

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedra informatiky a výpočetní techniky

## **Bakalářská práce**

# **Využití VR pro trénink personálu jaderné elektrárny**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tereza TOTHOVÁ**  
Osobní číslo: **A20B0256P**  
Studijní program: **B0613A140015 Informatika a výpočetní technika**  
Studijní obor: **Informatika**  
Téma práce: **Využití VR pro trénink personálu jaderné elektrárny**  
Zadávací katedra: **Katedra informatiky a výpočetní techniky**

### Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou vývoje aplikací pro virtuální realitu.
2. Prostudujte problematiku radiační ochrany a vlivu ionizujícího záření na lidský organismus. V této oblasti využijte přiděleného technického konzultanta.
3. Navrhněte aplikaci pro trénink personálu jaderné elektrárny.
4. Aplikaci implementujte v podobě, kterou určí vedoucí práce.
5. Výslednou aplikaci řádně otestujte samostatně i s využitím zaměstnanců Škoda JS.
6. Aplikaci kriticky zhodnoťte a posuďte její klady, zápory a případná omezení.

Rozsah bakalářské práce: **doporuč. 30 s. původního textu**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Dodá vedoucí bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Antonín Rudolf**  
ŠKODA JS a.s.  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Vaněček, Ph.D.**  
Katedra informatiky a výpočetní techniky  
Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **6. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová**  
děkanka

---

**Doc. Ing. Přemysl Brada, MSc., Ph.D.**  
vedoucí katedry

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 6. května 2021

Tereza Tothová

## **Abstract**

The aim of this thesis is to create a VR application intended for use in nuclear engineering. It should make training of nuclear power plant personnel easier and more effective and focus on workers exposed to ionizing radiation. This work delves into research on VR application development as well as protection against radiation. The final application is designed for Oculus Rift S.

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je vytvořit aplikaci pro virtuální realitu určenou pro jaderné inženýrství, která by usnadňovala trénink personálu jaderné elektrárny se zaměřením na pracovníky, kteří pracují na pracovištích s rizikem ionizujícího záření. Práce studuje jak problematiku vývoje aplikací pro virtuální realitu, tak radiační ochranu a bezpečnost. Primárním zaměřením bakalářské práce je nabídnout způsob optimalizace prací a naplánování činností tak, aby nebyly překročeny limity ozáření pracovníků. Výsledná aplikace je určena pro Oculus Rift S.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Virtuální realita</b>	<b>8</b>
2.1	Historie a vývoj virtuální reality . . . . .	8
2.1.1	Původ virtuální reality . . . . .	8
2.1.2	Sensorama . . . . .	8
2.1.3	The Sword of Damocles (Damoklův meč) . . . . .	8
2.1.4	VCASS . . . . .	9
2.1.5	Rozšíření komerčního využití . . . . .	10
2.2	Virtuální realita v dnešní době . . . . .	10
2.2.1	Využití . . . . .	11
2.3	Technologie headsetů . . . . .	11
2.3.1	Desktopová zařízení . . . . .	12
2.3.2	Mobilní zařízení . . . . .	12
2.3.3	Standalone zařízení . . . . .	12
2.4	Zařízení pro VR . . . . .	13
2.4.1	Headset . . . . .	13
2.4.2	Senzory . . . . .	14
2.4.3	Ovladače . . . . .	14
2.5	Doplňková zařízení . . . . .	15
2.5.1	Haptické rukavice . . . . .	15
2.5.2	Obleky pro VR . . . . .	16
2.5.3	Pohybové platformy . . . . .	16
2.5.4	Kamery pro VR a 3D skenování . . . . .	17
2.5.5	VR trackery . . . . .	17
2.6	Příklady headsetů pro virtuální realitu . . . . .	17
2.6.1	Oculus Rift S . . . . .	18
2.6.2	HTC Vive a jeho nástupci . . . . .	18
2.6.3	Oculus Quest a Quest 2 . . . . .	19
2.6.4	Samsung Gear VR . . . . .	21
2.6.5	Google Daydream . . . . .	21
2.6.6	Valve Index . . . . .	21
2.6.7	HP Reverb G2 . . . . .	22

<b>3</b>	<b>Herní enginy</b>	<b>23</b>
3.1	Unity . . . . .	23
3.1.1	Základní informace . . . . .	23
3.1.2	Vlastnosti enginu . . . . .	23
3.1.3	Licence . . . . .	23
3.2	Unreal Engine . . . . .	24
3.2.1	Základní informace . . . . .	24
3.2.2	Vlastnosti enginu . . . . .	24
3.2.3	Licence . . . . .	24
3.3	Cry engine . . . . .	24
3.3.1	Základní informace . . . . .	24
3.3.2	Vlastnosti enginu . . . . .	24
3.3.3	Licence . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Seznámení s prostředím Unity</b>	<b>25</b>
4.1	Assets . . . . .	25
4.2	Scenes . . . . .	25
4.3	GameObjects . . . . .	25
4.4	Prefabs . . . . .	26
4.5	Unity Scripting API . . . . .	26
4.6	Unity editor . . . . .	26
4.6.1	Základní grafické rozhraní . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Problematika radiační ochrany a bezpečnosti</b>	<b>28</b>
5.1	Atomová struktura hmoty . . . . .	28
5.1.1	Atomové jádro . . . . .	28
5.1.2	Elektronový obal . . . . .	28
5.1.3	Fotony . . . . .	29
5.1.4	Charakteristická čísla . . . . .	29
5.1.5	Izotopy . . . . .	29
5.1.6	Nuklidy . . . . .	29
5.1.7	Silové působení . . . . .	29
5.2	Stabilita jader, radioaktivita . . . . .	30
5.2.1	Radioaktivita . . . . .	30
5.2.2	Radioaktivní přeměny . . . . .	31
5.3	Interakce částic s prostředím . . . . .	31
5.3.1	Interakce těžkých nabitých částic . . . . .	31
5.3.2	Interakce lehkých nabitých částic . . . . .	32
5.3.3	Interakce záření gama . . . . .	32
5.3.4	Interakce neutronového záření . . . . .	32

5.4	Detektory . . . . .	33
5.5	Veličiny a jednotky . . . . .	33
5.5.1	Absorbovaná dávka: D . . . . .	33
5.5.2	Dávkový příkon: DP . . . . .	33
5.5.3	Ekvivalentní dávka: HT . . . . .	33
5.6	Radiobiologické hledisko radiační ochrany . . . . .	34
5.6.1	Stavba buňky . . . . .	34
5.6.2	Interakce s živou hmotou . . . . .	34
5.6.3	Následky po ozáření buněk . . . . .	35
5.6.4	Účinky na lidský organismus . . . . .	35
5.7	Způsoby ochrany před zevním ozářením . . . . .	35
5.7.1	Ochrana časem . . . . .	36
5.7.2	Ochrana vzdáleností . . . . .	36
5.7.3	Ochrana stíněním . . . . .	36
5.8	Cíl radiační ochrany . . . . .	36
5.9	Systém limitování ozáření . . . . .	36
5.9.1	Základní pojmy . . . . .	37
5.9.2	Omezení ozáření . . . . .	37
5.10	Optimalizace . . . . .	37
5.11	Monitorování . . . . .	38
5.11.1	Osobní monitorování . . . . .	38
5.12	Systém vzdělávání . . . . .	38
5.13	Využití VR v JE . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Návrh aplikace</b>	<b>40</b>
6.1	Cíl aplikace . . . . .	40
6.2	Scéna a modely . . . . .	40
6.3	Pohyb po scéně . . . . .	41
6.3.1	Chůze v reálném světě . . . . .	41
6.3.2	Teleportace . . . . .	41
6.3.3	Lineární pohyb . . . . .	42
6.4	Interakce s objekty . . . . .	42
6.4.1	Fyzicky interaktivní objekty . . . . .	42
6.4.2	Speciální interaktivní objekty . . . . .	43
6.5	Měření radiační dávky . . . . .	43
6.6	Obchůzka . . . . .	43
6.7	Zvuky . . . . .	44
6.8	Uživatelské rozhraní . . . . .	44



<b>7 Implementace a testování aplikace</b>	<b>45</b>
7.1 Využité SDK . . . . .	45
7.1.1 Oculus Integration SDK . . . . .	45
7.1.2 VRTK . . . . .	45
7.2 Scéna a modely . . . . .	45
7.2.1 Modely ve scéně . . . . .	45
7.2.2 Fyzicky interaktivní objekty . . . . .	46
7.2.3 Speciální interaktivní objekty . . . . .	46
7.2.4 Osvětlení . . . . .	46
7.3 Pohyb po scéně . . . . .	47
7.4 Měření radiační dávky . . . . .	47
7.4.1 Radiační příkony . . . . .	47
7.4.2 Ekvivalentní dávka . . . . .	48
7.5 Zvuky . . . . .	49
7.6 Obchůzka . . . . .	50
7.6.1 Možnosti obchůzky . . . . .	51
7.7 Uživatelské rozhraní . . . . .	52
7.7.1 Hlavní menu . . . . .	52
7.7.2 Uživatelské rozhraní ve scéně s obchůzkou . . . . .	53
7.8 Testování . . . . .	56
<b>8 Závěr</b>	<b>57</b>
<b>Literatura</b>	<b>58</b>

# 1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je vytvořit aplikaci pro virtuální realitu určenou pro jaderné inženýrství, která by usnadňovala trénink personálu jaderné elektrárny se zaměřením na pracovníky, kteří pracují na pracovištích s rizikem ionizujícího záření.

Virtuální realita nám poskytuje možnost tréninku činností radiálních pracovníků, aniž by byli ionizujícímu záření vystaveni. Dává nám možnost činnosti opakovat a hledat nejrychlejší a nejefektivnější způsoby jejich vykonávání.

Primárním zaměřením bakalářské práce je nabídnout způsob optimalizace prací a naplánování činností tak, aby nebyly překročeny limity ozáření pracovníků. Poskytuje také možnost simulovat nehodovou situaci a vykonávání úkonů při zhoršených podmínkách. Výsledná aplikace je určena pro zařízení Oculus Rift S.

Struktura práce je následující. V kapitole 2 jsou vysvětleny základní pojmy týkající se virtuální reality, stručná historie, nejpoužívanější technologie a zařízení. Kapitola 3 se věnuje herním enginům. V kapitole 4 se seznámíme s prostředím Unity, které bylo využito pro tvorbu aplikace. Problematika radiální ochrany a bezpečnosti je podrobně probrána v kapitole 5. Kapitola 6 se zabývá návrhem aplikace a následující kapitola 7 její implementací a testováním. Kapitola 8 obsahuje stručnou rekapitulaci dosažených výsledků a zhodnocení práce.

## 2 Virtuální realita

Tato kapitola se zabývá stručnou historií, aktuálně nejrozšířenějšími technologiemi v oblasti virtuální reality a jednotlivými zařízeními.

Virtuální realita (VR) je technologie umožňující uživateli ocitnout se v simulovaném prostředí a interagovat s ním. Vytvářejí iluzi skutečného světa (např. při výcviku boje, pilotování, lékařství), nebo fiktivního světa počítačových her.

Jde o vytváření vizuálního (někdy i sluchového, hmatového či jiného zážitku) budícího subjektivní dojem skutečnosti. Standartně se využívá zobrazovací zařízení v podobě náhlavní soupravy (HMD, head-mounted display) a jeden nebo dva ovladače.

Virtuální realitu (VR) nelze zaměňovat s rozšířenou realitou (AR). AR překrývá informace přes skutečný svět, zatímco virtuální realita vytváří zcela nové digitální prostředí. Tyto technologie se překrývají v jednom bodě, který se nazývá smíšená realita (MR). [14]

### 2.1 Historie a vývoj virtuální reality

#### 2.1.1 Původ virtuální reality

Přesný původ virtuální reality je sporný, částečně kvůli tomu, jak obtížné je formulovat přesnou definici virtuální reality a co do ní spadá. [17]

Zásluha za rozšíření termínu virtuální realita do populárních medií se připisuje Jaronu Lanierovi, zakladateli společnosti VPL research, který na konci 80. let navrhl jedny z prvních zařízení virtuální reality. [19]

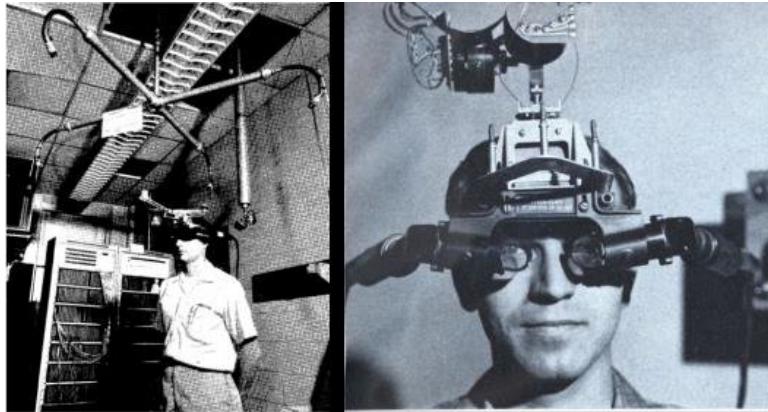
#### 2.1.2 Sensorama

V letech 1960–1962 sestavil Morton Heilig simulátor, který zapojoval kromě zraku a sluchu i čich a hmat. Sensorama obsahovala barevný předtočený film, zvuk, vítr a vibrace. Dá se považovat za první ze systémů virtuální reality, systém však nebyl interaktivní. [16]

#### 2.1.3 The Sword of Damocles (Damoklův meč)

V roce 1968 sestrojil Ivan Sutherland první zobrazovací zařízení pro virtuální realitu (viz Obr. 2.1) nositelné na hlavě (HMD, head-mounted display),

které obsahovala sledování hlavy (head tracking). Zařízení mělo primitivní uživatelské rozhraní a nízkou úroveň realismu. Grafikou virtuálního prostředí byly pouze jednoduché wireframe (drátěné modely) místností. Při používání Damoklova meče musel mít uživatel bezpečně připevněnou hlavu k zařízení. [16] [19]



Obrázek 2.1: Zařízení Sword of Damocles. Zdroj: <https://www.researchgate.net>

#### 2.1.4 VCASS

Thomas Furness vynalezl v roce 1982 pro Letectvo spojených států amerických pokročilý bojový simulátor (viz Obr. 2.2). Piloti nosili HMD, které rozšiřovalo výhled z okna letadla o grafiku, která pomáhala s mířením a zobrazovala informace o ideální dráze letu. [16]



Obrázek 2.2: Simulátor VCASS. Zdroj: <https://science.nichd.nih.gov>

### 2.1.5 Rozšíření komerčního využití

Zatímco mezi roky 1970 a 1980 poskytovalo odvětví virtuální reality převážně zařízení pro lékařské a vojenské účely, kolem roku 1980 začalo docházet k prvním rozšířeným komerčním vydáním spotřebitelských náhlavních souprav (headsetů).

V roce 1988, Cyberspace Project firmy Autodesk byl první, kdo implementoval VR na nízkonákladovém osobním počítači. Vedoucí projektu Eric Gullichsen později vyvinul WorldToolKit SDK pro virtuální realitu, která nabízela jako první grafiku s mapováním textur v reálném čase a byla široce využívána v celém průmyslu a akademické sféře.

V roce 1991 Sega vydala náhlavní soupravu Sega VR pro arkádové hry a konzoli Mega Drive. Ta používala LCD obrazovku, stereofonní sluchátka a inerciální senzory, které systému umožňovaly sledovat a reagovat na pohyby hlavy uživatele. [13]

CAVE (CAVE Automatic Virtual Environment) byl představen roku 1992. Místo HMD tento systém využíval projekce na stěny a strom místnosti. Tento přístup poskytoval lepší kvalitu a rozlišení prezentovaných obrazů a také širší zorné pole než systémy založené na HMD. [16]

Je také podstatné zmínit vývoj headsetu Oculus Rift. Ten byl vyvinut Palmerem Luckeyem a umožnil použití virtuální reality široké veřejnosti. Vydání Oculus Rift obnovilo zájem široké veřejnosti o virtuální realitu. [17]

Kolem roku 2000 i další společnosti, mezi nimi například Apple či Nintendo, vydali vlastní VR produkty. V roce 2007 Google představil Street View, službu, která zobrazuje panoramatické pohledy na neustále rostoucí počet světových pozic. Je také vybaven stereoskopickým 3D režimem přidaným v roce 2010. [13]

## 2.2 Virtuální realita v dnešní době

Roku 2016 vyvíjelo VR produkty více než 230 společností, mezi nimi např. Amazon, Apple, Facebook, Google, Microsoft, Sony a Samsung. [13]

V současné době systémy virtuální reality využívají nejčastěji headsety pro simulaci fyzické přítomnosti uživatele ve virtuálním prostředí, generování realistických obrazů, zvuků a dalších vjemů. HMD (head-mounted display) obecně odkazuje na VR headsety, ale brýle pro rozšířenou realitu a headsety se smíšenou realitou jsou také technicky považovány za HMD. [14] Uživatel je schopen se rozhlížet ve virtuálním prostředí, pohybovat se v něm a často i interagovat s virtuálními předměty. Virtuální realita typicky zahrnuje sluchovou a obrazovou zpětnou odezvu, ale díky haptické technologii může nabízet

i další typy sensorické zpětné vazby, jako jsou například vibrace.

Většina expertů se shoduje, že popularita VR technologií v dalších letech stále poroste.

### 2.2.1 Využití

Virtuální realita má v dnešní době široké použití. Hlavními oblastmi, kde se využívá jsou:

- Vzdělání a trénink
- Lékařská a zdravotní péče
- Marketing
- Armáda
- Společenské vědy a psychologie
- Strojírenství a design
- Zábavní průmysl

VR umožňuje simulovat situaci ve virtuálním prostředí, která by jinak byla těžce nákladná nebo dokonce nereálná. Jde například o simulace krizových situací.

V oblastech jako je vojenský, lékařský a vzdělávací sektor se virtuální realita často využívá k simulaci náročných úkonů. Uživatelé tak mohou absolvovat kvalitní školení bez rizika ublížení na zdraví, překonání velkých vzdáleností nebo vysokých nákladů. Může se jednat například o simulace vojáků na bojišti, pobyt astronautů na vesmírné stanici nebo nácvik náročné operace chirurgem, bez riziku zranění pacienta. [14] [16]

Sportovci využívají trenažér s VR headsetem, aby simulovali podmínky reálného tréninku. [14]

Zábavní průmysl je zatím nejrozšířenější z pohledu využitelnosti VR. Jde o počítačové hry, virtuální prohlídky, interaktivní filmy, dokumenty živé přenosy z koncertů či konferencí.

## 2.3 Technologie headsetů

Technologie je možné rozdělit podle výpočetního zařízení, které headset využívá – dektopové, mobilní a standalone zařízení. Každá kategorie má své výhody a nevýhody.

### 2.3.1 Desktopová zařízení

Jedná se o VR headsety, které využívají jako výpočetní jednotku osobní počítač. Headset může být buď fyzicky připojen k počítači pomocí kabelů, jako je HDMI nebo USB, nebo může být využit bezdrátový adaptér.

Desktopová zařízení jsou stále považována za nejvíce realistické a pohlcující, díky vysoce kvalitnímu zážitku, který poskytují. Tyto zařízení standardně vyžadují výkonný počítač. Je tendence požadavky na výpočetní výkon snižovat, to však může znamenat obětování přesnosti sledování nebo kvality grafiky.

Výhodou této technologie je vysoká výpočetní síla, která umožňuje vysokou kvalitu obrazu a sledování. Nevýhodou může být kabel omezující pohyb a potřeba nainstalování externích senzorů. To už ale neplatí pro všechny modely. Zařízení s bezdrátovým adaptérem se snaží zkombinovat to nejlepší z dvou světů – svobodu pohybu a vysoce kvalitní VR zážitek. [14]

### 2.3.2 Mobilní zařízení

Mobilní VR headsety využívají mobilní zařízení (smartphone) jako výpočetní jednotku a zároveň jako displej. Uživatel jednoduše zasune smartphone do headsetu a dívá se na jeho obrazovku přes sadu čoček, které vytvářejí pocit prostoru. VR aplikace využívá také fotoaparát smartphonu a integrované akcelerometry. Kvalita VR zážitku zcela závisí na použitém smartphonu. Mezi nejdůležitější faktory patří typ a rozlišení displeje. [14]

Zásadní nevýhodou mobilních zařízení je, že často nenabízí plné sledování uživatele, což může vést k pocitování nežádoucích účinků, jako je nevolnost či bolest hlavy. V dnešní době se od této technologie pomalu upouští také vzhledem k nízkému grafickému výkonu. I když jsou tyto headsety samostatně velmi levné, pořízení mobilního telefonu, který je pro účely využití nezbytný, je cenově nákladné a cenově se pak vyrovnají ostatním druhům zařízení.

### 2.3.3 Standalone zařízení

Standalone zařízení, jinak nazývané all-in-one (vše v jednom), jsou v dnešní době velmi populární technologií. Mají vestavěné procesory, senzory, baterie a paměťové úložiště. Nevyžadují připojení k počítači nebo smartphonu. Některé modely lze však k PC připojit – pak mohou fungovat i jako běžné VR brýle pro PC.

Obecně řečeno, headsety typu „vše v jednom“ pro VR jsou výrazně méně výkonné než headsety pro PC. Nabízejí grafiku nižší kvality a nižší obnovu-

vací frekvenci. Integrovaná výpočetní jednotka je však přizpůsobena přímo pro běh VR aplikace, a tudíž standartně poskytuje větší výpočetní a grafický výkon než mobilní VR zařízení. Uživatel navíc není omezován kabelem, který je nutností u některých desktopových headsetů. Mnoho velkých technologických společností, jako je Google, Facebook a HTC, zaměřují stále více úsilí na tuto kategorii VR. Je tedy možné předpokládat velký růst standalone zařízení. [14]

## 2.4 Zařízení pro VR

### 2.4.1 Headset

Headset (nebo HMD) je základním prvkem VR technologie, který umožňuje uživateli se plně ponořit do virtuálního světa. Headset pro virtuální realitu typicky (ale ne vždy) obsahuje dva malé LCD či OLED displeje s vysokým rozlišením. Ty poskytují oddělené obrazy pro každé oko pro stereoskopické vykreslování grafiky. Headset také obsahuje integrované senzory, které snímají pohyb hlavy – gyroskopy a akcelerometry. Gyroskop je zařízení používané k měření nebo udržování orientace a úhlové rychlosti. Akcelerometr je přístroj měřící posuvné a rotační zrychlení.

Sledování hlavy je proces, který sleduje aktuální polohu a orientaci hlavy uživatele. To umožňuje virtuálnímu pohledu následovat úhel pohledu uživatele, takže uživatel může otáčet hlavou či měnit její polohu a vidět různé úhly stejné scény ve virtuálním prostředí. Ve virtuální realitě se jedná o zásadní proces, protože uživateli poskytuje svobodu pohybu. [7]

Některá zařízení obsahují i sledování očí (tzv. eye tracking). Sledování očí je proces měření buď bodu pohledu (kam se člověk dívá), nebo pohybu oka vzhledem k hlavě. Tato technologie umožňuje sofistikované techniky vykreslování, tj. snížení rozlišení vykreslování dále od pohledu uživatele.

Headsety pro virtuální realitu mají podstatně vyšší požadavky na latenci než klasické monitory. Latence je čas od změny vstupu, než se projeví vizuální efekt. Pokud je systém příliš pomalý na to, aby reagoval na pohyb hlavy, může to způsobit nemoc z virtuální reality, což je druh nemoci z pohybu (tzv. motion sickness). Výzkum společnosti Oculus došel k závěru, že většina lidí nepocituje žádné problémy, pokud je latence 13 milisekund nebo nižší. Tuto hodnotu latence můžeme najít u displejů s obnovovací frekvencí 90 Hz, které se považují za průmyslový standard. Dnes již existují headsety s vyššími frekvencemi, například Valve Index dovoluje uživateli zvolit si až 144 Hz. [18]



Vzhledem k tomu, že HMD je nošeno na hlavě, kladou se na něj také vysoké ergonomické požadavky. Měl by být lehký, pohodlný, jednoduchý sundat a nasadit. [16]

### 2.4.2 Senzory

Senzory jsou nezbytnou součástí každého VR headsetu, který podporuje pohyb a sledování v prostoru. Slouží pro snímání polohy headsetu, ovladačů a dalších zařízení. Senzory dělíme podle přístupu k monitorování pohybu uživatele ve skutečném prostředí na outside-in (zvenku-dovnitř) a inside-out (zevnitř-ven) (viz Obr. 2.3)

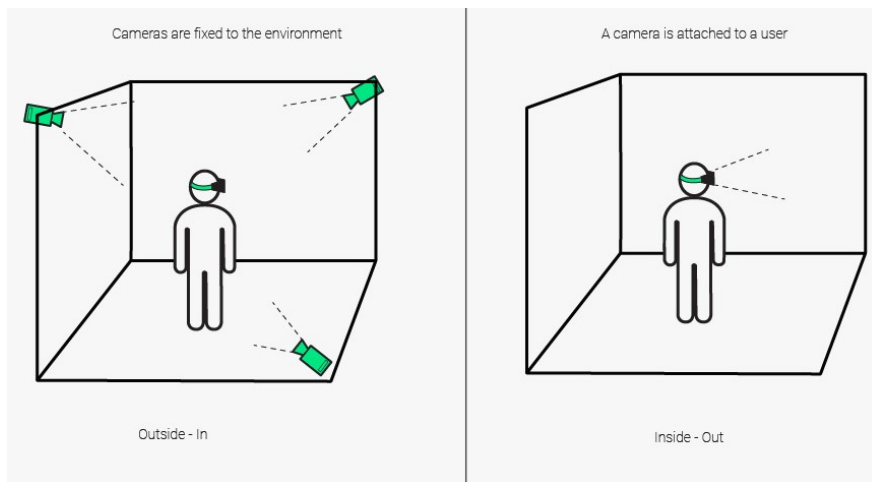
Outside-in sledování používá senzory umístěné kolem uživatele tak, aby pokryly celou oblast použitou pro simulaci virtuálního prostředí. Senzory sledují umístění všech používaných zařízení v oblasti a převádějí je do virtuálního prostředí. Tento proces má velmi vysokou přesnost a nízkou latenci. Je také možné přidat více senzorů pro další navýšení přesnosti. Velkou nevýhodou je však omezený dosah, který je pevně stanoven při instalaci senzorů. Senzory nejsou schopné se pohybovat a zaznamenávat jakýkoli pohyb mimo jejich zorné pole. Tento typ senzorů využívají některá desktop VR zařízení.

Inside-out sledování využívá senzory zabudované do headsetu. Pozice headsetu je zaznamenána a průběžně upravována, aby bylo možné sledovat aktuální polohu uživatele ve VR prostředí. Headset může obsahovat kameru, která se snaží rozpoznat předem umístěné značky ve skutečném prostředí, které slouží jako referenční body pro pohyb uživatele. Sledování může fungovat i bez použití značek. V tomto případě se pro určení pozice uživatele v prostoru využívá sledování polohy objektů a přirozených rysů okolí kamery. Tato metoda je levnější, ale postrádá přesnost a může dosahovat vyšších latencí než jiné metody sledování, což může vést k nemoci z pohybu. [15]

### 2.4.3 Ovladače

Ovladače jsou širokou kategorií zařízení, které uživateli umožňují interagovat a manipulovat s objekty ve virtuálním prostředí. Mohou být ovládány pomocí rukou, prstů, nohou nebo jiných částí těla. Nejpoužívanějšími jsou ruční ovladače, kterým se zde věnujeme dále. Ovladače standartně obsahují ovládací prvky, nejčastěji v podobě mechanických tlačítek, ale využívají se i trackpady, spouště nebo joysticky.

Ovladače mohou také poskytovat tzv. haptickou zpětnou vazbu uživateli, nejvyžívanějším příkladem jsou vibrace. Haptika je způsob poskytování zpětné vazby uživateli o akcích prováděných v prostředí virtuální rea-



Obrázek 2.3: Porovnání senzorů inside-out a outside-in. Zdroj: <https://delight-vr.com/xr-glossary>

lity, který fyzicky simuluje očekávané výsledky pohybů uživatele. Když se uživatel pokusí uchopit nebo se dotknout objektu ve virtuálním prostředí, rukavice nebo jiné vybavení, mohou simulovat tlak na odpovídající část těla uživatele a vyvolat pocit, že se dotýká skutečného objektu. To vytváří pro uživatele pocit realismu, protože objekty, kterých se dotýká mohou být i „pocitovány“, místo aby byly viditelné, ale bylo nemožné se jich dotknout. [16]

## 2.5 Doplnková zařízení

Tato sekce se věnuje doplňkovým, méně využívaným a experimentálním zařízením pro VR. Tato zařízení lze rozdělit na ty, které se používají k výrobě obsahu do VR, jako jsou kamerové soupravy, a na ty, které se používají k prohlížení obsahu VR.

### 2.5.1 Haptické rukavice

Základní funkcí rukavic pro VR (viz Obr. 2.4) je možnost vidět své ruce ve virtuálním prostředí, což umožňuje lépe interagovat s objekty. Některé rukavice obsahují tzv. „šlachy“, které dokáží simulovat pocit dotyku napínáním a uvolňováním těla a využívají haptiku. S těmito rukavicemi je možné pocítovat tvar, velikost, tvrdost a váhu objektu. [5]



Obrázek 2.4: Haptické rukavice HaptX Gloves DK2. Zdroj: <https://haptx.com>

### 2.5.2 Obleky pro VR

Obleky pro virtuální realitu umožňují sledování celého těla pomocí senzorů, které přenáší informace o poloze všech částí těla. Kromě senzorů využívají obleky haptiku, která pomáhá uživateli plně se ponořit do virtuálního světa. Oblek uživateli umožňuje zažívat dotykové vjemy, fyzickou námahu, váhu, drsnost a hladkost objektů, pocity tepla a chladu a další vjemy. [5]

Jedním z nejznámějších zařízení je tzv. TeslaSuit (viz Obr. 2.5). Ten obsahuje biometrické systémy, které monitorují životní funkce, což umožňuje pokročilou analýzu zdraví a výkonu uživatele. Díky tomu je možné určit emoční stav, úroveň stresu a některé zdravotní indikátory uživatele. Využívá se například při rehabilitacích, specificky k elektrické simulaci svalů, nervové simulaci, analýze vodivosti kůže a elektrokardiogramu (EKG). [7]

### 2.5.3 Pohybové platformy

Také známé jako VR běžecké pásy. Umožňují uživateli chodit, běhat, či létat v každém směru, přičemž uživatel je fyzicky připevněn k zařízení pomocí speciálního postroje. Pás obsahuje senzory pro sledování pozice uživatele, délku kroku a rychlost pohybu. Tyto hodnoty jsou přenášeny do virtuálního reality a převedeny na pohyby ve virtuálním prostředí. Moderní platformy jsou považovány za špičkové ovládání virtuální reality, protože uživatel může běhat plnou rychlostí, sklánět se, otáčet se, nebo skákat bez omezení. [5]



Obrázek 2.5: TeslaSuit. Haptický oblek pro VR. Zdroj: <https://teslasuit.io>

### 2.5.4 Kamery pro VR a 3D skenování

Kamery pro VR se využívají k zachycení 3D obsahu, jako jsou videa, obrázky nebo modely objektů. Pořízený obsah lze dále importovat do vybraného herního enginu, o těch pojednává kapitola 3. Při snímání lze použít jednu kameru nebo soupravu vyrobenou z mnoha kamer. 3D scannery se dají považovat za kategorii VR kamer, díky jejich podobné funkci. 3D skenování je technologie pro vytváření vysoce přesných 3D modelů objektů z reálného světa, které mohou být následně využity ve virtuálním prostředí.

### 2.5.5 VR trackery

Trackery (viz Obr. 2.6) se dají připevnit k libovolnému objektu v reálném světě a přenést jej tak do virtuálního prostředí, nejčastěji například pracovní nástroje, nebo například boty uživatele pro sledování pohybu nohou.

## 2.6 Příklady headsetů pro virtuální realitu

V této části je popsáno několik v přítomnosti využívaných headsetů.

Při výběru headsetu, pro který bude aplikace vyvinuta, bylo nejprve rozhodnuto, že se bude jednat o desktopové zařízení. Některé z poskytnutých 3D modelů jsou náročné na vykreslení, a proto je potřeba vysoký výpočetní výkon, který desktopová zařízení nabízejí. Konkrétně byl pak zvolen headset Oculus Rift S (viz 2.6.1). Důvodem je samozřejmě jeho dostupnost, ale také absence externích stanic, což umožňuje jednodušší a rychlejší sestavení a



Obrázek 2.6: Vive Tracker. Zdroj: <https://vr-expert.com>

méně náročný transport. Dalším důvodem je vyšší rozlišení displeje než u druhého dostupného headsetu HTC Vive. Neméně důležité je také pohodlí, které poskytuje jeho novější design, lehčí konstrukce a menší ovladače.

### 2.6.1 Oculus Rift S

Oculus Rift S (viz Obr. 2.7) je nástupcem headsetu Oculus Rift. Byl vydán roku 2019. Jde o desktopové zařízení, výpočetní jednotkou je tedy PC. Využívá inside-out sledování pomocí pěti kamer umístěných přímo na headsetu a nevyžaduje žádné externí senzory. Využívá jediný LCD panel s rozlišením 2560 x 1440 pixelů, ale jeho obnovovací frekvence je mírně nižší při 80 Hz ve srovnání s 90 Hz u Oculus Rift. Headset nabízí pouze softwarové nastavení vzdálenosti zornic právě kvůli použití pouze jednoho displeje. Kamery na headsetu umožňují uživateli vidět okolí. Ovladače Oculus Touch mají kapacitní senzory na tlačítkách a joysticku a zvládají tak rozeznávat gesta. Headset využívá Oculus Insight sledovací systém. Software kompatibilní s Oculus Rift S je k dispozici na Oculus Home. [4]

Výhodami jsou inside-out sledování a s tím související absence externích stanic se senzory, jednodušší sestavení a kvalitnější displej než u HTC Vive. Nevýhodou je omezení mobility uživatele kvůli nutnosti kabelu.

### 2.6.2 HTC Vive a jeho nástupci

HTC Vive (viz Obr. 2.8) vyráběný společností HTC a vyvinut ve spolupráci s herním gigantem Valve, byl vydán roku 2016. Jde o desktopové zařízení, výpočetní jednotkou je tedy PC. Je dodáván s dvojicí ovladačů s funkcí sledování pohybu a dvěma senzory. Bezdrátové základní stanice umožňují



Obrázek 2.7: Sada Oculus Rift S. Zdroj: <https://www.oculus.com>

vytvořit herní prostor, kde se uživatel může fyzicky pohybovat. Headset obsahuje dva AMOLED displeje s rozlišením 1080 x 1200 pixelů a úhlopříčkou 3.6", obnovovací frekvencí 90 Hz a zorným polem 110 stupňů. Headset také obsahuje přední kameru, která je využita například bezpečnostním systémem, který chrání uživatele před narážením do překážek.

HTC Vive využívá technologii SteamVR. Další kompatibilní software nabízí platformy Steam společnosti Valve a VivePort společnosti HTC. Pomocí bezdrátového adaptéru je možné využívat HTC Vive i bez kabelů, které mohou jinak omezovat mobilitu uživatele. Velkou výhodou je existence HTC Trackerů, které se připevní na libovolný předmět a dovolují je přenést do virtuální scény.

V roce 2018 společnost HTC představila vylepšený model nazvaný HTC Vive Pro. Je vybaven displeji s vyšším rozlišením (1440 x 1600 pixelů pro každé oko), druhou kamerou a novým designem. V roce 2020 byla však distribuce HTC Vive a HTC Vive Pro ukončena ve prospěch novějších modelů. Mezi ty patří Vive Pro Eye, který oproti starším headsetům využívá eye-tracking a umožňuje tak interakce bez použití rukou. Vive Focus, který je na rozdíl od svých předchůdců standalone zařízením a několik různých modelů Vive Cosmos, které využívají inside-out tracking pomocí šesti kamer. [11]

Nevýhodou HTC Vive jsou poměrně vysoké nároky na výkon počítače, snížená mobilita uživatele kvůli kabeláži a nutnost instalace základních stanic.

### 2.6.3 Oculus Quest a Quest 2

Oculus Quest (viz Obr. 2.9) vydaný roku 2019 je standalone zařízením s operačním systémem Android. Využívá inside-out sledování pomocí řady kamer integrovaných přímo v headsetu. Obsahuje dva OLED displeje, každý s rozlišením 1440 x 1600 pixelů a obnovovací frekvencí 72 Hz. Využívá procesor



Obrázek 2.8: Sada HTC Vive. Zdroj:<https://www.gpureport.cz>

Qualcomm Snapdragon se 4 GB RAM a integrovanou baterií, která umožňuje přibližně 2 až 3 hodiny provozu. Součástí setu jsou dva ovladače Oculus Touch. Software obsahuje funkci Oculus Link, která dovoluje připojení headsetu k počítači pomocí USB, čímž umožňuje jeho použití s aplikacemi vyvinutými pro desktopové zařízení Oculus Rift.

Výhodou headsetu je jeho nízká cena a pohodlné a jednoduché používání bez potřeby přídavné výpočetní jednotky nebo kabelu. Představení funkce Oculus Link ještě zvětšuje jeho flexibilitu.

Nástupcem headsetu je Oculus Quest 2, který využívá dva LCD displeje, každý s rozlišením 1832 x 1920. Obnovovací frekvence je stejná jako u jeho předchůdce a to 72 Hz. Narozdíl od něj však nabízí novější procesor a větší vnitřní paměť. [4]



Obrázek 2.9: Sada Oculus Quest. Zdroj: <https://www.oculus.com>

### 2.6.4 Samsung Gear VR

Gear VR je příkladem mobilního VR zařízení. Byl vyvinut společností Samsung ve spolupráci s Oculus a představen roku 2015. Využívá kompatibilní zařízení ze série Samsung Galaxy jako displej a procesor. Výkon a kvalita obrazu je tedy plně závislé na vloženém mobilním telefonu. Sám o sobě je balíček obsahující kostru headsetu a ovladače velmi levný. Je však kompatibilní pouze s nejlepšími Samsung smartphony, díky nimž cena celkové sady značně narůstá. Je nutné také vzít v úvahu, že výpočetní výkon i nejnovějších smartphonů je omezený, zejména v porovnání s desktopovými zařízeními. [6]

### 2.6.5 Google Daydream

Google Daydream je mobilní VR headset, který funguje podobně jako Gear VR. Narozdíl od Gear VR však podporuje celou řadu smartphonů, příkladem jsou vybrané modely od firem Huawei, Samsung, Asus, LG a samozřejmě Pixel série od Googlu. Později byl vydán jeho nástupce Daydream View.

### 2.6.6 Valve Index

Valve Index (viz Obr. 2.10) je desktopové zařízení společnosti Valve. Využívá dva RGB LCD displeje s rozlišením 1440 x 1600, které podporují frekvenci 120 Hz, ale jsou plně kompatibilní i s 90 Hz a experimentálními 144 Hz. Poskytuje nastavitelnou vzdálenost mezi čočkami a vzdálenost čoček od očí. Využívá dvojici vnějších RGB kamer. Je aktuálně jedním z nelepších zařízení na trhu. [10]



Obrázek 2.10: Sada Valve Index. Zdroj: <https://vrmag.cz>



### **2.6.7 HP Reverb G2**

Headset byl vyvíjen v kolaboraci společností HP, Valve and Microsoft a byl uveden na trh v listopadu 2020. Je vybaven dvěma LCD displeji o rozlišení 2160 x 2160 s obnovovací frekvencí 90 HZ. Využívá čtyři kamery pro sledování pozice uživatele. [3]

## 3 Herní enginy

Herní enginy jsou programy, které slouží nejen pro vývoj počítačových her, ale i VR simulací a dalších 2D a 3D aplikací. Poskytují abstrakci běžně prováděných úkolů, jako je vykreslování grafiky, fyzika scény nebo zpracování vstupů. Nabízejí také komponenty, které je možné opakovaně používat, například zobrazení a animace modelů, detekce kolizí či grafické rozhraní.

V souvislosti s herními enginy se setkáváme s dvěma pojmy: API (application programming interface) a SDK (software development kit). API je softwarové rozhraní, které operační systémy, knihovny a jiné služby poskytují, aby uživatel mohl využívat jejich konkrétních funkcí. SDK je kolekce knihoven, API a nástrojů, které jsou k dispozici pro programování daných operačních systémů a nástrojů. Většina herních enginů poskytuje ve svých SDK příslušné API. [20]

### 3.1 Unity

#### 3.1.1 Základní informace

Unity je multiplatformní herní engine vyvíjený společností Unity Technologies, který byl poprvé vydán roku 2005 s cílem zpřístupnit vývoj her většímu množství vývojářů. Je využíván pro vývoj 2D, 3D, VR i AR aplikací v mnoha průmyslových odvětvích i mimo herní průmysl, jako jsou film, architektura, strojírenství či stavebnictví.

#### 3.1.2 Vlastnosti enginu

Unity nabízí možnost využití skriptovací API v jazyce C# pro vytváření skriptů pro vyvíjené aplikace, ale i pluginů pro samotný Unity editor. Unity aktuálně podporuje vytváření aplikací pro více než 20 různých platform – mobilních, desktopových, konzolových, virtuální a rozšířenou realitu.

#### 3.1.3 Licence

Unity nabízí bezplatnou licenci a několik placených možností. Bezplatná licence je určena pro osobní použití a pro menší společnosti generující méně než 100 000 dolarů ročně. Placené verze jsou ve formě předplatného, jehož cena se odvíjí od výnosů firmy a počtu počítačů využívajících Unity. [9]

## 3.2 Unreal Engine

### 3.2.1 Základní informace

Unreal je herní engine vyvíjený společností Epic Games a poprvé představený roku 1998. I přesto, že byl původně vyvinut pro vývoj her, byl osvojen i dalšími trhy, zejména filmovým a televizním průmyslem. Vyznačuje se vysokou přenositelností a podporuje širokou škálu platforem.

### 3.2.2 Vlastnosti engine

Engine využívá programovací jazyk C++ a podporuje Blueprints vizuální programovací jazyk, který ulehčuje práci se skripty.

### 3.2.3 Licence

Unreal Engine podléhá free to use licenci. Pokud hrubý zisk z produktu přesáhne 1 000 000 amerických dolarů, vývojář je povinen odvádět 5 procent zisku společnosti Epic Games. [2]

## 3.3 Cry engine

### 3.3.1 Základní informace

CryEngine je herní engine navržený německou vývojářskou společností Crytek. Je použit ve všech herních titulech, které společnost vydala a je stále aktualizován, aby podporoval nejnovější konzole a herní hardware.

### 3.3.2 Vlastnosti engine

CryEngine podporuje tvorbu skriptů v programovacích jazycích C++, C# a Lua.

### 3.3.3 Licence

Použití CryEnginu je zdarma, avšak po přesáhnutí zisku 5000 amerických dolarů z produktu, je vývojář povinný odvádět 5 procent ze zisku společnosti Crytek. [1]

# 4 Seznámení s prostředím Unity

Pro implementaci projektu byl vybrán engine Unity ve verzi 2019.2.13f pro Windows x64. Nabízí všechny potřebné nástroje, vyhovující licenci a umožňuje tvorbu skriptů v preferovaném jazyce C#. Verze byla zvolena z důvodu kompatibility s použitými SDK, konkrétně Oculus Integration a VRTK, kterým se budeme více věnovat v kapitole 7 a také z důvodu, že jde o tzv. LTS verzi, tedy stabilní verzi s pokračující podporou od Unity. Jako verzovací systém bylo použito řešení od Unity, Unity Collaborate.

## 4.1 Assets

Asset je reprezentace jakékoli položky, kterou je možné použít v projektu. Může jít o soubor vytvořený mimo Unity, jako je 3D model, zvukový soubor nebo obrázek. Některé typy assetů je možné vytvořit přímo v Unity.

## 4.2 Scenes

Scény (Scenes) jsou assety, které obsahují celou aplikaci, nebo její část. Jednoduchá aplikace může obsahovat pouze jednu scénu, rozsáhlejší může používat scénu například pro každou úroveň.

## 4.3 GameObjects

GameObject je základním objektem v Unity. Každý objekt ve hře je GameObject (modely, světla, kamery, speciální efekty a další). GameObject funguje jako kontejner pro komponenty (components), které implementují jeho funkce. Chceme-li přidat objektu vlastnost, musíme mu přidat komponent. Unity nabízí množství různých typů komponentů, můžeme si také vytvořit vlastní pomocí Unity Scripting API.

## 4.4 Prefabs

Prefab je GameObject se všemi jeho komponentami, hodnotami parametrů a podřízenými objekty uložený jako opakovaně použitelný Asset.

## 4.5 Unity Scripting API

Chování GameObjects je řízeno komponenty, které jsou k nim připojeny. Unity dovoluje vývojáři vytvořit si vlastní komponenty pomocí skriptů, kterými může spouštět události, upravovat vlastnosti komponent a reagovat na vstupy uživatele.

## 4.6 Unity editor

### 4.6.1 Základní grafické rozhraní



Obrázek 4.1: Uživatelské rozhraní herního engine Unity. Zdroj: <https://docs.unity3d.com>

Na obrázku 4.1 je znázorněno uživatelské rozhraní Unity. Dále jsou popsány jeho jednotlivé části.

A. Panel nástrojů (Toolbar) poskytuje přístup k nejdůležitějším pracovním funkcím. Vlevo najdeme základní nástroje pro manipulaci se zobrazením scény a manipulaci s objekty v ní. Ve středu jsou ovládací prvky přehrávání,

pauzy a krokování. Tlačítka vpravo poskytují přístup k Unity Collaborate, Unity Cloud Services a vašemu účtu Unity, následuje nabídka viditelnosti vrstvy, a nakonec nabídka rozložení editoru.

B. Okno hierarchie (Hierarchy) je hierarchické textové vyjádření každého objektu (GameObject) ve scéně.

C. Pohled Hra (Game) simuluje, jak bude finální vykreslená hra vypadat z pohledu kamery.

D. Pohled Scéna (Scene) umožňuje prohlížet a vizuálně upravovat scénu.

E. Okno Inspektor (Inspector) umožňuje prohlížet a upravovat vlastnosti aktuálně vybraného objektu.

F. Okno Projekt (Project) zobrazuje knihovnu assetů, které jsou k dispozici k použití v daném projektu.

G. Stavový řádek (Status bar) poskytuje oznámení o Unity procesech.

[8]

# 5 Problematika radiační ochrany a bezpečnosti

Celá tato kapitola čerpá z dokumentu [12].

## 5.1 Atomová struktura hmoty

Atom se skládá z jádra a elektronového obalu. Jádro nese kladný elektrický náboj, elektronový obal nese záporný elektrický náboj.

### 5.1.1 Atomové jádro

Atomové jádro nese vždy kladný elektrický náboj. Tvoří jej dva typy těžkých částic – protony a neutrony. Dohromady jsou nazývány nukleony. Ty jsou v jádře drženy tzv. jadernými silami.

#### Protony

Proton je částice, která nese kladný elementární elektrický náboj stejné absolutní velikosti jako elektron. Jde o stabilní částici.

#### Neutrony

Neutron je částice elektricky neutrální s klidovou hmotností o něco vyšší než u protonu. Ve stabilních atomových jádrech jsou neutrony stabilní.

### 5.1.2 Elektronový obal

Elektronový obal je tvořen elektrony. Ty se pohybují na daných energetických hladinách.

#### Elektrony

Elektrony jsou základními, elementárními, stabilními částicemi hmoty. Jsou nositeli záporného elementárního náboje, jejich klidová hmotnost je menší než u protonu a neutronu.

### 5.1.3 Fotony

Fotony jsou kvanta elektromagnetického záření – jsou nositeli energie. Mají nulovou klidovou hmotnost a pohybují se rychlostí světla.

### 5.1.4 Charakteristická čísla

#### Protonové číslo: $Z$

Protonové číslo udává počet protonů v jádře atomu. Určuje místo v periodické soustavě prvků. Značí se velkým písmenem  $Z$  a zapisuje se vlevo dolů před značku prvku.

#### Nukleonové číslo: $A$

Nukleonové číslo udává počet všech nukleonů (počet protonů a neutronů) v atomovém jádře. Určuje hmotnost atomu. Značí se velkým písmenem  $A$  a zapisuje se vlevo nahoře před symbol prvku.

#### Neutronové číslo: $N$

Neutronové číslo udává celkový počet neutronů v atomovém jádře. Značí se velkým písmenem  $N$  a je možné jej vypočítat ze vztahu:  $N = A - Z$ .

### 5.1.5 Izotopy

Izotopy jsou soubory atomů jednoho prvku. Mají stejné  $Z$  (protonové číslo) a různé  $A$  (nukleonové číslo). Jednotlivé izotopy se obvykle liší svojí stabilitou.

### 5.1.6 Nuklidy

Nuklidy jsou soubory atomů se stejným  $Z$  (protonové číslo) a stejným  $A$  (nukleonové číslo).

### 5.1.7 Silové působení

Vzájemné působení mezi částicemi látky můžeme vysvětlit čtyřmi základními fyzikálními interakcemi – slabé, gravitační, elektromagnetické a silné. Velikosti silových účinků těchto základních interakcí se významně liší a jsou závislé na vzdálenosti a hmotnosti interagujících částic. Pro nás je podstatná silná interakce.



## Silné interakce / Silné jaderné síly a vazebná energie

Silné interakce drží protony a neutrony v jádře. Jsou to přitažlivé síly krátkého dosahu, ale na těchto vzdálenostech značně překonávají síly elektromagnetické.

Vazebná energie je definována jako práce, kterou je třeba vykonat k rozložení jádra na jednotlivé nukleony. Je závislá na počtu nukleonů v jádře. Hmotnost atomu je soustředěna do jeho jádra, mohlo by se tedy zdát, že když sečteme hmotnost všech protonů a neutronů (nukleonů), dostaneme hmotnost jádra. Ve skutečnosti tomu tak není, protože hmotnost jádra je o něco menší než součet hmotností všech nukleonů obsažených v jádře. Tento úbytek hmotnosti je přeměněn na energii v jádře, ta se označuje názvem vazebná energie.

Specifická vazebná energie určuje, jaká vazebná energie připadá na jeden nukleon v jádře. Můžeme říci, že je to energie, kterou je každý nukleon držen v jádře. Čím vyšší je vazebná energie, tím je jádro stabilnější.

Ze závislosti specifické vazebné energie vyplývají dva způsoby, jak je možné získat energii z jádra:

- Štěpením těžkých prvků
- Fúzí/syntézou lehkých prvků

## 5.2 Stabilita jader, radioaktivita

Jádra s velkou vazebnou energií obvykle nejeví tendenci k rozpadu nebo syntéze s jinými jádry. Atomy s těmito jádry označujeme jako stabilní.

Atomy, které nejsou stabilní, podléhají samovolné přeměně, tuto přeměna označujeme za radioaktivitu.

### 5.2.1 Radioaktivita

Radioaktivita je jev, kdy dochází k samovolné vnitřní přeměně atomových jader a je emitováno vysokoenergetické záření. Jádra, která podléhají tomuto jevu se nazývají radionuklidy. Látky a předměty obsahující radionuklidy se označují radioaktivní zářiče.

Dojde k volnění části vazebné energie jádra ve formě kinetické energie produktů rozpadu, tzn. emituje se vysokoenergetické ionizující záření. Dochází k následujícím jevům:

- k přeměně jader jednoho prvku na jádra jiného prvku
- k energetické deexcitaci hladin téhož jádra

## Radioaktivní přeměna a poločas přeměny

Radioaktivní přeměna je pravděpodobnostní jev. Lze stanovit pouze pravděpodobnost, s jakou se jádro rozpadne za jednotku času. Poločas rozpadu udává dobu, za kterou se přemění/rozpadne polovina původního počtu atomů.

### 5.2.2 Radioaktivní přeměny

#### Přeměna ALFA

U těžkých jader, za ty se považují jádra s více než 200 nukleony a více jak 90 protonů, je jádro tak velké, že celkové přitažlivé pole silných jaderných sil již nepůsobí dostatečně silně na okrajích jádra. Nukleony z okrajových částí vytvoří skupinu 2 protonů a 2 neutronů a opustí jádro jako částice  $\alpha$ .

#### Přeměna BETA

Při přeměně beta zůstává počet nukleonů v jádře stejný. Pokud je v jádře více protonů, vyrovná se stav přeměnou protonu na neutron. Pokud je v jádře více neutronů, přemění se neutron na proton. Pozorujeme přeměnu  $\beta^+$  u jader s přebytkem protonů a  $\beta^-$  u jader s přebytkem neutronů

#### Přeměna GAMA

Při přeměně  $\gamma$  nedochází ke změně vnitřní struktury jádra, mění se pouze jeho energetická hladina – je emitováno vysokoenergetické záření. Záření  $\gamma$  následuje po emisi jiného záření při vlastní jaderné přeměně. Většina radionuklidů jsou zářiče smíšené – buď  $\alpha + \gamma$  nebo  $\beta + \gamma$ .

#### Emise nukleonů

Pokud má jádro velký nadbytek jednoho druhu nukleonů, může dojít k samovolné přeměně – nukleonové emisi. V případě, že jádro má nadbytek protonů, bude emitován proton, jde tedy o protonovou emisi. Když má jádro nadbytek neutronů, bude emitován neutron, jde o neutronovou emisi.

## 5.3 Interakce částic s prostředím

### 5.3.1 Interakce těžkých nabitých částic

Těžké nabitě částice nesou elektrický náboj. Když těžká nabitá částice vnikne do látky, působí při průletu kolem atomů značnou elektrickou silou na elek-

trony. Tím je účinně vytrhává z atomových obalů. Částice se však v látce velmi rychle brzdí, takže její dolet je velmi malý.

### **Excitace**

Nabitá částice při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně interakcí s elektrony v atomech látky. Může dojít k vybuzení elektronu na vyšší energetickou hladinu – dojde k excitaci atomu. Excitovaný stav atomu není stálý – elektron se rychle vrací zpět na původní hladinu. Tomuto jehu se říká deexcitace. Rozdíl energií se vyzáří ve formě fotonu elektromagnetického záření.

### **Ionizace**

Pokud elektron obdrží dost energie na to, aby se zcela uvolnil z vazby k atomu, dochází k ionizaci atomu – je rozdělen na záporný elektron a kladný iont.

## **5.3.2 Interakce lehkých nabitých částic**

Když do látky vnikne lehká nabitá částice (elektron, či pozitron), při svém průletu kolem atomů působí elektrickými odpuzivými silami na elektrony. Tím je vyráží z atomového obalu a atomy tím ionizuje.

## **5.3.3 Interakce záření gama**

Fotony záření gama a X-záření nemají elektrický náboj, nemohou tedy ionizovat atomy. Foton je kvantem rychle kmitajícího elektrického a magnetického pole. Když se do těsné blízkosti tohoto kmitajícího pole dostane elektron, může obdržet elektromagnetickou energii. Pokud tento jev nastane, bude fotonem urychlen.

## **5.3.4 Interakce neutronového záření**

Neutrony jsou společně s protony vázány v jádrech silnou interakcí. Z jader se uvolňují jadernými reakcemi, vznikajícími např. při štěpení těžkých jader. Volné neutrony se spontánně rozpadají radioaktivitou  $\beta^-$  na protony, elektrony a antineutrino. Neutrony po vstupu do látky interagují téměř výhradně s atomovými jádry. Může dojít k pružnému rozptylu, nepružnému rozptylu, radiačnímu záchytu nebo štěpení.

## Radiační záchyt

Při radiačním záchytu je neutron jádrem pohlcen. Následně je emitováno záření gama, které pak vyvolává ionizaci. Jádro, které neutron pohltilo, je často radioaktivní a rozpadá se za vyzáření dalšího ionizujícího záření, nejčastěji  $\beta^-$  a  $\gamma$ .

## Štěpení

Ke štěpné jaderné reakci dochází když jsou těžká atomová jádra ostřelována neutrony. Neutron pronikne do jádra uranu a je absorbován. Jádro se pak většinou rozdělí na dva odštěpky a dva až tři neutrony. Odštěpky se od sebe velmi rychle vzdalují, jsou však brzděny nárazy o okolní atomová jádra a jejich pohybová energie se mění na energii tepelnou.

## 5.4 Detektory

Ionizující záření (IZ) je nutno detekovat detektorem IZ. Veškeré způsoby detekce jsou založeny na jednotlivých jevech interakce IZ s hmotou. Používají se detektory plynové, mezi ně patří ionizační komory a Geiger-Mullerovy detektory, scintilační detektory a polovodičové detektory.

## 5.5 Veličiny a jednotky

### 5.5.1 Absorbovaná dávka: D

Absorbovaná dávka je energie ionizujícího záření absorbovaná v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě. Jednotkou je joule na kilogram, pro který se používá název gray (Gy).

### 5.5.2 Dávkový příkon: DP

Dávkový příkon je poměr přírůstku dávky  $dD$  za čas  $dt$ . Jednotkou je Gy/s. Často se dávkový příkon vyjadřuje v mGy/h nebo v  $\mu$ Gy/h.

$$DP = dD/dt [Gy/s]$$

### 5.5.3 Ekvivalentní dávka: HT

Ekvivalentní dávka je jednou z veličin využívaných pro ochranu před ionizačním zářením. Je definována jako součin radiačního váhového faktoru  $w_R$

a střední absorbované dávky  $D$  v orgánu nebo tkáni pro ionizující záření. Jednotkou je Sv [sievert].

$$HT = wR.D [Sv]$$

## 5.6 Radiobiologické hledisko radiační ochrany

### 5.6.1 Stavba buňky

Buňka je základní stavební a funkční jednotka všech živých organismů. Je to nejmenší jednotka, schopná samostatné existence a reprodukce. Buňka obsahuje jádro. Důležitou složkou jaderné hmoty je chromatin, složený z DNA a bílkovin. Molekuly DNA jsou uspořádány do vláknitých útvarů, tzv. chromozomů. Jádro má dvě důležité funkce. Jednou z nich je funkce genetická, tzn. přenos genetické informace z mateřské buňky na buňku dceřinou tzv. replikací. Druhá funkce je metabolická – probíhají zde některé syntézy (DNA, RNA a další).

### 5.6.2 Interakce s živou hmotou

Proces působení ionizujícího záření na živou tkáň je velmi složitý. Probíhá v několika etapách, které se liší rychlostí. Primárně probíhá fyzikální proces (ionizace a excitace). Dále chemický proces charakterizovaný působením volných radikálů na DNA a biologický proces charakterizovaný molekulárními změnami v biologicky důležitých látkách. Tyto procesy mohou vést k funkčním změnám buňky. Působení ionizujícího záření na buňku může mít dva různé dopady – přímou smrt buňky nebo změnu v cytogenetické informaci buňky.

Velmi vysoké dávky záření (stovky Gy) mohou vést k bezprostřednímu usmrcení buňky v intervalu mezi dvěma buněčnými děleními.

Obvykle dochází k tzv. mitotické smrti buňky. Ta nastává v průběhu buněčného dělení. V důsledku ozáření může dojít k inhibici buněčného dělení. Poškození buňky se tedy neprojevívá okamžitě, ale až tím, že se buňka není schopna se dále dělit. Mitotická smrt buňky nastává i při menších dávkách (jednotky Gy). Při menších dávkách záření nedochází k usmrcení buňky ani k zástavě buněčného dělení. Vzniklé radikály mohou vyvolat změny v DNA a tím i změny v chromozomech nesoucích zakódované genetické informace. Tyto změny se pak při dělení mohou přenášet na další buněčné generace.

### 5.6.3 Následky po ozáření buněk

Buňka, která je zasažena určitou dávkou ionizujícího záření je věšnou schopná odstranit způsobené škody. Někdy však mohou být způsobeny změny trvalé. Tyto buňky se mohou po zotavení začít dělit jinak než původní, nebo se nedokáží dělit vůbec.

### 5.6.4 Účinky na lidský organismus

Ozáření buněk vede k množství škodlivých změn. Většina z nich může být organismem napravena, některé však mohou vést ke zničení buněk, mohou být trvalé nebo se mohou reprodukovat. Účinky ionizujícího záření dělíme na deterministické a stochastické.

#### Deterministické účinky

Deterministické účinky jsou tkáňové reakce, které nastávají při vysokých dávkách záření. Počet poškozených molekul je natolik vysoký, že organismus není schopen je zcela opravit. S rostoucí dávkou roste závažnost poškození. Řadí se mezi ně například akutní nemoc z ozáření, akutní a chronická dermatitida, poškození oční čočky nebo poškození fertility.

#### Stochastické účinky

Stochastické účinky se objevují při menších dávkách záření. Organismus většinu poškozených buněk úspěšně opraví svými reparačními mechanismy. Existuje však určitá pravděpodobnost, že některá poškození se opravit nepodaří a vyskytnou se pozdní trvalé následky genetického nebo somatického charakteru. Jde například o zhoubné nádory nebo genetické změny u potomstva

## 5.7 Způsoby ochrany před zevním ozářením

*Radiační ochrana je systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření osob a životního prostředí a omezení následků nehod.*

Standardními metodami ochrany před ionizujícím zářením jsou postupy, které vycházejí z fyzikálních zákonů. Jedná se o ochranu časem, vzdáleností a stíněním.

### 5.7.1 Ochrana časem

Dávka, kterou pracovník během činnosti obdrží, je dána součinem doby práce a dávkovým příkonem v daném prostředí. Zkrátíme-li dobu práce/pobytku v kontrolovaném pásmu, zmenšíme tím obdrženou dávku. Z toho vyplývá, že by měl být vždy minimální možný čas strávený při činnosti. Je podstatná organizace práce, trénink činnosti „na nečisto“, a snaha najít nová technická řešení.

### 5.7.2 Ochrana vzdáleností

Ionizující částice jsou z radionuklidových zdrojů emitovány izotropně, tj. šíří se všemi směry stejně. Proto je při zvětšení vzdálenosti od zdroje obdržena menší dávka záření. Při představě bodového zdroje a jednoduchých interakčních procesů dochází k poklesu přímo úměrně s druhou mocninou vzdálenosti. Zde je podstatný výběr ideální cesty při plnění činnosti.

### 5.7.3 Ochrana stíněním

Principem je, že mezi zdroj ionizujícího záření a pracovníky vložíme vrstvu, která část energie záření pohltí. Podle druhu záření určujeme materiál stínící vrstvy.

## 5.8 Cíl radiační ochrany

*Základním cílem radiační ochrany je vyloučit deterministické účinky a snížit pravděpodobnost vzniku stochastických účinků na společensky přijatelnou míru.*

Vyloučení deterministických účinků, znamená zabránění jejich vzniku. Aby bylo možné vyloučit deterministické účinky, používáme systém limitování.

Snížení pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků znamená zajištění takových osobních dávek, které zaručí pravděpodobnost úmrtí na stochastické účinky menší než pravděpodobnost úmrtí při běžném životě. Využíváme pro to princip limitování a princip optimalizace.

## 5.9 Systém limitování ozáření

Systém limitování slouží jako prostředek k dosažení cíle radiační ochrany z hlediska deterministických účinků. Limity jsou dány atomovým zákonem

263/2016 a vyhláškou č. 422/2016, Sb.

### **5.9.1 Základní pojmy**

#### **Expoziční situace**

Všechny v úvahu připadající okolnosti vedoucí k vystavení fyzické osoby nebo životního prostředí ionizujícímu záření.

#### **Plánovaná expoziční situace**

Plánované expoziční situace je spojena se záměrným využíváním zdroje ionizujícího záření.

#### **Nehodová expoziční situace**

Nehodová expoziční situace může nastat při plánované expoziční situaci nebo být vyvolána svévolným činem a vyžaduje přijetí okamžitých opatření k odvrácení nebo omezení důsledků.

#### **Kontrolované pásmo**

Kontrolované pásmo je prostor s kontrolovaným vstupem, v němž jsou zavedena zvláštní pravidla k zajištění radiační ochrany a předcházení šíření kontaminace. Je vymezeno všude, kde nelze vyloučit příkon dávkového ekvivalentu ze zevního ozáření v průměru vyšší než  $2,5 \mu\text{Sv/h}$ .

### **5.9.2 Omezení ozáření**

Každý, kdo vykonává činnost v rámci plánované expoziční situace, je povinen omezit ozáření své osoby tak, aby celkové ozáření způsobené kombinací ozáření z těchto činností bylo odůvodněné, optimalizované a nepřekračovalo v součtu limity ozáření.

Radiační pracovník, u kterého bylo zjištěno překročení limitů ozáření, musí být dočasně vyřazen z práce se zdrojem ionizujícího záření.

## **5.10 Optimalizace**

Optimalizace je stále se opakující proces. Je nutné vždy zohlednit nově vzniklé podmínky pro příslušnou expoziční situaci nebo nové možnosti zajištění radiační ochrany.



Každý, kdo provádí činnosti v rámci expozičních situací musí stanovit optimální variantu zajištění radiační ochrany. Výběr optimální varianty musí být proveden za účelem snížení plánovaných a potenciálních dávek fyzických osob.

## 5.11 Monitorování

Monitorování je měření a zaznamenávání parametrů charakterizujících pole ionizujícího záření a výskyt radionuklidů na pracovišti. Monitorování zahrnuje pracoviště, osoby, vypustě a okolí.

Program monitorování musí obsahovat pravidla monitorování pro běžný provoz pracoviště, předvídatelné odchylky od běžného provozu pracoviště, radiační nehodu a radiační havárii.

### 5.11.1 Osobní monitorování

Osobní monitorování musí být prováděno k určení osobních dávek radiačního pracovníka sledováním, měřením a hodnocením jeho zevního a vnitřního ozáření.

Osobní monitorování radiačního pracovníka se provádí osobním dozimetrem a výpočtem osobních dávek radiačního pracovníka z údajů o monitorování pracoviště, a sledování doby pobytu na pracovišti.

## 5.12 Systém vzdělávání

K zajištění kvalifikace pracovníka provádějícího procesy a činnosti musí být:

- stanoveny kvalifikační požadavky, včetně délky odborné praxe
- užíván systém teoretické přípravy a praktického výcviku pracovníků provádějících procesy a činnosti
- hodnocena účinnost systému teoretické přípravy a praktického výcviku pracovníků provádějících procesy a činnosti

Kvalifikace pracovníka provádějícího procesy a činnosti musí být před prvním zahájením procesu a činnosti a následně pravidelně nezávisle ověřována a trvale udržována.

### 5.13 Využití VR v JE

Pomocí VR se mohou expoziční dávky při přípravě zaměstnanců výrazně snížit. Činnosti lze několikrát opakovat, vyzkoušet případné kolize zařízení, nacvičit nejrychlejší a nejefektivnější způsob vykonání prací, vyzkoušet možnosti při simulaci havarijních stavů (požáru, zakouření prostoru, úniku radioaktivity). VR je zejména vhodná pro prostory běžně nepřístupné, nebo s velkou expoziční dávkou (možnost simulace pohybu pracovníka v prostoru a výpočet výše obdržené dávky).

# 6 Návrh aplikace

Tato kapitola se zabývá návrhem VR aplikace.

## 6.1 Cíl aplikace

Jak bylo výše uvedeno, mezi základní způsoby ochrany před ionizujícím zářením (IZ) patří ochrana časem a ochrana vzdáleností (viz 5.7). Dávka, kterou pracovník během činnosti obdrží, je dána součinem doby práce a dávkovým příkonem v daném prostředí. Zkrátíme-li dobu práce/pobytu v kontrolovaném pásmu, pak bude výsledná dávka menší. Je tedy v našem zájmu minimalizovat čas strávený vykonáváním činností v kontrolovaném pásmu. Z principu ochrany vzdáleností vyplývá, že výběr ideální cesty je taktéž velmi důležitý pro plnění dané činnosti. Zvětšením vzdálenosti od zdroje IZ se výrazně snižuje obdržená dávka záření.

Virtuální realita nám poskytuje možnost tréninku činností v kontrolovaném pásmu bez vystavení pracovníka ionizujícímu záření. Dává nám možnost činnosti opakovat a hledat nejrychlejší a nejefektivnější způsoby vykonávání.

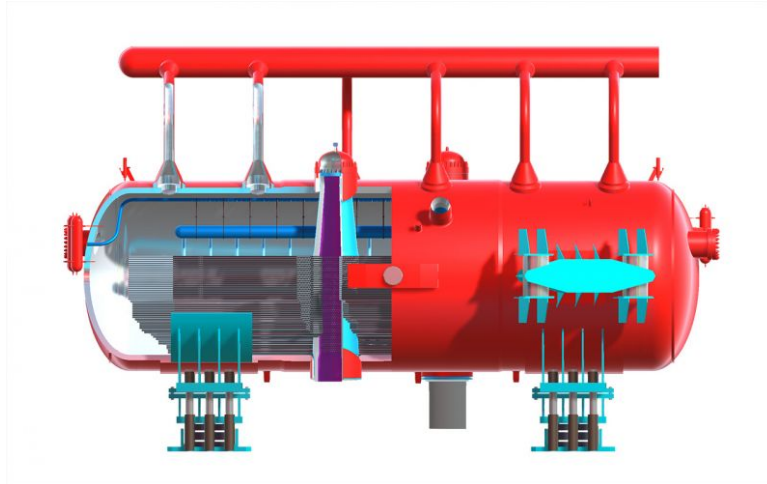
Cílem aplikace je nabídnout způsob optimalizace vykonávaných činností, omezení ozáření pracovníků jaderné elektrárny a naplánování činností tak, aby nebyly překročeny jejich limity ozáření. Aplikace také nabízí simulaci monitorování osobních dávek pracovníka pomocí osobního dozimetru. Poskytuje také způsob vzdělávání pracovníků – jejich praktický výcvik, ověřování a udržování jejich kvalifikace. V neposlední řadě je cílem simulovat nehodovou situaci a vykonávání úkonů při zhoršených podmínkách.

## 6.2 Scéna a modely

Bylo nutné vybrat vhodnou scénu, ve které bude možné předvedení množství nástrojů VR pro trénink personálu JE. Tedy scénu z kontrolovaného pásma, kde je možné vykonávat konkrétní úkony a pracovníci zde mohou benefitovat z možnosti tréninku mimo dosah škodlivého záření, vše z toho s ohledem na citlivé informace, které si JE Temelín nepřeje sdílet.

Pro práci byl vybrán model parogenerátoru JE Temelín a jeho okolí. Parogenerátor (parní generátor) (viz Obr. 6.1) je zařízení, které slouží k předávání tepla mezi jednotlivými okruhy jaderné elektrárny. Toto zařízení se používá zejména v některých druzích jaderných elektráren pro předávání

tepla z primárního okruhu s jaderným reaktorem do sekundárního okruhu s parní turbínou. Okolí obsahuje množství armatur, na kterých je představen koncept obchůzky.



Obrázek 6.1: Model horizontálního parogenerátoru pro reaktory typu VVER.  
Zdroj: <https://www.svetenergie.cz>

## 6.3 Pohyb po scéně

Základním problémem je způsob pohybu po scéně. Existuje několik způsobů, každý se svými výhodami a nevýhodami. Pro naši scénu byla vybrána metoda teleportace, z důvodů množství výhod, které nabízí, a které jsou popsány níže. Při našem výběru byl podstatný i komfort uživatele.

### 6.3.1 Chůze v reálném světě

Po scéně je samozřejmě možné se pohybovat chůzí v reálném světě, tato metoda však většinou sama o sobě nestačí. Použití této metody je možné možné jen u velmi malých scén, protože vyhrazené rozměry v reálném světě musí odpovídat rozměrům virtuálního prostředí. Výhodou je, že čas, za který je uražena určitá vzdálenost odpovídá času, za který by ji člověk překonal v reálném světě.

### 6.3.2 Teleportace

Teleportace dovoluje uživateli vybrat si místo v prostoru a přesunout se přímo na něj pomocí stisku tlačítka na ovladači. Přenos se může uskutečnit

okamžitě, či s malou prodlevou. Výhodou teleportace je jednoduchost použití, i nezkušený uživatel si tuto metodu obvykle osvojí po několika pokusech. Je také možné označit konkrétní oblasti, kam je možné se teleportovat, nebo nějaké prostory zakázat. Tento způsob pohybu je také příjemnější pro uživatele než možnosti využívající lineární pohyb, protože standartně nezpůsobuje kinetózu (tzn. nemoc z pohybu), která se projevuje závratí, vyčerpáním, či zvedáním žaludku.

Nevýhodou teleportace je, že čas, za který uživatel urazí danou vzdálenost nemusí odpovídat času, za kterou by ji urazil chůzí. Tento problém se dá částečně řešit omezením vzdálenosti, na kterou je možno se teleportovat. Za druhou nevýhodu se dá považovat složitější orientace v prostoru po teleportaci, hlavně pokud se uživatel nachází v prostoru jemu neznámém. Toto je ale možné kompenzovat nějakým druhem navigace.

### **6.3.3 Lineární pohyb**

Lineární pohyb znamená, že je uživatel plynule posouván vybraným směrem v prostoru při vykonávání nějaké akce. Touto akcí může být zmáčknutí a držení tlačítka, touchpadu nebo joysticku, kývavý pohyb rukou nebo hlavy.

Při využití této metody je jednodušší zařídit, aby si čas uražení nějaké vzdálenosti odpovídal ve skutečném a virtuálním prostředí. Je zde také eliminován problém orientace po „zmizení“ a „objevení“ se na jiném místě v prostoru. Velkou nevýhodou je, že tento způsob pohybu velmi často způsobuje kinetózu a s tím i výše zmíněné závratě, vyčerpání a zvedání žaludku. Tento efekt je možné zmírnit různými způsoby, jako je například tzv. tunelové vidění, kdy se při pohybu uživateli omezí periferní vidění. Je však velmi složité tento problém zcela eliminovat.

## **6.4 Interakce s objekty**

### **6.4.1 Fyzicky interaktivní objekty**

Mezi tyto objekty patří například zdi, podlahy, nebo schody. Jsou to objekty, které nemají žádnou speciální funkci. Jejich účelem je co nejlépe napodobit skutečné prostředí a zařídit, aby uživatel nepropadl podlahou, nebo se neteleportoval skrz stěnu. Je zde tedy nutné řešit, aby co nejlépe splňovali tuto funkci, ale zároveň neznemožňovali uživateli využívat výhod virtuální reality (např. dostat se na jinak těžko přístupná místa).

### 6.4.2 Speciální interaktivní objekty

Prvním typem speciálních objektů v naší scéně jsou objekty, které mohou být součástí nějaké obchůzky a od uživatele může být vyžadováno, aby je v rámci této obchůzky našel a interagoval s nimi.

Dalším typem speciálních objektů jsou zdroje vysokých dávek ionizujícího záření, se kterými uživatel interaguje pouze prostřednictvím načítání radiace na jeho osobním dozimetru. U obou typů objektů je nutné sledovat jejich vzdálenost od uživatele a reagovat na ni.

## 6.5 Měření radiační dávky

Jak již bylo zmíněno, ionizující částice jsou z radionuklidových zdrojů emitovány izotropně, tj. šíří se všemi směry stejně. Při zvětšení vzdálenosti od zdroje ionizujícího záření se snižuje obdržená dávka. Při představě bodového zdroje dochází k poklesu přímo úměrně s druhou mocninou vzdálenosti. Ve složitém prostředí s vysokým množstvím zdrojů IZ by však výpočet ekvivalentní dávky pracovníka byl velmi obtížný. Pokud by nezahrnoval by všechny vlivy, byl by i nepřesný. Z toho důvodu je lepší metodou využití skutečně naměřených hodnot místo toho, abychom dávku pracovníka vypočítali pomocí složitých rovnic. Ve scéně nebyly použity reálné hodnoty. Použité hodnoty mají pouze ilustrativní hodnotu. Mohly by však být velmi jednoduše vyměněny za opravdové hodnoty v případě použití aplikace v praxi.

Pro simulaci osobního měření pracovníka je uživatel vybaven osobním dozimetrem. Po diskusi s technických konzultantem byla zvolena pozice dozimetru u pravého ovladače z důvodu praktičnosti. Dozimetr ukazuje aktuální ekvivalentní dávku uživatele v mSv, stejně jako opravdové zařízení, a dávkový příkon v mSv/h. Dozimetr také reaguje na překročení limitu ekvivalentní dávky pracovníka, který je stanoven na 0,8 mSv, a to vizuálně i akusticky.

## 6.6 Obchůzka

Aplikace umožňuje uživateli simulaci obchůzky tak, jak by probíhala ve skutečnosti, ale bez rizika ionizujícího záření. Nejdůležitější cílem je dovolit pracovníkovi vyzkoušet si orientaci v prostoru a najít ideální cesty mezi po sobě jdoucími úkoly. Při skutečné obchůzce je pak prostředí pro pracovníka již známé a může činnost vykonávat efektivněji.

Obchůzka se skládá z úkolů, kde každý má své pořadí, popis a objekt ve scéně, ke kterému se vztahuje. Před startem obchůzky je nutné, aby si

uživatel mohl prohlédnout seznam úkolů. Po startu obchůzky se mu začne měřit čas, zobrazuje se mu aktuální úkol na příručním panelu a počet splněných z celkového počtu úkolů. Pozice příručního panelu byla zvolena u levého ovladače, aby si nepřekážela s dozimetrem, a panel je možné skrýt, aby nevadil při pohybu.

Když uživatel najde objekt, zadaný aktuálním úkolem, dotkne se ho ovladačem. Ve chvíli, kdy je ovladač dostatečně blízko, úkol je splněn, vypíše se hláška, která ohlásí úspěch a příruční panel se přepne na následující úkol. Byla zvažována možnost s vyplněním dialogu či provedení nějaké volby, ale vzhledem k podstatě úkolů, které byly poskytnuty, se toto řešení zdálo jako zbytečné. Kontinuální sledování vzdálenosti od objektu dovoluje případnou budoucí formu navigace – například výpis, jak daleko je uživatel od cílového objektu. Při splnění posledního úkolu se obchůzka ukončí. Následuje ukázka použitých úkolů.

- Zkontroluj otevření nebo otevři armaturu /1UJ41S07
- Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S84
- Nastav průtoky pomocí armatur /1TZ50S71

Některé vlastnosti obchůzky je možné nastavit. Je možné zapnout, či vypnout popisky jednotlivých armatur, tzn. objektů, které mohou být cíli úkolů. Dále je možné zapnout, či vypnout navigaci, která ukazuje, kde je hledaný objekt a pomáhá při orientaci v prostoru. Také je možné použít mód snížené viditelnosti, který simuluje obchůzku, kterou by bylo nutno vykonat v nestandardní situaci (zakouřeném prostředí).

## 6.7 Zvuky

Pro poskytnutí co nejrealističtějšího zážitku bylo rozhodnuto pro použití zvuků ve scéně. Jsou použity celkem dva zvuky, první z nich běží celou dobu na pozadí a jeho jedinou funkcí je, aby scéna působila realističtěji. Druhým použitým zvukem je alarm, který se spustí, když ekvivalentní dávka uživatele přesáhne zadaný limit.

## 6.8 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je v aplikacích virtuální reality standartně řešeno jako panel, který je umístěn volně v prostoru. Všechny volby uživatele ohledně možností obchůzky, její odstartování, či ukončení budou řešeny pomocí tlačítek na panelu s uživatelským rozhraním.

# 7 Implementace a testování aplikace

Vývoj aplikace probíhal v prostředí Unity 2019.2.13f a aplikace je určena pro zařízení Oculus Rift S

## 7.1 Využité SDK

Z knihoven pro vývoj VR aplikací byly vybrány Oculus Integration SDK a VRTK. Jedním z důvodů byla jejich vzájemná kompatibilita a jejich přímá podpora Oculus zařízení.

### 7.1.1 Oculus Integration SDK

Oculus Integration poskytuje podporu pro vývoj aplikací pro Oculus headsety v prostředí Unity. Knihovna poskytuje modely ovladačů a rukou a jejich animace.

### 7.1.2 VRTK

VRTK je kolekcí skriptů, které řeší základní problémy při vývoji VR aplikací. Patří k nim řešení pohybu ve scéně, interakce s předměty, interakce s uživatelským rozhraním a další. Byla vybrána verze VRTK v3. Tato verze byla preferována před VRTK v4 i přesto, že jde o starší verzi, z několika důvodů. VRTK v3 je obecně považována za intuitivnější a jednodušší na použití. Narozdíl od VRTK v4 obsahuje širokou dokumentaci s množstvím instruktážních videí včetně řady komunitních tutoriálů. VRTK v4 je bohužel mrtvý projekt, který byl ponechán nedodělaný.

## 7.2 Scéna a modely

### 7.2.1 Modely ve scéně

Pro práci byl vybrán model parogenerátoru JE Temelín a jeho okolí (viz Obr. 7.1). Všechny modely a materiály použité ve scéně byly poskytnuty Škoda JS a.s.



## 7.2.2 Fyzicky interaktivní objekty

Všechny objekty, které jsou určeny k chůzi a teleportaci obsahují Collider komponent. Collider je typ komponentu, který zajišťuje kolize objektu s jinými objekty.

## 7.2.3 Speciální interaktivní objekty

### Armatury

Armatury jsou objekty, které se využívají v úkolech obchůzky. Každý úkol se vztahuje k jedné konkrétní armatuře. Armatury obsahují Collider komponent a komponenty poskytované knihovnou VRTK, `VRTK_Interactable_Object` a `VRTK_Interactable_Object_Highlighter`. Tyto komponenty zajišťují, aby objekt reagoval na dotek ovladače, konkrétně, aby se při doteku barevně zvýraznil.

### Zdroje vysokých dávek radiace

Ve scéně je v tuto chvíli umístěn pouze jeden takovýto zdroj a tím je kaluž vody. Tato kaluž představuje nestandardní situaci, kdy vysoce radioaktivní voda uniká z potrubí.

Pro realistické vykreslení kaluže byl využit Shader s tzv. Specular Mode. Shader v Unity umožňuje uživateli specifikovat, jak se bude daný objekt vykreslovat, konkrétně určuje barvu každého pixelu. Specular mode dovoluje nastavit, jak se bude chovat odraz světla na objektu. Pro dosažení odrazu okolní scény v hladině byla využita tzv. Reflection Probe. Ta se chová jako kamera, která zachycuje sférický pohled okolí ve všech směrech. Výsledná data jsou uložena a mohou být poskytnuty objektu kaluže.

Aplikace je napsána způsobem, že dovoluje velmi jednoduše rozšířit množinu těchto objektů. Jak tento typ objektu ovlivňuje uživatele a jeho radiační dávku je popsáno dále.

## 7.2.4 Osvětlení

Ve scéně je umístěno několik zdrojů světla typu Point Light. Tento typ světla vyzařuje světlo stejnoměrně do všech směrů a standardně se používán pro simulaci lokálních zdrojů světla. Umístění světlených zdrojů bylo zvoleno po konzultaci s technickým pracovníkem, aby adekvátně napodobovalo opravdové prostředí jaderné elektrárny.

## 7.3 Pohyb po scéně

Pro pohyb po scéně byla zvolena metoda teleportu, konkrétně Height Adjust Teleport poskytovaný knihovnou VRTK.

Vzhledem k tomu, že čas, za který byla obchůzka uražena, je pro nás hodnotná informace, je v našem zájmu, aby čas, za který urazíme danou vzdálenost ve virtuálním prostředí co nejlépe odpovídal času, za kterou tuto vzdálenost urazíme v reálném světě. Po důkladném testování jak zkušeným, tak poměrně nezkušeným uživatelem virtuální reality, bylo jako řešení problému zvoleno omezení vzdálenosti teleportu na 5 m. Tato vzdálenost byla označena za ideální, protože neumožňuje teleportovat se příliš daleko, ale zároveň neomezuje uživatele.

Všechny dostupné povrchy mají na sobě komponenty typu Collider.

## 7.4 Měření radiační dávky

### 7.4.1 Radiační příkony

Jak bylo zmíněno výše, hodnoty radiačních příkonů máme uloženy v tabulkách, kde každá tabulka přísluší jednomu podlaží místnosti. Model využitý ve scéně má tři patra, po kterých se může uživatel pohybovat (mezipatra nejsou započítána), využíváme tedy tři tabulky. Každá tabulka má rozměry odpovídající rozměrům scény v metrech – tedy 27 x 27 metrů a odpovídajících 27 sloupců a 27 řádků tabulky.

Pro zjištění radiačního příkonu v daném okamžiku zjistíme polohu uživatele (konkrétně pravého ovladače, protože tam se nachází dozimetr) od bodu v prostoru, který reprezentuje pozici se souřadnicemi (0, 0, 0). Tento bod je vidět na obrázku 7.1) v levém horním rohu (barevná krychle se šipkami). Vzdálenost rozložíme na jednotlivé složky x, y, z a ty použijeme nejprve pro zjištění patra, ve kterém se nacházíme a poté pozici v příslušné tabulce.

Funkcionalita radiačního příkonu a ekvivalentní dávky uživatele se nachází ve skriptu RadiationCounter.cs.

### Zdroje vysokých dávek radiace

Samozřejmě je nutné vzít v potaz i speciální zdroje radiace, které simulují nestandardní situace. Kontinuálně se měří vzdálenost těchto zdrojů od osobního dozimetru uživatele. Ve chvíli, kdy se vzdálenost dostane pod danou mez, začnou se uživateli načítat vysoké dávky radiace. Nevyužívají se zde rovnice pro šíření záření v prostoru, výpočet je zjednodušen tak, že v



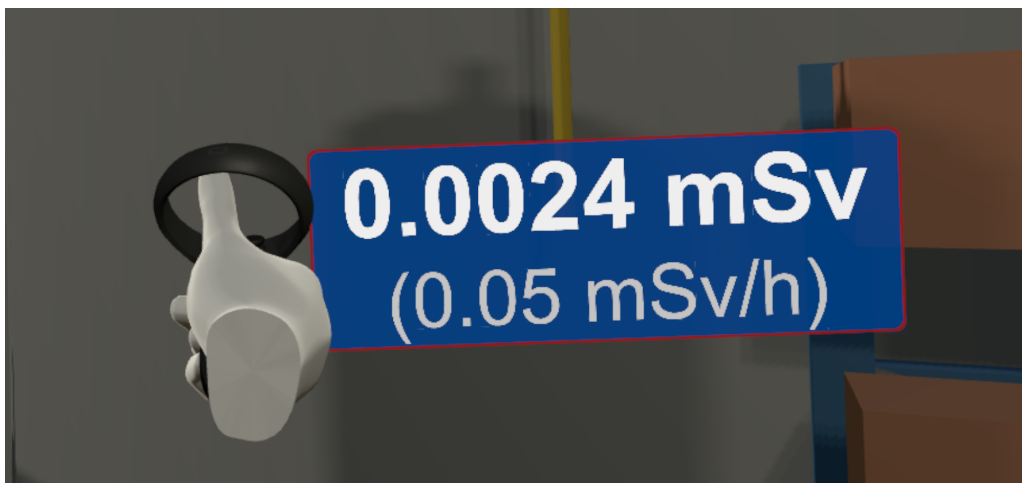
Obrázek 7.1: Scéna s modelem parogenerátoru a jeho okolím

bezprostřední vzdálenosti (menší než 1 m) uživatel obdrží celou hodnotu radiačního příkonu a v širším okruhu (do 2 m) obdrží polovinu. Hodnoty jsou stanoveny tak, aby uživatel během několika sekund překročil svůj limit ekvivalentní dávky.

#### 7.4.2 Ekvivalentní dávka

Osobní dozimetr zobrazuje aktuální radiační příkon působící na uživatele a aktuální ekvivalentní dávku, kterou nasbíral za čas. Každou sekundu se tyto hodnoty aktualizují. Dozimetr zobrazuje hodnoty mezi 0.0001 mSv až 9.9999 mSv. Menší hodnoty jsou zanedbatelné a k větším nikdy nemůže dojít

při správném užívání aplikace, jejich hodnoty nás tedy taktéž nezajímají. Dozimetr můžeme vidět na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Osobní dozimetr uživatele

### **Překročení limitu ekvivalentní dávky**

Ve chvíli, kdy dávka překročí nastavený limit na dozimetru, který je pro radiačního pracovníka 0.8 mSv, změní se hodnoty na dozimetru z bílé na červené (viz Obr. 7.3) a spustí se alarm. Alarm nebude přerušeno, dokud uživatel buď neopustí scénu, nebo nestiskne tlačítko Vynulovat měření radiační dávky, které nastaví hodnotu nasbírané ekvivalentní dávky na nulu. Toto tlačítko je samozřejmě naprosto fiktivní a skutečný dozimetr používaný na JE jej neobsahuje, dovoluje ale uživateli zkusit danou činnost znovu od začátku bez zbytečného opouštění scény.

## **7.5 Zvuky**

Scéna obsahuje dva zvukové klipy – ventilationSound.mp3 a emergencyAlarm.mp3. Oba klipy pocházejí ze stránky <https://www.zapsplat.com> a jejich licence dovoluje nekomerční využití zdarma s uvedením zdroje. Tyto zvuky jsou z důvodu jejich licence použity pouze pro bakalářskou práci.

Oba zvuky využívají komponent Audio Source. Oba zvuky jsou nastaveny na Loop, tzn. klip se po skončení začne znovu přehrávat. Spatial Blend je nastaven na 2D, protože pro nás je šíření zvuku v 3D prostoru zbytečné. Bylo zvoleno, že uslyšíme zvuky se stejnou hlasitostí všude po scéně.



Obrázek 7.3: Osobní dozimetr při překročení nastaveného limitu ekvivalentní dávky uživatele v blízkosti zdroje vysokých dávek radiace

## 7.6 Obchůzka

Při startu aplikace jsou nejprve načteny data obchůzky ze souboru. Data obchůzky obsahují seznam úkolů v následujícím tvaru.

```
Obchuzka1_9#  
1_1UJ41S07_Zkontroluj otevření nebo otevři /1UJ41S07#  
2_1Z50S85_Zkontroluj otevření nebo otevři /1TZ50S85#  
3_1TZ50S86_Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S86#  
4_1TZ50S82_Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S82#  
5_1TZ50S84_Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S84#  
6_1TZ50S71_Nastav průtoky pomocí armatur /1TZ50S71#  
7_1TZ50S21_Nastav průtoky pomocí armatur /1TZ50S21#  
8_1RY34S03_Nastav průtoky pomocí armatur /1RY34S03#  
9_1RY34S02_Nastav průtoky pomocí armatur /1RY34S02
```

První řádka značí jméno obchůzky a počet úkolů, ze kterých se skládá. Jednotlivé úkoly jsou od sebe odděleny znakem #.

Při startu obchůzky se začne počítat čas, který je zobrazen na panelu obchůzky a každou vteřinu se aktualizuje. Aktuální úkol se zobrazuje na příručním panelu uživatele. Úkol je označen za splněný, když se alespoň jeden z ovladačů dostane do dotykové vzdálenosti od cílového objektu. Po ukončení obchůzky je do souboru zapsán protokol. Obsahuje název obchůzky, seznam úkolů a čas, za který byla obchůzka provedena. Protokol může vypadat následovně:

06.05.2021 7:52:59

Obchuzka1 dokončena.

1. Zkontroluj otevření nebo otevři /1UJ41S07
2. Zkontroluj otevření nebo otevři /1TZ50S85
3. Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S86
4. Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S82
5. Zkontroluj odjištění armatur /1TZ50S84
6. Nastav průtoky pomocí armatur /1TZ50S71
7. Nastav průtoky pomocí armatur /1TZ50S21
8. Nastav průtoky pomocí armatur /1RY34S03
9. Nastav průtoky pomocí armatur /1RY34S02

Čas: 1:29

### 7.6.1 Možnosti obchůzky

Aplikace umožňuje nastavit několik možných vlastností obchůzky.

#### Zobrazení tooltipů

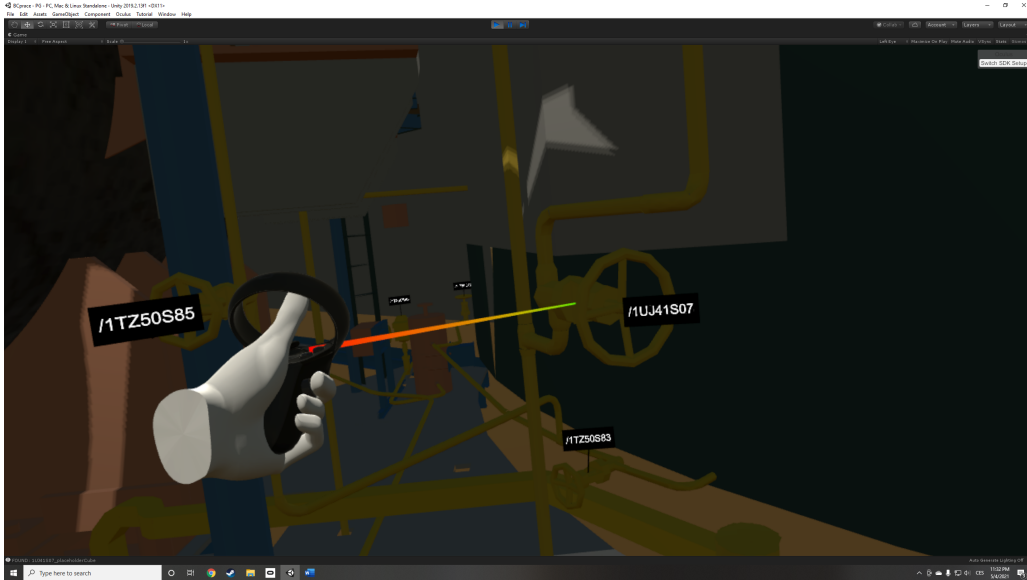
Tooltipy využívají komponentu `VRTK_Object_Tooltip` poskytovného knihovnou VRTK. Každá armatura má svůj vlastní tooltip (viz Obr. ??).



Obrázek 7.4: Tooltip armatury a navigace vedoucí k hledanému objektu

## Zobrazení navigace

Navigace (viz Obr. 7.5) využívá LineRenderer pro vykreslení přímky od ovladače k hledanému objektu. Jejím účelem není přímo dovést uživatele k objektu, ale pomoci mu se zorientovat v prostoru a navést ho správným směrem.



Obrázek 7.5: Navigace vedoucí k hledanému objektu

## Snížená viditelnost

Snížená viditelnost je implementována pomocí tzv. Fog (viz Obr. 7.6). Jde o prvek nastavení osvětlení, který Unity poskytuje.

## 7.7 Uživatelské rozhraní

Aplikace obsahuje několik panelů, které tvoří její uživatelské rozhraní. Využívají objektů Canvas, Canvas Scaler a Graphic Raycaster poskytnutých Unity a komponentu VRTK\_UI\_Canvas z knihovny VRTK. Tyto komponenty dohromady dovolují uživateli interagovat s rozhraním.

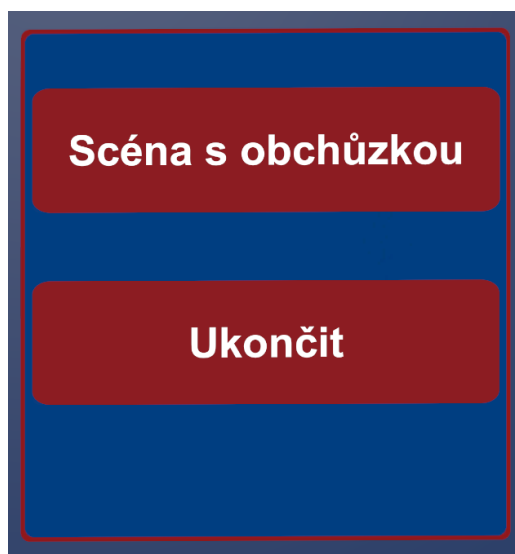
### 7.7.1 Hlavní menu

Scéna s hlavním menu obsahuje dva panely s uživatelským rozhraním. Panel s hlavním menu (viz Obr. 7.7) poskytuje uživateli možnost vstoupit do



Obrázek 7.6: Obchůzka při snížené viditelnosti

scény s obchůzkou a ukončit aplikaci. Druhý panel poskytuje nápovědu na používání aplikace (viz Obr. 7.8).



Obrázek 7.7: Hlavní menu

## 7.7.2 Uživatelské rozhraní ve scéně s obchůzkou

### Menu Panel

Hlavní panel scény (viz Obr. 7.9) poskytuje možnost zobrazit si detaily obchůzky kliknutím na tlačítko Obchůzka 1. Panel je připraven pro potenciální

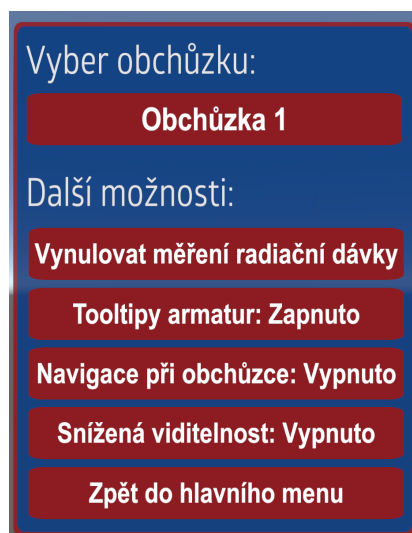




Obrázek 7.8: Hlavní menu – nápověda

budoucí rozšíření, kdy by mohly v jedné scéně být k dispozici dvě nebo více obchůzek.

Poskytuje také další možnosti obchůzky, které je možné vybírat bez omezení. Tlačítko Vynulovat měření radiační dávky nastaví dávku uživatele na dozimetru na nulu.

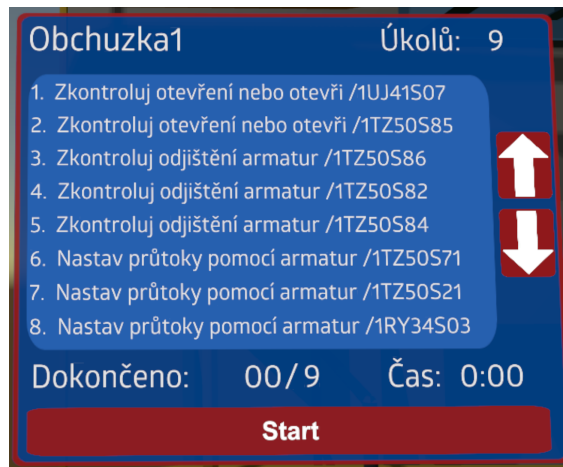


Obrázek 7.9: Menu panel s možnostmi obchůzky

## Panel obchůzky

Panel obchůzky (viz Obr. 7.10) zobrazuje jednotlivé úkoly obchůzky, jejich počet, počet již splněných a čas od spuštění obchůzky. Dovoluje úkoly lis-

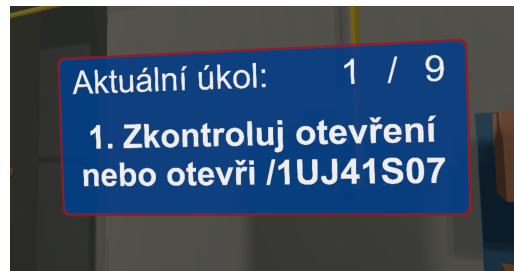
tovat. Kliknutím na tlačítko Start se zapne obchůzka a začne se zobrazovat uplynulý čas.



Obrázek 7.10: Panel obchůzky s vypsáním úkolů

### Příruční panel

Příruční panel (viz Obr. 7.11) má na sobě od počátku obchůzky vždy vypsáný aktuální úkol a jeho číslo, aby se uživatel nemusel vracet pro instrukce k panelu obchůzky. Při dokončení obchůzky vypíše hlášku Obchůzka dokončena.



Obrázek 7.11: Příruční panel s aktuálním úkolem

### Dozimetr

Osobní dozimetr (viz Obr. 7.2) zobrazuje aktuální radiační příkon působící na uživatele a aktuální ekvivalentní dávku, kterou nasbíral za čas.

## Headset Panel

Panel na headsetu upozorňuje uživatele na důležité události – odstartování obchůzky, splnění úkolu, ukončení obchůzky.

## 7.8 Testování

Předchozí verze aplikace byla vyzkoušena a otestována zástupci dozimetrie a provozního personálu JE Temelín. Na základě jejich zpětné vazby byly doplněny další funkcionality a upraveny funkcionality existující.

Aplikace obsahovala měření radiační dávky, aktuální dávka byla vypisována v  $\mu\text{Sv}$ , což neodpovídá skutečnému dozimetru. Výpis dávkového příkonu i ekvivalentní dávky byl tedy změněn tak, aby využíval  $\text{mSv}$ .

Byla doplněna funkcionalita limitu dávky uživatele a příslušná reakce na dosažení daného limitu.

Aplikace obsahovala tooltips armatur. Byla přidána funkce jejich zobrazení a skrytí. Dále byla implementována navigace pro usnadnění orientace v prostoru.

Byla přidána možnost snížené viditelnosti na žádost, aby bylo možné vyzkoušet pohyb ve scéně a případné vykonávání úkonů za zhoršených podmínek.

V dalším kole bude v brzké době vyzkoušena celá stávající funkcionalita.

## 8 Závěr

Aplikace byla vytvořena pro usnadnění tréninku personálu jaderné elektrárny s konkrétním zaměřením na pracoviště s rizikem ionizujícího záření. Aplikace umožňuje trénink činností radiačních pracovníků, aniž by byli ionizujícímu záření vystaveni. Nabízí způsob optimalizace prací a naplánování činností tak, aby nebyly překročeny limity ozáření pracovníků. Poskytuje také možnost simulovat nehodovou situaci a vykonávání úkonů při zhoršených podmínkách. Výsledná aplikace je určena pro zařízení Oculus Rift S.

V rámci bakalářské práce byla prostudována problematika vývoje aplikací pro virtuální realitu, zařízení virtuální reality a herní enginy. Práce se také věnovala problematice radiační ochrany a vlivu ionizujícího záření na lidský organismus.

Aplikace je periodicky testována zástupci personálu JE Temelín a upravována dle poskytnuté zpětné vazby. Práce plní základní funkcionalitu, která byla zadána a přináší několik rozšíření v podobě nastavení možností navigace při obchůzce.

Aplikace představuje obecné možnosti VR. Při požadavku JE Temelín je možné rozšířit aplikaci dle dodaných modelů a upřednostnit např. orientaci v prostoru nebo naopak sledování skutečně obdržené dávky při činnosti na konkrétním zařízení.

Další rozšíření by mohlo umožňovat koncovému uživateli vkládat vlastní obchůzky bez zásahu programátora, pokud se rozhodneme tímto směrem vydat. Rozšířením by bylo přidání animací, či náročnějších interakcí s objekty obchůzky.

# Literatura

- [1] *CryEngine. Licensing* [online]. Crytek GmbH. [cit. 2021/03/16].  
Dostupné z: <https://www.cryengine.com/support/view/licensing>.
- [2] *Frequently asked questions (FAQ)* [online]. Epic Games. [cit. 2021/03/16].  
Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US/faq>.
- [3] *HP Reverb G2* [online]. HP Development Company, L.P. [cit. 2021/03/21].  
Dostupné z: <https://www8.hp.com/us/en/vr/reverb-g2-vr-headset>.
- [4] *Oculus Device Specifications* [online]. Facebook Technologies, LLC.  
[cit. 2021/03/28]. Dostupné z:  
<https://developer.oculus.com/learn/oculus-device-specs>.
- [5] *VR Controllers And Accessories For An Immersive Experience* [online].  
2021. [cit. 2021/04/28]. Dostupné z: <https://www.softwaretestinghelp.com/vr-controllers-and-accessories>.
- [6] *Gear VR. Specifications* [online]. SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.  
[cit. 2021/03/21]. Dostupné z:  
<https://www.samsung.com/global/galaxy/gear-vr/specs>.
- [7] *Teslasuit. The Suit* [online]. VR Electronics Ltd. [cit. 2021/03/10].  
Dostupné z: <https://teslasuit.io/the-suit>.
- [8] *Unity's interface* [online]. Unity Technologies. [cit. 2021/02/10].  
Dostupné z: <https://docs.unity3d.com/Manual/UsingTheEditor.html>.
- [9] *Choose the plan that is right for you* [online]. Unity Technologies.  
[cit. 2021/03/16]. Dostupné z: <https://store.unity.com/compare-plans>.
- [10] *Valve Index. Headset* [online]. Valve. [cit. 2021/03/21]. Dostupné z:  
<https://www.valvesoftware.com/en/index/headset>.
- [11] *VIVE Systems* [online]. HTC Corporation. [cit. 2021/03/21]. Dostupné z:  
<https://www.vive.com/eu/product>.
- [12] *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky* [online]. ČEZ a.s., 2020.  
[cit. 2021/01/10]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2020/08/zoz\\_sluzbyx\\_20200209.pdf?fbclid=IwAR1gv3n5WYot04Pymy7G0JgYT4-2xLff0i8uUhrTf9ISfq0GqzCi-ddHpgAt](https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2020/08/zoz_sluzbyx_20200209.pdf?fbclid=IwAR1gv3n5WYot04Pymy7G0JgYT4-2xLff0i8uUhrTf9ISfq0GqzCi-ddHpgAt).

- [13] BARNARD, D. *History of VR - Timeline of Events and Tech Development* [online]. 2019. [cit. 2021/04/28]. Dostupné z: <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr?ref=footer>.
- [14] CHERDO, L. *Types of VR headsets – PC VR, standalone VR, and smartphone VR* [online]. 2018. [cit. 2021/04/16]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/guide/vr-ar/types-of-vr-headsets>.
- [15] LANGLEY, H. *Inside-out v Outside-in: How VR tracking works, and how it's going to change* [online]. 2017. [cit. 2021/01/28]. Dostupné z: <https://www.wareable.com/vr/inside-out-vs-outside-in-vr-tracking-343>.
- [16] MAZURYK, T. – GERVAUTZ, M. *Virtual Reality - History, Applications, Technology and Future*. 12 1999. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/2617390\\_Virtual\\_Reality\\_-\\_History\\_Applications\\_Technology\\_and\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/2617390_Virtual_Reality_-_History_Applications_Technology_and_Future).
- [17] SCHNIPPER, M. *Seeing is Believing: The State of Virtual Reality* [online]. [cit. 2021/04/14]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/a/virtual-reality>.
- [18] THOMPSON, S. *Motion Sickness in VR: Why it happens and how to minimise it* [online]. 2020. [cit. 2021/04/28]. Dostupné z: <https://virtualspeech.com/blog/motion-sickness-vr>.
- [19] VAN KREVELEN, R. *Augmented Reality: Technologies, Applications, and Limitations*. 04 2007. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/292150312\\_Augmented\\_Reality\\_Technologies\\_Applications\\_and\\_Limitations](https://www.researchgate.net/publication/292150312_Augmented_Reality_Technologies_Applications_and_Limitations).
- [20] WARD, J. *What is a Game Engine* [online]. 2008. [cit. 2021/01/03]. Dostupné z: [https://www.gamecareerguide.com/features/529/what\\_is\\_a\\_game\\_.php](https://www.gamecareerguide.com/features/529/what_is_a_game_.php).

# Seznam obrázků

2.1	Zařízení Sword of Damocles. Zdroj: <a href="https://www.researchgate.net">https://www.researchgate.net</a> .	9
2.2	Simulátor VCASS. Zdroj: <a href="https://science.nichd.nih.gov">https://science.nichd.nih.gov</a> . . . . .	9
2.3	Porovnání sensorů inside-out a outside-in. Zdroj: <a href="https://delight-vr.com/xr-glossary">https://delight-vr.com/xr-glossary</a> . . . . .	15
2.4	Haptické rukavice HaptX Gloves DK2. Zdroj: <a href="https://haptx.com">https://haptx.com</a> .	16
2.5	TeslaSuit. Haptický oblek pro VR. Zdroj: <a href="https://teslasuit.io">https://teslasuit.io</a> . . .	17
2.6	Vive Tracker. Zdroj: <a href="https://vr-expert.com">https://vr-expert.com</a> . . . . .	18
2.7	Sada Oculus Rift S. Zdroj: <a href="https://www.oculus.com">https://www.oculus.com</a> . . . . .	19
2.8	Sada HTC Vive. Zdroj: <a href="https://www.gpureport.cz">https://www.gpureport.cz</a> . . . . .	20
2.9	Sada Oculus Quest. Zdroj: <a href="https://www.oculus.com">https://www.oculus.com</a> . . . . .	20
2.10	Sada Valve Index. Zdroj: <a href="https://vrmag.cz">https://vrmag.cz</a> . . . . .	21
4.1	Uživatelské rozhraní herního engine Unity. Zdroj: <a href="https://docs.unity3d.com">https://docs.unity3d.com</a>	26
6.1	Model horizontálního parogenerátoru pro reaktory typu VVER. Zdroj: <a href="https://www.svetenergie.cz">https://www.svetenergie.cz</a> . . . . .	41
7.1	Scéna s modelem parogenerátoru a jeho okolím . . . . .	48
7.2	Osobní dozimetr uživatele . . . . .	49
7.3	Osobní dozimetr při překročení nastaveného limitu ekvivalentní dávkou uživatele v blízkosti zdroje vysokých dávek radiace . . . . .	50
7.4	Tooltip armatury a navigace vedoucí k hledanému objektu . . . . .	51
7.5	Navigace vedoucí k hledanému objektu . . . . .	52
7.6	Obchůzka při snížené viditelnosti . . . . .	53
7.7	Hlavní menui . . . . .	53
7.8	Hlavní menu – nápověda . . . . .	54
7.9	Menu panel s možnostmi obchůzky . . . . .	54
7.10	Panel obchůzky s vypsáním úkolů . . . . .	55
7.11	Příruční panel s aktuálním úkolem . . . . .	55