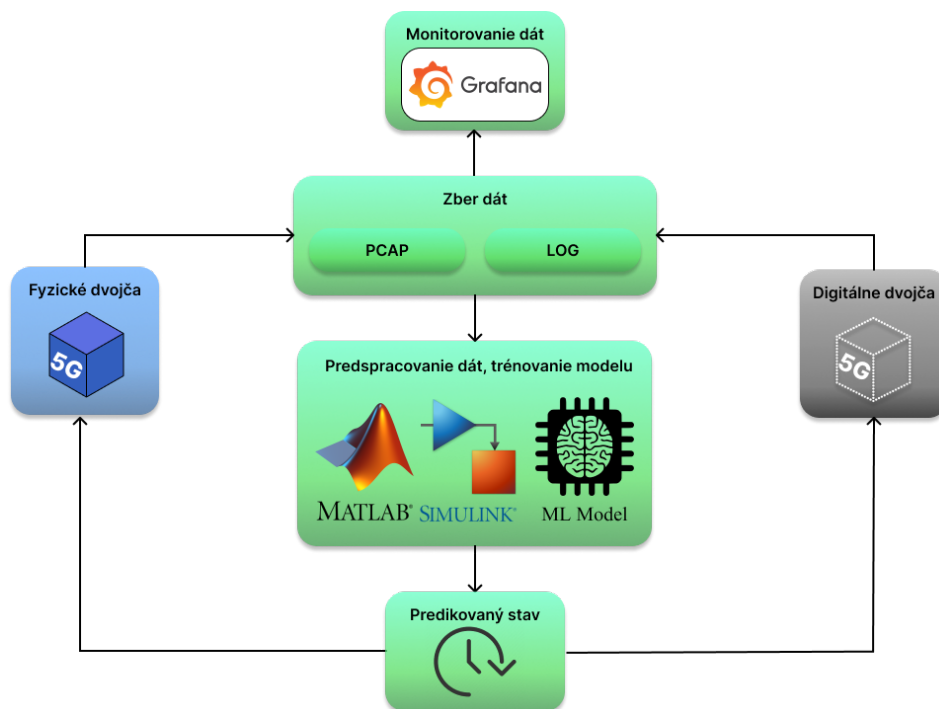


Obr. 2.2: Architektúra jednotlivých komponentov Open5GS [6], srsRAN a UERANSIM a ich vzájomné prepojenie. Open5GS je rozdelené na riadiacu rovinu a rovinu užívateľských dát a obe tieto roviny sú napojené na gNB (5G bunky), ku ktorým sa môžu pripájať zariadenia. Architektúra zobrazuje možnosť použiť UERANSIM na priame pripojenie ku Open5GS jadru a alternatívne RAN pripojenie pomocou srsRAN.

Architektúra DT je navrhnutá tak, aby jednotlivé komponenty medzi sebou hladko spolupracovali. Rádiová prístupová sieť, ktorá je simulovaná pomocou srsRAN, zhromažďuje a odosiela dáta do jadra siete, ktoré je realizované cez Open5GS. Toto jadro tieto dáta spracuje a posieľa ďalším komponentom. UERANSIM generuje realistické komunikačné scenáre medzi zariadeniami a simulovanou sieťou. Napríklad môžeme testovať situácie, kde je sieť preťažená alebo dočasne vypadne spojenie. Zozbierané dáta sa potom použijú na tréning predikčného modelu, ktorý následne analyzuje tieto scenáre a pomáha doladiť parametre, aby model lepšie reagoval na budúce situácie.

Pre spracovanie dát sa využijú nástroje MATLAB a Simulink, ktoré poskytujú intuitívne prostredie na tvorbu modelov pomocou strojového učenia. Proces začína získavaním dát zo simulácií, ktoré prejdú krokom čistenia na odstránenie chybných

alebo neúplných hodnôt. Následne sa tieto dáta normalizujú, čo znamená, že ich hodnoty budú upravené tak, aby boli vhodné na analýzu a modelovanie. Model bude navrhnutý tak, aby dokázal predpovedať dôležité parametre siete, ako napríklad latenciu či priepustnosť, a to na niekoľko sekúnd dopredu. Takáto predikcia môže prispieť k optimalizácii prevádzky siete, zlepšeniu kvality služieb a k úspore energie. Navrhovaná architektúra je zobrazená na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: V návrhu riešenie je zobrazený tok dát medzi jednotlivými časťami projektu. Na jednej strane je Fyzické dvojčča, na druhej Digitálne dvojčča a v strede sú jednotlivé nástroje, ktoré slúžia na monitorovanie aktuálneho stavu a predikciu budúceho stavu. Na zber dát slúžia súbory typu PCAP zachytené softvérom (napr. Wireshark [36]) a LOG, ktoré sú zaznamenané v logoch z jednotlivých častí 5G siete. Tieto dáta sú predspracované a použité na trénovanie modelu ML a následné predikcie budúcich stavov. Na základe týchto predikcií sa upravujú parametre a nastavenia oboch fyzickej a digitálnej siete. Nástroj Grafana [37] poskytuje rozhranie pre monitorovanie a vizualizáciu dát a aktuálneho stavu siete.

Riešenie však čelí viacerým výzvam. Presnosť predikcií je ovplyvnená kvalitou a objemom dát, ktoré sú dostupné. Simulácie môžu byť výpočtovo náročné a obmedzené výkonom hardvéru. Navyše, implementácia a testovanie predikčného modelu si vyžaduje značný čas. Obmedzenia softvérových nástrojov, ako sú MATLAB a Simulink, môžu taktiež ovplyvniť rozsah a možnosti simulácie. Tieto faktory budú starostlivo zohľadnené a brané do úvahy počas celého životného cyklu tohoto projektu, od jeho implementácie až po nasadenie.

## 2.4 Hodnotenie rizík

Implementácia digitálneho dvojčata 5G siete spolu s modelom ML prináša rôzne výzvy, ktoré môžu ovplyvniť presnosť predpovedí, stabilitu a efektívnosť celého systému. Identifikácia týchto problémov a návrh stratégií na ich zmiernenie sú jednou z kľúčových úloh tejto práce.

Nedostatočná kvalita vstupných dát je jedným z najpravdepodobnejších rizík, ktoré môžu viesť k nesprávnym výsledkom modelu. Chyby v dátach alebo ich nereprezentatívnosť, napríklad pri modeloch sieťovej prevádzky (traffic patterns), môžu narušiť presnosť predpovedí [38]. Formou zmiernenia je testovanie na rôznych dátových scenároch a aplikácia metód ako krížová validácia a ladenie hyperparametrov, ktoré minimalizujú riziko chýb spojených s podtrénovaním (underfitting) a pretrénovaním (overfitting) [39].

Zber kvalitných dát môže byť problematický, pretože mnohé scenáre je potrebné zachytiť v laboratóriu. Bez dostatočných dát môže model generovať neadekvátne predpovede, ktoré nebudú reprezentovať skutočnosť. Riešením môže byť generovanie syntetických údajov [40] a využitie dostupných datasetov z iných projektov [41], ktoré môžu čiastočne nahradiť reálne dáta a napomôcť k presnejším predpovediam.

Nezvyčajné scenáre, ako vysoké zaťaženie siete (peak loads), neštandardné správanie používateľov či poveternostné podmienky môžu narušiť schopnosť modelu adaptovať sa [5]. Ak tieto scenáre neobsahujú trénovacie dáta, model nemusí byť pripravený na takéto situácie. Vzhľadom na čas, ktorý máme na získanie a predspracovanie dát, tento problém nemusí byť vo finálnej implementácii vyriešený dostatočne, a preto jeho vyriešenie vyžaduje ďalšiu prácu a zber dát.

Kompatibilita systémov ako srsRAN, Open5GS, UERANSIM a nástrojov Docker nie je vždy automatizovaná, čo môže ovplyvniť celkovú integráciu práce [5]. Z tohoto dôvodu je vhodné začínať implementáciu na malých izolovaných komponentoch, za neustáleho testovania. Takéto testovanie, a celkový vývoj DT sú časovo veľmi náročné, čo potvrdili aj autori v [42]. Tento fakt môže negatívne vplyvať na výsledok celej práce, nakoľko čas je jedným z kľúčových faktorov, ktoré majú vplyv na množstvo a kvalitu pozberaných dát určených na trénovanie ML modelu.

Konfigurácia siete môže odhaliť citlivé informácie o 5G infraštruktúre či porušenie GDPR [43] pri nechcenom zachytení údajov o používateľoch [13]. Únik takýchto dát by ohrozil nielen bezpečnosť projektu, ale aj reálnej siete [44]. Používanie .env súborov na uchovávanie citlivých premenných a simulovanie siete s fiktívnymi údajmi výrazne znižuje riziko úniku.

## 2.5 Udržateľnosť a environmentálny dopad

Implementácia opatrení na zabezpečenie udržateľnosti projektu a minimalizácia jeho environmentálneho dopadu sú kľúčové pre zaistenie dlhodobej hodnoty, spoločenského prínosu a efektivity vypracovania tejto práce. Práca je navrhnutá s dôrazom na efektívne využívanie zdrojov, udržateľný softvérový a hardvérový návrh a životný cyklus 5G siete, ktorý minimalizuje potrebu používania fyzických zdrojov.

Jednou z hlavných prínosov DT je možnosť predikcie a optimalizácie, pričom ak je DT zostrojené správne, môže dopomôcť k redukcii spotreby elektrickej energie [45]. Predikcia budúceho stavu siete umožňuje taktiež lepšiu správu záťaže (traffic load) a preťaženia (congestion), čo napomáha k znižovaniu nadmernej spotreby energie [46]. Navyše, DT eliminuje potrebu testovania na fyzických zariadeniach, čím sa minimalizuje spotreba rôznych materiálov [47] a času potrebného na fyzické experimenty. Tento prístup je obzvlášť užitočný v prípade nasadzovania a testovania 5G technológií v oblastiach s nerozvinutou infraštruktúrou a obmedzenými výrobnými zdrojmi [48].

Vývoj softvéru bol orientovaný na maximálnu efektivitu, čo zahŕňa optimalizáciu kódu na zníženie spotreby energie počas behu aplikácie a nasadenie projektu v prostredí Docker, čo umožňuje rýchlejšiu konfiguráciu a škálovateľnosť zariadení. Tieto opatrenia nielen znižujú environmentálny dopad [49][50], ale aj zvyšujú celkovú udržateľnosť projektu.

Modulárny dizajn [51] projektu zabezpečuje, že aktualizácie a údržba nemajú vplyv na celkovú funkčnosť systému. Tento prístup znižuje potrebu kompletného prekonfigurovania alebo fyzických zásahov do chodu programu, čo prispieva k dlhodobej udržateľnosti. Takýto dizajn môže mať pozitívny vplyv na životné prostredie [51] (Green Design).

Ako je vyššie uvedené, použitie prediktívnych modelov v DT môže viesť k zásadným environmentálnym prínosom [52]. Okrem zníženia zaťaženia fyzickej infraštruktúry a menej častých aktualizácií fyzického hardvéru, môže mať za následok aj nižšiu spotrebu zdrojov a menšiu produkciu odpadu [47]. Predikčné modely teda umožňujú efektívnejšie rozhodovanie s pozitívnym dopadom na životné prostredie.

## 2.6 Zamestnateľnosť

Táto bakalárska práca, zameraná na rozvoj teoretických znalostí v oblasti digitálnych dvojčiat v spojení s praktickou implementáciou a optimalizáciou 5G sietí, vedie k rozšíreniu zručností vo viacerých kľúčových oblastiach technologického sektora. V neposlednom rade strojové učenie, použité na predikciu správania implementovaného digitálneho dvojčaťa, zasahuje aj do oblasti dátovej vedy.

Vďaka formátu práce autori prejdú celým cyklom realizácie projektu, od prieskumu technológií cez návrh až po implementáciu a testovanie. Týmto získajú ucelený a komplexný pohľad na vývoj a riadenie softvérových projektov, ako aj na plánovanie, organizáciu a efektívnu komunikáciu.

Takáto kombinácia technických, projektových a komunikačných schopností môže významne zvýšiť hodnotu autorov na trhu práce, najmä v budúcnosti, keďže problematika digitálnych dvojčiat a 5G sietí je stále viac žiadaná a nachádza uplatnenie v rôznych odvetviach.

# Zoznam použitej literatúry

- [1] Martin Enders a Nadja Hoßbach. “Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review”. In: aug. 2019.
- [2] Feng Xiang et al. “Digital Twin Driven Green Material Optimal-Selection towards Sustainable Manufacturing”. In: *Procedia CIRP* 81 (2019). 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019, s. 1290–1294. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119306298>.
- [3] *From Digital Twin to Improved Patient Experience — siemens-healthineers.com*. <https://www.siemens-healthineers.com/sk/news/mso-digital-twin-mater.html>. [Accessed 29-12-2024].
- [4] Maulshree Singh et al. “Applications of Digital Twin across Industries: A Review”. In: *Applied Sciences* 12 (jún 2022), s. 5727. DOI: 10.3390/app12115727.
- [5] Sumit Singh et al. “Challenges of Digital Twin in High Value Manufacturing”. In: *SAE International - Aerospace Systems and Technology Conference 2018, London*. Okt. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-1928.
- [6] Open5GS. <https://github.com/open5gs/open5gs>. 2017.
- [7] Ali Güngör. *UERANSIM*. <https://github.com/aligungr/UERANSIM>. 2020.

- [8] srsRAN. *srsRAN Project*. [https://github.com/srsran/srsRAN\\_project](https://github.com/srsran/srsRAN_project). 2021.
- [9] Madara Premawardhana Dassanayake Mudiyansele a Harin Sellaheewa. “Digital Twins as a Framework for IoT Applications: A Review”. In: *2023 7th SLAAI International Conference on Artificial Intelligence (SLAAI-ICAI)*. 2023, s. 1–6. DOI: 10.1109/SLAAI-ICAI59257.2023.10365018.
- [10] Roberto Verdecchia et al. “Network Digital Twins: A Systematic Review”. In: *IEEE Access* 12 (2024), s. 145400–145416. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3453034.
- [11] Paul Almasan andv Miquel Ferriol Galmés et al. “Digital Twin Network: Opportunities and Challenges”. In: *CoRR* abs/2201.01144 (2022). arXiv: 2201.01144. URL: <https://arxiv.org/abs/2201.01144>.
- [12] Lalit Chettri a Rabindranath Bera. “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 7.1 (2020), s. 16–32. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2948888.
- [13] Aidan Fuller et al. “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research”. In: *IEEE Access* 8 (2020), s. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [14] Diego M. Botín-Sanabria et al. “Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review”. In: *Remote Sensing* 14.6 (2022). ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs14061335. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1335>.
- [15] Maulshree Singh et al. “Digital Twin: Origin to Future”. In: *Applied System Innovation* 4 (máj 2021), s. 36. DOI: 10.3390/asi4020036.
- [16] Huan X. Nguyen et al. “Digital Twin for 5G and Beyond”. In: *IEEE Communications Magazine* 59.2 (2021), s. 10–15. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343.



- [17] Michael Grieves a John Vickers. “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems”. In: Springer Cham, aug. 2017, s. 85–113. ISBN: 978-3-319-38754-3. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- [18] Michael Grieves. “Origins of the Digital Twin Concept”. Aug. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
- [19] Guodong Shao a Moneer Helu. “Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements”. In: *Manufacturing Letters* 24 (2020), s. 105–107. ISSN: 2213-8463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846319301312>.
- [20] Eric Tuegel et al. “Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin”. In: *International Journal of Aerospace Engineering* 2011 (jan. 2011). DOI: 10.1155/2011/154798.
- [21] Anton Rassõlkin et al. “Implementation of Digital Twins for electrical energy conversion systems in selected case studies”. In: *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 70 (jan. 2021), s. 19–39. DOI: 10.3176/proc.2021.1.03.
- [22] P.K. Rajesh et al. “Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance”. In: *Procedia Computer Science* 165 (2019). 2nd International Conference on Recent Trends in Advanced Computing ICRTAC -DISRUP -TIV INNOVATION , 2019 November 11-12, 2019, s. 18–24. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.061>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920300697>.
- [23] DNV GL Maritime. *Digital Twin Report for DMA: Digital Twins for Blue Denmark*. Tech. spr. [Accessed 29-12-2024]. Danish Maritime Authority, 2018.

- [24] Sophie Menard. *3 ways digital twins are going to help improve oil and gas maintenance and operations - linkedin.com*. <https://www.linkedin.com/pulse/3-ways-digital-twins-going-help-improve-oil-gas-sophie-menard/>. [Accessed 29-12-2024]. 2017.
- [25] José Monteiro et al. “Towards Sustainable Digital Twins for Vertical Farming”. In: *2018 Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM)*. 2018, s. 234–239. DOI: 10.1109/ICDIM.2018.8847169.
- [26] Carlos Miskinis. *Disrupting The Healthcare Industry Using Digital Twin Technology — challenge.org*. <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-in-healthcare/>. [Accessed 29-12-2024]. 2018.
- [27] Joe David, Andrei Lobov a Minna Lanz. “Learning Experiences Involving Digital Twins”. In: *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Okt. 2018, s. 3681–3686. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591460.
- [28] Carlos Miskinis. *The Impact of Digital Twins Technology in Mining and Mineral Extraction — challenge.org*. <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-in-mining/>. [Accessed 29-12-2024]. 2018.
- [29] Huawei. *Site Digital Twins Based 5G Digital Engineering Solution*. <https://www.huawei.com/en/news/2020/2/site-digital-twins-based-5g-digital-engineering-solution>. Accessed: 2024-12-03. 2020.
- [30] Paul Wilson. “State of smart cities in UK and beyond”. In: *IET Smart Cities* 1.1 (2019), s. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smc.2019.0024>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-smc.2019.0024>. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-smc.2019.0024>.

- [31] Deuk-Young Jeong et al. “Digital Twin: Technology Evolution Stages and Implementation Layers With Technology Elements”. In: *IEEE Access* 10 (2022), s. 52609–52620. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3174220.
- [32] Nick Wood. *China Mobile, ZTE use digital twin to improve lineside 5G*. <https://www.telecoms.com/5g-6g/china-mobile-zte-use-digital-twin-to-improve-lineside-5g>. Accessed: 2024-12-02. 2024.
- [33] Robert Harrison, Daniel A. Vera a Bilal Ahmad. “A Connective Framework to Support the Lifecycle of Cyber–Physical Production Systems”. In: *Proceedings of the IEEE* 109.4 (2021), s. 568–581. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3046525.
- [34] Nir Kshetri. “The Economics of Digital Twins.” In: *Computer* 54.4 (2021), s. 86–90.
- [35] Song Wang et al. “Machine Learning in Network Anomaly Detection: A Survey”. In: *IEEE Access* 9 (2021), s. 152379–152396. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3126834.
- [36] *Wireshark - wireshark.org*. <https://www.wireshark.org/>. [Accessed 01-01-2025]. 1998.
- [37] *Grafana: The open and composable observability platform / Grafana Labs - grafana.com*. <https://grafana.com/>. [Accessed 01-01-2025]. 2014.
- [38] Nour Alqudah a Qussai Yaseen. “Machine Learning for Traffic Analysis: A Review”. In: *Procedia Computer Science* 170 (2020). The 11th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT) / The 3rd International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40) / Affiliated Workshops, s. 911–916. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.111>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920305494>.

- [39] Giang Nguyen Thu. *Introduction to data science*. Vydavateľstvo SPEKTRUM STU, 2022. ISBN: 978-80-227-5193-3. URL: [https://kis.cvt.stuba.sk/ar1-stu/sk/detail-stu\\_us\\_cat-0095495-Introduction-to-data-science/](https://kis.cvt.stuba.sk/ar1-stu/sk/detail-stu_us_cat-0095495-Introduction-to-data-science/).
- [40] Chengliang Chai et al. “Mitigating Data Scarcity in Supervised Machine Learning Through Reinforcement Learning Guided Data Generation”. In: *2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE)*. 2024, s. 3613–3626. DOI: 10.1109/ICDE60146.2024.00278.
- [41] Jian Su et al. “Traffic prediction for 5G: A deep learning approach based on lightweight hybrid attention networks”. In: *Digital Signal Processing* 146 (2024), s. 104359. ISSN: 1051-2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104359>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200423004542>.
- [42] Timothy D. West a Mark Blackburn. “Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD’s Latest Manhattan Project”. In: *Procedia Computer Science* 114 (2017). Complex Adaptive Systems Conference with Theme: Engineering Cyber Physical Systems, CAS October 30 – November 1, 2017, Chicago, Illinois, USA, s. 47–56. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917317970>.
- [43] Prashant Tyagi a Haluk Demirkan. *The biggest big data challenges*. Title of the publication associated with this dataset: Nov/Dec 2016. 2019.
- [44] Marc-Roger Gagné. *Digital Twins, Another Reason to Worry About the IoT and Data Security*. <https://irishtechnews.ie/digital-twins-iot-and-data-security/>. 2022.

- [45] Yunlong Lu et al. “Communication-Efficient Federated Learning for Digital Twin Edge Networks in Industrial IoT”. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17.8 (2021), s. 5709–5718. DOI: 10.1109/TII.2020.3010798.
- [46] Umar Danjuma Maiwada, Kamaluddeen Usman Danyaro a Aliza Bt Sarlan. “Enhancing 5G energy efficiency through digital twin networks: A comprehensive review”. In: *Digital Twins and Applications* 1.1 (2024), s. 4–25. DOI: <https://doi.org/10.1049/dgt2.12008>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/dgt2.12008>. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/dgt2.12008>.
- [47] Rui Carvalho a Alberto Rodrigues da Silva. “Sustainability Requirements of Digital Twin-Based Systems: A Meta Systematic Literature Review”. In: *Applied Sciences* 11.12 (2021). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11125519. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5519>.
- [48] Salder Nazir. *How Digital Twins Enable Intelligent Cities*. <https://e.huawei.com/br/blogs/industries/insights/2020/how-digital-twins-enable-intelligent-cities>. 2020.
- [49] Christopher Tozzi. *Why Docker containers are good for the environment*. <https://cloudnativenow.com/features/docker-containers-good-environment/>. 2017.
- [50] Edrian Blasquino. *Docker forensics for sustainability: Unraveling the environmental impact of containerized systems*. <https://eforensicsmag.com/docker-forensics-for-sustainability-unraveling-the-environmental-impact-of-containerized-systems/>. 2023.
- [51] James Durand, Cassandra Telenko a Carolyn Seepersad. “How Does Modularity Affect Green Design?” In: *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Informa-*

- tion in Engineering Conference IDETC/CIE 2010*. Zv. 6. Aug. 2010. DOI: 10.1115/DETC2010-28760.
- [52] Diego M. Botín-Sanabria et al. “Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review”. In: *Remote Sensing* 14.6 (2022). ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs14061335. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1335>.

# Dodatok A

## Harmonogram práce

### A.1 Zimný semester

1. - 5. týždeň	Konzultácie, rešerš problematiky
6. týždeň	Formulácia problému
7. týždeň	Technický literárny prehľad
8. týždeň	Konzultovanie, Zamestnateľnosť
9. - 10. týždeň	Implementovanie pripomenutých zmien, Hodnotenie rizík, Udržateľnosť a environmentálny dopad
11. týždeň	Návrh riešenia na vysokej úrovni
12. týždeň	Úvod, Konzultovanie, Implementovanie pripomenutých zmien, Odovzdávanie BP 1

#### A.1.1 Vyjadrenie k harmonogramu

Harmonogram sa dodržal, čo prispelo k systematickému a plynulému postupu pri spracovaní bakalárskej práce. Pravidelné konzultácie s vedúcim práce zohrali kľúčovú úlohu pri jej realizácii. Vedúci poskytoval pripomienky a odporúčania, na

základe ktorých sa jednotlivé časti práce mohli upraviť do súčasnej podoby. Tento proces mi umožnil efektívne riešiť prípadné nedostatky a zabezpečiť súčasnú kvalitu výsledného dokumentu.

## A.2 Letný semester - Predbežný plán

Týždeň	Bakalárska práca	Článok
1. - 2. týždeň	Tímová práca, diverzita a inklúzia, konzultovanie o implementácií	Related work
3. - 4. týždeň	Open5GS, UERANSIM, srsRAN, Zber dát	Introduction, Methods, Index Terms
5. - 7. týždeň	Zber dát, Konfigurácia, MATLAB a Simulink	Data and Material
8. - 10. týždeň	ML model, tréovanie, Experimentálna reprodukovateľnosť a integrácia	About author, Discussion
11. týždeň	Konzultovanie, implementácie pripomienkovaných zmien, technický abstrakt, laický abstrakt	Results, Abstract, Lay abstract
12. týždeň	Zhrnutie, úpravy, konzultovanie	Conclusion, Future work