

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2021

**MICHAL
SEDLÁČEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sedláček** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **464828**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hodnocení radiační odolnosti elektronické části robotického manipulátoru

Název diplomové práce anglicky:

The radiation resistance of the robotic manipulator electronic part evaluation

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s manipulátorem a jeho možnostmi při experimentech v rámci ozařovacích experimentů
2. Provedte rešerši dostupných informací o problematice vlivu záření na elektronické prvky
3. Provedte rozbor konstrukce a rozbor použitých materiálů manipulátoru
4. Provedte posouzení konstrukčního řešení v závislosti na náchylnosti elektronických částí manipulátoru na ionizujícím záření
5. Navrhněte způsob teoretického ověření odolnosti manipulátoru a toto ověření proveďte
6. Navrhněte způsob provedení experimentálního ověření odolnosti manipulátoru
7. Navrhněte konstrukční úpravy případně úpravy elektronických součástek manipulátoru
8. Zhodnoťte přínosy úprav konstrukce pro provoz manipulátoru v prostředí JE

Seznam doporučené literatury:

- [1] Andrew Holmes-Seidle, Len Adams:
Handbook of radiation effects second edition
Oxford university press, 2007
ISBN: 9780198507338
- [2] C. Claeys, E. Simoen:
Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
ISBN: 3540433937
- [3] J. Jansa, J. Kanta, J. Švec:
Dálkově ovládaná robotická technologie pro vizuální zkoušení a 3D profilometrii ponořených zařízení – Technický popis a výrobní dokumentace
Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2020

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Prehradný, Ph.D., ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.06.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Praze dne:

.....

Michal Sedláček

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Prehradnému, Ph.D. za zajištění, vedení a pomoc při vypracování této diplomové práce. Rovněž děkuji Ing. Michalu Cihlářovi za konzultaci týkající se výpočetního kódu MCNP. Velké poděkování, a to i za podporu v průběhu celého studia, náleží také všem ostatním studentům oboru Jaderná energetická zařízení z mého ročníku.

Michal Sedláček

Anotační list

- Autor:* Bc. Michal Sedláček
- Název práce:* **Hodnocení radiační odolnosti elektronické části robotického manipulátoru**
- Title:* **The radiation resistance of the robotic manipulator electronic part evaluation**
- Akademický rok:* 2020/2021
- Ústav/Obor:* Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení
- Vedoucí práce:* Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
- Bibliografické údaje:* Počet stran: 77
Počet obrázků: 32
Počet tabulek: 11
Počet příloh: 0
- Klíčová slova:* záření, elektronika, manipulátor
- Key words:* radiation, electronics, manipulator
- Anotace:* Tato diplomová práce provádí rešerši dostupných publikací na téma vliv záření na elektronické prvky. Po seznámení se s konstrukcí modulárního manipulátoru je provedeno základní zhodnocení jeho radiační odolnosti. Poté je navrženo experimentální ověření radiační odolnosti manipulátoru, na které navazuje provedení teoretického ověření na základě předpokladů získaných v rešeršní části práce. V poslední části práce jsou poté navrženy úpravy manipulátor vedoucí ke zvýšení jeho radiační odolnosti. V závěru práce je vyjádřena potřeba provedení ověřujících experimentů.
- Abstract:* This diploma thesis does a research of available publications on electronic components. After learning the construction of a modular manipulator a basic evaluation of its radiation resistance is done. Subsequently, a proposal of an experimental evaluation of the radiation resistance of the manipulator is done followed by a theoretical evaluation based on premises made in the research part of the thesis. In the last part of the thesis changes in the design of the manipulator leading to a higher radiation resistance are proposed. In the conclusion of the thesis a need for a verifying experiment is expressed.

Obsah

Obsah	1
Seznam obrázků	4
Seznam tabulek	5
Seznam zkratk	6
Seznam jednotek a veličin	7
I Úvod.....	8
II Hodnocení radiační odolnosti manipulátoru	10
1 Mechanismy poškození.....	10
1.1 Gama záření	10
1.2 Neutrony	11
1.2.1 Vyrážení atomů z krystalické mříže.....	11
1.2.2 Neutronová transmutace	12
2 Vliv záření na polovodičové součástky.....	14
2.1 Indukovaná radioaktivita.....	14
2.2 Jednorázové jevy.....	14
2.3 Vlivy ionizující dávky.....	14
2.4 Vliv záření na MOS prvky	17
2.4.1 Posun prahového napětí	17
2.4.2 Zachycení náboje na rozhraní	18
2.4.3 Konkrétní příklady vlivu na MOS zařízení	18
2.4.4 Časová závislost poškození.....	19
2.4.5 Vzrůst prahového napětí po zotavení	20
2.5 Vliv záření na FGMOS prvky	20
2.5.1 Vliv ionizace	20
2.5.2 Vliv vyrážení atomů z krystalové mříže	22
2.5.3 Vliv neutronové transmutace	24
2.6 Vliv záření na FLASH paměti	24
2.7 Vliv záření na FRAM paměti.....	25
3 Zvyšování radiační odolnosti polovodičových součástek	26
3.1 Příprava a čištění materiálu.....	26
3.2 Výroba vrstvy oxidu.....	26
3.3 Teplotní úprava vrstvy oxidu	27
3.4 Gate elektroda	27
4 Modulární manipulátor ILJA	28
4.1 Významné elektronické součásti manipulátoru	30

4.1.1	Řídicí mikro počítač.....	30
4.1.2	Napájecí zdroje	34
4.1.3	Řadič motorů.....	36
4.1.4	Řadič LED	37
4.1.5	Periferie pro snímání analogových obvodů.....	38
4.1.6	Hlavní konektor.....	39
4.1.7	Konektory pro připojení příslušenství.....	39
4.1.8	Ostatní obvody	40
4.2	Konstrukce a použité materiály manipulátoru	40
4.2.1	Konstrukce a materiály skříně manipulátoru	40
4.2.2	Materiály elektronických částí manipulátoru.....	42
4.3	Možnosti manipulátoru v rámci ozařovacích experimentů.....	43
4.4	Posouzení náchylnosti k radiačnímu poškození.....	43
5	Návrh experimentálního ověření radiační odolnosti manipulátoru.....	45
5.1	Jaderný reaktor LVR-15.....	45
5.1.2	Experimentální vybavení jaderného reaktoru LVR-15	48
5.2	Gama ozařovna	49
5.3	Diskuse možností provedení experimentu	50
5.3.1	Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním.....	51
5.3.2	Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s on-line vyhodnocováním.....	52
5.3.4	Ozařování větších celků na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním	52
5.3.5	Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s off-line vyhodnocováním.....	52
5.3.5	Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s off-line vyhodnocováním.....	53
5.3.6	Ostatní kombinace.....	53
5.4	Vyhodnocení obdržených dávek	54
5.5	Návrh experimentu.....	54
6	Teoretické ověření radiační odolnosti robotického manipulátoru.....	56
6.1	Výpočet vlivu neutronové transmutace.....	56
6.1.1	Praktický příklad výpočtu	57
6.2	Numerický výpočet vlivu gama záření	58
6.2.1	Zjednodušený model manipulátoru.....	58
6.2.2	Nastavení výpočtu.....	64
6.2.3	Výsledky výpočtu	65
6.3	Vliv gama záření na smazání FLASH paměti řídicího počítače	66

6.4	Diskuse výsledků	67
6.4.1	Diskuse numerického výpočtu	67
6.4.2	Diskuse vlivu gama záření na FLASH paměť řídicího počítače	68
6.4.3	Diskuse vlivu neutronové transmutace	69
7	Návrhy úprav robotického manipulátoru vedoucí ke zvýšení radiační odolnosti a jejich zhodnocení	70
7.1	Konstrukční úpravy manipulátoru	70
7.2	Úpravy elektronických částí manipulátoru	70
III	Závěr	71
	Reference	75

Seznam obrázků

Obrázek 1: Znázornění podoby kaskádovitěho defektu. PVA (Primární Vyražený Atom) získal od vysokoenergetické částice energii 50 keV. [2]	12
Obrázek 2: Účinný průřez pro (n,γ) reakci na ³⁰ Si podle ENDF/B-VII.1 [3]	13
Obrázek 3: Znázornění záchytu děr v izolační vrstvě oxidu. [2]	16
Obrázek 4: Závislost počtu buněk na jejich prahovém napětí. [2]	21
Obrázek 5: Posun Gaussova rozdělení počtu buněk s klesajícím prahovým napětím [2]	22
Obrázek 6: Závislost počtu smazaných buněk na obdržené dávce [2]	22
Obrázek 7: Závislost počtu buněk na prahovém napětí před a po ozáření [2]	23
Obrázek 8: Závislost posuvu prahového napětí na intenzitě elektrického pole mezi CG a FG [2]	24
Obrázek 9: Vzhled modulárního manipulátoru [5]	29
Obrázek 10: Blokové schéma zapojení elektronických částí [6]	30
Obrázek 11: Horní strana řídicího mikropočítače BeagleBone	32
Obrázek 12: Dolní strana řídicího mikropočítače BeagleBone	33
Obrázek 13: Umístění řídicího mikropočítače v hlavní jednotce manipulátoru	34
Obrázek 14: Umístění zdroje v rámci hlavní jednotky manipulátoru	36
Obrázek 15: Schéma zapojení 3,3 V větve (vlevo) a 5 V větve (vpravo) [6]	36
Obrázek 16: Umístění řadiče motorů na základní desce [6]	37
Obrázek 17: Umístění řadiče LED na základní desce [6]	38
Obrázek 18: Zapojení analogových periferních obvodů na základní desce [6]	39
Obrázek 19: Rozmístění kontaktů hlavního konektoru [6]	39
Obrázek 20: Rozmístění kontaktů pro připojení příslušenství [6]	40
Obrázek 21: Boční pohled na skříň pohonné jednotky	41
Obrázek 22: Horní pohled na víko základní jednotky	42
Obrázek 23: Schéma jaderného reaktoru LVR-15 s řezem reaktorovou nádobou [12]	47
Obrázek 24: Vnitřní schéma vysokoaktivní kobaltové ozařovny	50
Obrázek 25: Vzhled zjednodušeného modelu skříně	59
Obrázek 26: Zjednodušený model základní desky	60
Obrázek 27: Základní deska ve skříni pohonné jednotky, pohled shora	61
Obrázek 28: Základní deska ve skříni pohonné jednotky, pohled z boku	61
Obrázek 29: Umístění desky řídicího počítače ve skříni, pohled shora	62
Obrázek 30: Umístění desky řídicího počítače ve skříni, pohled z boku	62
Obrázek 31: Rozmístění součástek na spodní straně desky řídicího počítače	63
Obrázek 32: Rozmístění součástek na horních stranách desek plošných spojů	64

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní vlastnosti počítače BeagleBone [7]	31
Tabulka 2: Vlastnosti zdroje SKM15-05 [8].....	35
Tabulka 3: Základní vlastnosti integrovaného obvodu DRV8432 [9]	37
Tabulka 4: Parametry radiče BCR450 [10].....	38
Tabulka 5: Typy a modely součástek použitelných v rámci experimentů	43
Tabulka 6: Základní technické parametry jaderného reaktoru LVR-15 [12].....	46
Tabulka 7: Možnosti ozařovacích experimentů	50
Tabulka 8: Parametry umístění elektronických součástek	63
Tabulka 9: Výpis všech buněk zjednodušeného modelu	64
Tabulka 10: Zbývající nastavení výpočtu	65
Tabulka 10: Výsledky výpočtu pomocí MCNP	66
Tabulka 11: Obdržené dávky na jednu částici, celkové deponované dávky a dávky deponované na jednu interakci.....	68

Seznam zkratek

AD	...Analogově-Digitální
CG	...Control Gate
CMOS	...Complementary Metal Oxide Semiconductor
FG	...Floating Gate
FGMOS	...Floating Gate Metal Oxide Semiconductor
FRAM	...Ferroelectric RAM
I2C	...Inter-Integrated Circuit
LED	...Light Emitting Diode
MOS	...Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	...MOS Field Effect Transistor
PVA	...Primární Vyražený Atom
RAM	...Random Access Memory
ŘP	...Řídicí Počítač
SEU	...Single Event Upset
SPI	...Serial Peripheral Interface
USB	...Universal Serial Bus

Seznam jednotek a veličin

A	...Ampér
B	...Byte
b	...Barn
C	...Elektrická kapacita
C	...Coulomb
°C	...Stupeň celsia
D	...Dávka
E	...Energie
eV	...Elektronvolt
f	...Farad
g	...Gram
Gy	...Gray
h	...Hodina
Hz	...Hertz
J	...Joule
m	...Metr
m	...Hmotnost
Mpx	...Megapixel
N	...Hustota jader
Q	...Elektrický náboj
Sv	...Sievert
t	...Čas
U	...Napětí
V	...Volt
W	...Watt
Ω	...Ohm
σ	...Mikroskopický účinný průřez
Σ	...Makroskopický účinný průřez
Φ	...Hustota toku neutronů

I Úvod

Ionizující záření je do určité míry naprosto normální a přirozenou součástí nejen lidských životů, ale také běžnou součástí prostředí, ve kterém jsou provozována nejrůznější technická zařízení. Stejně jako lidé jsou zvyklí s radiačním pozadím vést běžné životy, tak i technika je obvykle navrhována tak, aby byla schopná odolávat vlivům přirozeného radiačního pozadí až do konce trvání své životnosti. Ne všechna technická zařízení jsou však provozována v prostředí s dávkovými příkony na úrovni přirozeného radiačního pozadí. Pro taková prostředí, která zahrnují například oblast jaderné energetiky, různé radiodiagnostické vybavení nemocnic a lékařských ordinací nebo různé vesmírné aplikace, je však nutné techniku, která zahrnuje i elektronické části zmíněných zařízení, navrhnout tak, aby byla schopná odolávat dávkovým příkonům výrazně vyšším, než jsou ty vyskytující se v přirozeném prostředí.

Příkladem takového technického zařízení je robotický manipulátor, který slouží k vizuálním kontrolám a inspekcím míst a prostorů, které jsou člověku nepřístupné ať už z důvodu nedostatečných rozměrů nebo pro jejich nebezpečnost. Pro svůj původní účel, kterým je provádění výzkumných prací a nahrazení finančně i technicky náročnějších metod v Muzeu Karlovy Vary, je jeho radiační odolnost naprosto dostačující. Vývoj takového manipulátoru v Centru výzkumu Řež, s.r.o. však vedl i k jeho zamýšlenému použití pro inspekce a kontroly v oblasti jaderné energetiky, a to i v místech, kde se vyskytují dávkové příkony výrazně vyšší než ty, se kterými by se robotický manipulátor musel vypořádat během vykonávání muzejních průzkumů. Jelikož by radiační odolnost zejména elektronických součástí robotického manipulátoru nemusela být dostačující pro jeho provoz v takovém prostředí, je tak nutné provést zhodnocení jeho odolnosti vůči záření.

Způsoby, jakými lze ověřit míru radiační odolnosti elektronických částí robotického manipulátoru, jsou v podstatě pouze dva. V první řadě může být provedeno teoretické určení radiační odolnosti, které na základě učinění správných předpokladů bude mít za výsledek zejména verdikt o vhodnosti použití manipulátoru v prostředí jaderné elektrárny a jeho schopnosti odolávat obdrženým dávkám po požadovanou dobu, může ale také rozhodnout o maximální dávce, kterou je robotický manipulátor schopen obdržet bez ztráty funkčnosti či úplného zničení. Výsledkem teoretického zhodnocení radiační odolnosti elektronických částí manipulátoru může být však také i porovnání jednotlivých elektronických součástek z hlediska náchylnosti k radiačnímu poškození. Druhým způsobem ověření radiační odolnosti může být provedení ozařovacího experimentu, který může sloužit buď jako způsob ověření a upřesnění předpokladů učiněných a výsledků získaných v teoretickém ověření radiační odolnosti, tak jako samostatný způsob ověření radiační odolnosti bez předchozích odhadů.

Tato diplomová práce si tak dává za cíl provést teoretické zhodnocení radiační odolnosti elektronických částí robotického manipulátoru zejména na základě znalostí získaných v rešeršní části, které budou následně využity zejména pro formulování předpokladů pro různé analytické a numerické metody vedoucí k posouzení vhodnosti užití robotického manipulátoru v prostředí jaderné elektrárny. Mimo teoretické

ověření radiační odolnosti tato práce také provádí diskusi a návrh uskutečnění experimentálního ověření radiační odolnosti manipulátoru, k čemuž jsou využity zejména autorovy předchozí zkušenosti s ozařovacími experimenty týkající se elektronických zařízení. V závěru práce je také proveden krátký nástin možností zvýšení radiační odolnosti robotického manipulátoru.

II Hodnocení radiační odolnosti manipulátoru

1 Mechanismy poškození

Při průletu energetického fotonu nebo částice látkou v pevném skupenství může dojít k interakci několika různými způsoby. Energie, kterou prolétávající částice látce předá, není závislá pouze na hmotnosti částice a její kinetické energii, ale také na atomovém čísle a hmotnosti zasaženého materiálu. Energie, kterou terčový materiál obdrží, vztažená na jednotku hmotnosti se nazývá dávka a značí se písmenem D . Její jednotkou je 1 Gy s fyzikálním rozměrem J/kg. Dávku je tedy možné vyjádřit následujícím vztahem:

$$D = \frac{E}{m} \quad (1)$$

kde E je energie předaná z částice do terčového materiálu a m je hmotnost tohoto materiálu. [1]

1.1 Gama záření

Nejčastějším mechanismem poškození při interakci pevné látky s energetickým fotonem (myšleno gama a rentgenové záření) je ionizační poškození. K takovému poškození dochází třemi známými způsoby, jmenovitě se jedná o fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl a tvorbu elektron-pozitronového páru. Výsledkem všech těchto procesů je uvolnění nebo vznik elektronu, který se stává volným nosičem elektrického náboje, v materiálu elektronické součástky. Na jednu stranu je možné těchto jevů využít pro detekci ionizujícího záření polovodičovými detektory, na druhou stranu mají tyto jevy nesporný negativní vliv na uzavřenost PN nebo NP přechodů, které jsou základní strukturní částí veškeré elektroniky, a vytvářejí nežádoucí povrchové proudy. [1]

K fotoelektrickému jevu dochází zejména při energiích fotonu v nižší části spektra v řádu keV. Během tohoto jevu dochází k úplnému pohlcení interagujícího fotonu a následnému vyražení jednoho elektronu z valenční vrstvy elektronového obalu interagujícího atomu, čímž dochází ke vzniku páru volná elektron-díra. Vyražený elektron obdrží energii odpovídající rozdílu energie přilétávajícího fotonu a prahové energie potřebné pro toto vyražení. V případě čistého křemíku je prahová energie pro vyražení elektronu z valenční vrstvy 3,6 eV, zatímco pro oxid křemičitý SiO_2 se jedná o energie od 17 eV až po 18 eV. [1]

Během Comptonova rozptylu dochází k předání pouze části energie interagujícího fotonu. V případě, že množství předané energie je větší než prahová energie potřebná pro vyražení elektronu z valenční vrstvy, dochází, tak jako během fotoelektrického jevu, k tvorbě páru volný elektron-díra. Comptonův rozptyl probíhá zejména pro fotony středních energií. [1]

Aby mohlo k tvorbě elektron-pozitronového páru vůbec dojít, je nutné, aby interagující foton nacházející se v silném elektromagnetickém poli v blízkosti atomového jádra měl energii o hodnotě 1,022 MeV nebo vyšší. Hodnota 1,022 MeV

vychází ze součtu klidových energií fotonu a pozitronu, který je nutnou podmínkou k jejich úspěšnému vzniku. V případě, že interagující foton disponuje energií vyšší, než je zmíněných 1,022 MeV, je přebytek energie rozdělen mezi vzniklý foton a pozitron v podobě kinetické energie. Pozitron, jakožto částice antihmoty, po ztrátě obdržené kinetické energie anihiluje s elektronem látky, což je doprovázeno vyzářením dvou fotonů s energií 511 keV, což je klidová energie elektronu nebo pozitronu. Tyto fotony mohou látku buď opustit, nebo v ní dále interagovat fotoelektrickým jevem nebo Comptonovým rozptylem. Není již nadále možné, aby interagovaly za tvorby elektron-pozitronového páru, jelikož nedosahují potřebné prahové energie 1,022 MeV. [1]

1.2 Neutrony

Elektronické prvky jsou působením neutronového záření poškozovány zejména v důsledku vyražení atomů z krystalické mřížky a neutronové transmutace.

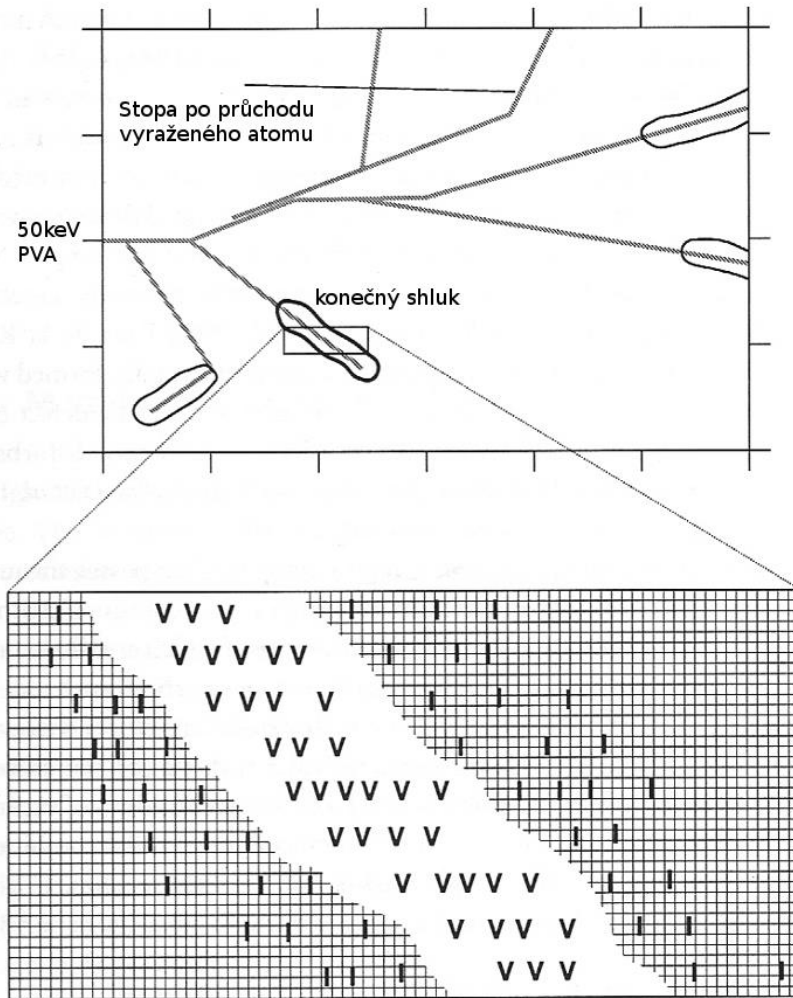
1.2.1 Vyražení atomů z krystalické mřížky

V případě, že má částice dostatečně vysokou energii, aby energie předaná atomu během pružných a nepružných srážek byla dostatečná pro vyražení terčového atomu z krystalové mřížky, dochází ke vzniku vakance a intersticiálního atomu. Pár vakance-intersticiál je nazýván Frenkelův pár, který je bodovým defektem. Příkladem částice s dostatečně vysokou energií může být rychlý neutron vzniklý ze štěpení v jaderném reaktoru. Při pokojové teplotě disponují intersticiální atomy velkou pohyblivostí a mají tedy schopnost změnit svoji polohu o relativně velké vzdálenosti. Intersticiální atomy mohou být z materiálu odstraněny například rekombinací v substrátu, nebo je možné, aby byly zachyceny nečistotami v materiálu. Příkladem takových nečistot jsou látky, kterými se křemík dopuje, aby byl přetvořen v křemík s vodivostí typu N nebo P. [1]

V momentě, kdy se vakance potká s další vakancí, začne docházet k jejich vzájemnému ovlivňování, čímž dojde ke vzniku multivakance. Multivakance, které se skládají ze 100 nebo více vakancí, je možné spatřit elektronovým mikroskopem jako díry. Chování dvou bodových vakancí vedle sebe neboli divakance je velmi důkladně popsáno a může mít vliv na zbytkové proudy v elektronických polovodičových součástkách. Je uvažována i možnost existence multivakancí a multiintersticiálů vyšších řádů, ty je ale velmi obtížné detekovat. [1]

Jestliže prolétávající částice předá vyraženému atomu dostatečně velkou energii, může takový vyražený atom způsobit vyražení dalšího atomu a tím způsobit kaskádovitý jev. Dopadem jedné jediné částice tak vzniká více než jedna vakance a jeden intersticiální atom. Poškození polovodičových součástek kaskádovitým jevem má na jejich vlastnosti mnohem větší vliv než poškození samotnými bodovými defekty. Míra poškození, kterou tyto jevy způsobí, roste přímo úměrně s energií, kterou do materiálu předá dopadající částice. [1]

Princip kaskádovitého jevu je znázorněn na Obrázku 1.

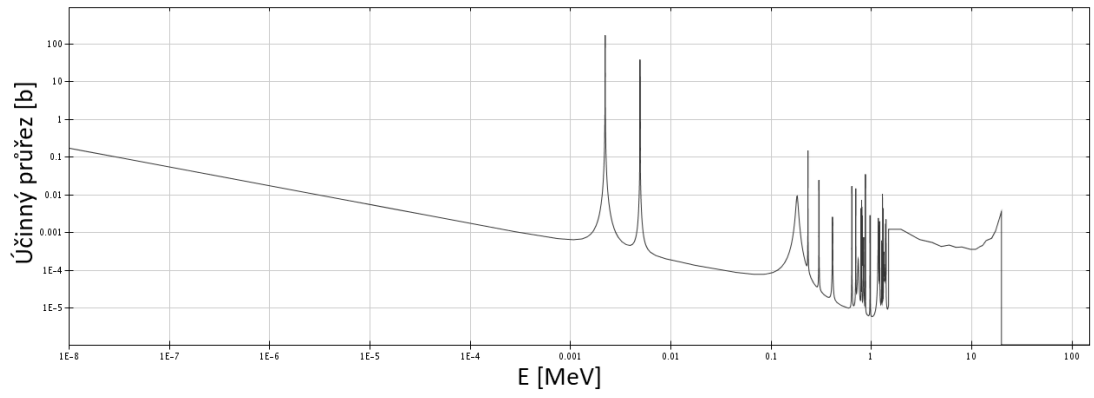


Obrázek 1: Znázornění podoby kaskádovitého defektu. PVA (Primární Vyražený Atom) získal od vysokoenergetické částice energií 50 keV. [2]

1.2.2 Neutronová transmutace

Jádro ^{30}Si , který je z 3,08 % součástí přírodního křemíku, se absorpcí neutronu změní na jádro ^{31}Si . Z radioaktivního izotopu ^{31}Si se beta mínus přeměnou s poločasem rozpadu 2,62 h stává ^{31}P . Fosfor vznikající v křemíku není pouhou nečistotou, nýbrž dotující látkou. Fosfor je běžně využíván k dotování křemíku pro získání N vodivosti. Pokud by tedy byla polovodičová součástka po dostatečně dlouhou dobu vystavena neutronovému záření, může dojít ke vzniku takového množství fosforu, že dojde ke změně vodivosti z typu P na typ N, což způsobí zničení funkčnosti polovodičové součástky. O neutronové transmutaci se ale nedá tvrdit, že by byla jevem pouze negativním. Průmyslový postup výroby N vodivého křemíku totiž využívá právě ozařování čistého křemíku v jaderných reaktorech. [1]

Z Obrázku 2 je patrné, že s klesající energií neutronu roste účinný průřez pro absorpci tohoto neutronu na jádře ^{30}Si . V jaderných reaktorech, ve kterých jsou vysoké toky tepelných neutronů, tak bude k tomuto jevu docházet s vyšší intenzitou.



Obrázek 2: Účinný průřez pro (n,γ) reakci na ^{30}Si podle ENDF/B-VII.1 [3]

2 Vliv záření na polovodičové součástky

2.1 Indukovaná radioaktivita

Pokud je stabilní atomové jádro vystaveno proudu energetických částic, kterými jsou například protony, neutrony nebo jiná jádra, může být přeměněno na radioaktivní jádro. Principem této přeměny je změna počtu nukleonů v daném jádře, k čemuž může dojít buď jejich odstraněním z jádra, nebo záchytem prolétávající energetické částice. Z většiny takto vzniklých radioaktivních se následně stává jádro s beta plus přeměnou, kterou obvykle doprovází vyzáření fotonu gama. Z menší části jader se stávají jádra s beta minus přeměnou. Energie produktů těchto přeměn se obvykle pohybuje v rozmezí 0,01 MeV až 10 MeV. [1]

2.2 Jednorázové jevy

Během interakce ionizujícího záření a polovodičové součástky může dojít k jednorázovým jevům, mezi které patří SEU (Single Event Upset) a zablokování prvku.

V případě SEU se jedná o změnu stavu bistabilního obvodu způsobenou interakcí právě jedné energetické částice, nebo jako důsledek vlivu produktů jaderných reakcí způsobených energetickým protonem. Aby mohlo k SEU dojít, musí mít interagující částice dostatečně vysokou energii, aby byl v PN přechodu indukován proudový impuls takový, aby vznikl náboj, který překročí hladinu potřebnou k převrácení stavu polovodičového prvku. Převrácením stavu dochází buď k zapsání dat do prázdné buňky, nebo k vymazání zapsaných dat z vyplněné buňky. Poškození způsobené jevem SEU je vratné a pouhé opětovné naprogramování elektronického prvku je postačující k jeho nápravě. Jak bipolární tranzistory, tak technologie MOSFET jsou postiženy jevem SEU. [1]

Měkké zablokování, které může posloužit jako příklad zablokování elektronického prvku, je stav, kdy součástka ztratí schopnost odpovídat na kontrolní signály. Název měkké byl zvolen z toho důvodu, že k jeho vyřešení stačí pouze odpojit a následně opět připojit napájecí napětí. Ačkoliv se předpokládá, že by tento jev mohl být způsoben jevem SEU ve vnitřním uzlu elektronického prvku, přesné důvody vzniku blokujícího jevu nejsou známy. [1]

2.3 Vlivy ionizující dávky

Energii, kterou interagující částice předá, je možné rozdělit na dvě složky. První z těchto složek je energie, která nezpůsobuje ionizaci. Tato složka je menší než ta složka energie, která ionizaci způsobuje. Ionizací je v tomto případě myšleno generování párů elektron-díra. Důsledkem vzniku takového páru je přechod valenčních elektronů do vodivostního pásu, kde se mohou působením elektrického pole stát velmi pohyblivými. Kterákoliv pevná látka, dokonce i izolanty, se tímto jevem stává dočasně vodivější, než je pro ni běžné před ionizací. Díry nesoucí kladný elektrický náboj, které při ionizaci také vznikají, se podobně jako elektrony také stávají pohyblivými, ale v jiné míře než elektrony. Zachycením vzniklých děr v oxidech může dojít k poškození MOS a bipolárních součástek. [1]

Energie, kterou je potřeba dodat pro tvorbu jednoho páru elektron-díra je poměrně nízká, v oxidu křemičitém se jedná jen o 18 eV. Kvůli takto nízké potřebné energii a faktu, že atomům není předávána prakticky žádná hybnost, nehraje energie interagujícího záření tak velkou roli, jako například v případě vyražení atomů z krystalické mříže. Je samozřejmé, že záření s vyšší energií způsobí tvorbu vyššího počtu párů elektron-díra, ale je možné dosáhnout vytvoření stejného počtu páru užitím záření s nižší energií ale o vyšší intenzitě. [1]

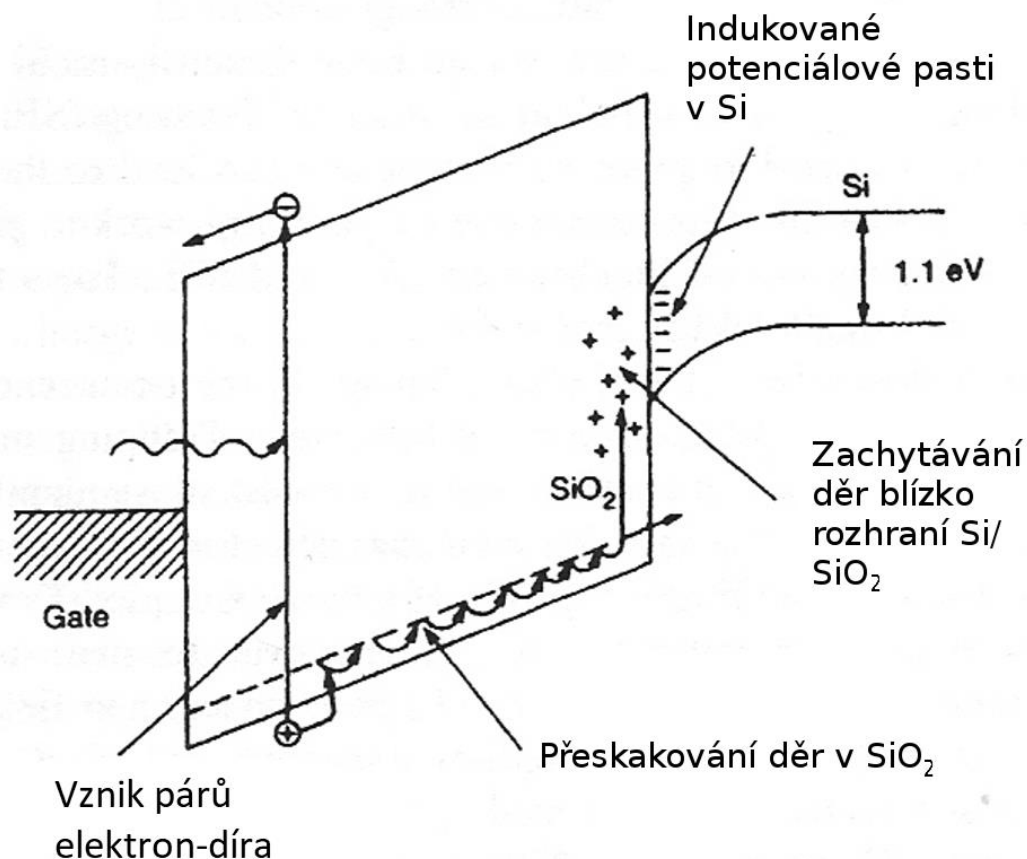
Na oxid křemičitý, který je používán jako materiál pro izolační vrstvy, působí záření těmito třemi následujícími vlivy

- Dochází k dočasnému snížení izolačních schopností těchto vrstev
- Dochází k pevnému zachytávání náboje a následnému vzniku semi-permanentních elektrických polí, které mají vliv na vodivost vrstev citlivých na elektrický náboj okolo nich
- Dochází k rozbití nestabilních vazeb, které se ve významné míře mohou vyskytovat například na rozhraní izolant-polovodič

Jedny z nejvýznamnějších vlivů ionizující dávky v polovodičových prvcích jsou zejména druhý a třetí zmíněný jev. [1]

V případě poškození v záchytem náboje se obvykle jedná o lokalizovanou, bodovou oblast, kde bývají běžně zachyceny elektrony i díry. Existuje možnost, aby takové zachycené náboje byly vráceny nazpět do vodivostního pásu. V izolantech je ale k takovému jevu potřeba dodat relativně vysokou energii. Energetický rozdíl mezi valenčním a vodivostním pásem pro oxid křemičitý je přibližně 9 eV a díry leží dalších 2,5 eV nad vodivostním pásem. Existuje velmi malá pravděpodobnost, že by v této pozici došlo k uvolnění děr pomocí tepelných procesů. V méně hlubokých pastech ale může docházet k náhodnému pohybu děr v oxidu. Takto zachycené náboje zůstávají v tomto stavu i několik desítek let. [1]

Záchyt děr v izolační vrstvě je znázorněn na Obrázku 3.



Obrázek 3: Znázornění záchytu děr v izolační vrstvě oxidu. [2]

Oxidaci křemíku na oxid křemičitý je možné provádět směsí kyslíku a vodní páry, čímž je možno kontrolovaně vyrobit amorfni oxid křemičitý. Takto vyrobení oxid křemičitý je až na část v blízkosti rozhraní izolant-polovodič prakticky čistý a disponuje elektrickými vlastnostmi podobnými křemennému sklu. V oblasti blízké rozhraní izolant-polovodič nedochází pouze ke snižování čistoty, ale také k záchytu náboje. V případě, že jsou díry zachyceny v oblasti okolo rozhraní izolant-polovodič, může dojít k jejich anihilaci s elektrony z křemíku. Nutnou podmínkou pro tento jev je vzdálenost mezi dírami a elektrony dostatečně malá, aby mohlo dojít k tunelovému jevu. Tímto dochází ke vzniku elektrického pole v blízkém okolí rozhraní izolant-polovodič. Na úrovni atomů dochází k výměně nábojů mezi izolantem a polovodičem s relativně vysokou rychlostí, ale s rostoucí vzdáleností se tato rychlost snižuje. [1]

Aby bylo možné správně odhadnout celkovou ionizující dávku, je nutné zvažovat několik faktorů. Prvním je rozdíl mezi částí energie, jež byla využita k ionizaci hmoty a tou, jež byla využita pro vyrážení atomů z krystalické mřížky. Dále je potřeba uvažovat rozdíly mezi způsoby přenosu energie z částic nesoucích elektrický náboj a těch bez náboje. Částice nesoucí elektrický náboj interagují s elektronovým obalem atomového jádra a díky tomu je možné jejich interakce dobře popsat a vypočítat lineární přenos energie. Nenabitě částice ale interagují mnohem více způsoby a k popisu jejich interakcí se nejlépe hodí využít statistických metod. Nejčastěji nenabitě částice interagují pružným a nepružným rozptylem. Jejich lineární

přenos energie je možné převést na dávku vztaženou na hustotu toku daných částic. K určení celkové ionizující dávky z předané energie jsou poté využity faktory odpovídající jednotlivým typům částic. [1]

2.4 Vliv záření na MOS prvky

Fotoproudy v hradlech Source a Drain jsou spolu s ionizací, která byla popsána v předchozích odstavcích, jedním z nejčastějších mechanismů radičního poškození polovodičových součástek typu MOS. [1]

Důsledkem radičního poškození v součástkách typu MOS je postupná ztráta funkčnosti, jež může vést až k úplnému selhání prvku. Existují čtyři druhy postupné ztráty funkčnosti. V prvním druhu se snižuje odolnost vůči šumu a dochází k pomalejšímu přepínání prvku. Druhý druh zahrnuje prudký vzrůst klidových proudů. V případě třetího druhu se přepínací rychlost sníží výrazněji než v prvním druhu. Ve čtvrtém druhu nastává selhání takové, že logický stav prvku zůstává stejný a není možné jej změnit. Polovodičové součástky mohou být náchylné k jednomu ze zmíněných druhů poškození, rozhodujícím faktorem o náchylnosti k jednomu z druhů poškození je jejich návrh a konstrukce. Selhání funkčnosti polovodičové součástky není běžně zapříčiněno selháním jediného prvku, ale poškozením několika částí, které společně nedokážou poškození vydržet. [1]

2.4.1 Posun prahového napětí

Ozářením součástek typu MOS dochází k posunu jejich prahového napětí. Ke zjištění prahového napětí MOS součástky se využívá metoda měření procházejícího proudu, který je závislý na napětí přiloženém na hradlo Gate. Výsledkem takového měření je volt-ampérová charakteristika daného prvku. K posunu prahového napětí dochází v důsledku záchytu náboje v izolační vrstvě oxidu křemičitého nebo v rozhraní izolant-polovodič. [1]

Posun prahového napětí má jiný vliv na MOS tranzistory s P vodivým kanálem a s N vodivým kanálem. V případě N vodivého kanálu je ke zvýšení vodivosti kanálu nutné přivést kladné napětí. Když v izolační vrstvě dojde k zachycení děr, dojde tím i k nárustu kladného náboje v této vrstvě. Záchytem kladného náboje v izolační vrstvě dochází ke zvyšování vodivosti N kanálu a k poklesu prahového napětí potřebného pro zajištění vodivosti N kanálu. Záchyt kladného náboje v izolační vrstvě může pokračovat tak dlouho, dokud nedojde ke snížení prahového napětí pod nulu, čímž by došlo ke zprůchodnění N vodivého kanálu, kterým by probíhal zbytkový proud i bez napětí na hradle Gate. Ke snížení vodivosti by se tak muselo přivést záporné napětí. [1]

MOS tranzistory s P vodivým kanálem naopak pro zvýšení vodivosti P kanálu potřebují na hradlo Gate přivést napětí záporné. Záchytem děr, tedy kladného náboje, pak dochází k přesně opačné změně vodivosti než v případě N kanálu, tedy k jejímu snížení. Dochází tak k nárustu prahového napětí. V tomto případě může záchyt kladného náboje pokračovat tak dlouho, dokud nedojde ke vzrůstu prahového napětí tak vysoko, že postiženou elektronickou součástku nebude možné ovládat pomocí konvenčních prostředků. [1]

2.4.2 Zachycení náboje na rozhraní

Provoz velkého množství zařízení typu CMOS je negativně ovlivněn zachycením náboje na rozhraní izolant-polovodič. Konkrétním příkladem takového negativního ovlivnění je třeba otočení stavu zařízení. Pokud navíc dochází k anihilaci části náboje zachyceného v izolační vrstvě, tak dochází k nezanedbatelnému posunu prahového napětí dané součástky. [1]

Záchyt náboje v na rozhraní izolant-polovodič způsobuje zejména snížení vodivosti, zkreslení volt-ampérové charakteristiky, posun prahového napětí a jeho pomalou časovou změnu. Posun prahového napětí je významnějším jevem v tranzistorech s N vodivým kanálem a jeho časová změna má daleko větší vliv na funkčnost analogových obvodů než na funkčnost logických obvodů. [1]

Projevem zachyceného náboje v rozhraní izolant-polovodič bývá nestabilita volt-ampérové charakteristiky, nebo jejich chování jako pevný náboj. Použitím moderních výrobních postupů při fabrikaci polovodičových součástek je však možné vliv podobných jevů snížit tak významně, že nemusí mít téměř žádný vliv na běžný provoz prvku. Kombinací excitace v oxidu způsobenou radiací a použití různých druhů napětí ovšem dochází k rozbíjení většího množství vazeb, čímž je usnadněno vytváření nových stavů v rozhraní, které jsou odlišné od stavů továrních. Příčinou tohoto je malé množství vodíku, které zůstává v izolační vrstvě i po jejím vzniku. [1]

2.4.3 Konkrétní příklady vlivu na MOS zařízení

Hlavním následkem posunu prahového napětí pod nulu v CMOS součástkách je růst klidového proudu. Tento problém je možné vyřešit použitím CMOS invertoru jako rozdělovače napětí, čímž dojde k posunu prahového napětí zpět do kladných hodnot. Na jednu stranu tím sice dojde ke zvýšení napětí přiváděného na poškozený tranzistor, ale na druhou stranu se tak sníží napětí na jednom z přiléhajících tranzistorů. Dochází tím také ke snížené odolnosti vůči šumu. [1]

Oxid křemičitý není pro své izolační schopnosti používán pouze jako izolační vrstva oddělující Gate elektrodu, ale i k odizolování téměř všech dalších částí tranzistoru, výjimkou jsou pouze pozice, které musí zůstat vodivé a nejsou tak úmyslně odizolovány. Vrstvy, které oddělují zbývající části tranzistoru, než je vrstva oddělující Gate elektrodu, dosahují větších tlouštěk. V případě, že dojde k zachycení náboje v těchto pozicích, hlavně v blízkosti elektrod Source a Drain, může dojít ke zúžení vodivého kanálu, a nakonec až k logickému selhání prvku. Reakcí a ochranou proti tomuto efektu je zvýšení stupně dotování křemíku v okolí blízkém izolačním vrstvám. Ani to ovšem nemusí být dostatečné, hlavně v případech, kdy dochází k velkým posunům prahového napětí. S nárůstem náboje zachyceného v izolantech dochází i k nárůstu šumu. [1]

Vliv stavů na rozhraní izolant-polovodič způsobuje zkreslení volt-ampérové charakteristiky tranzistoru. Pro tranzistor s N vodivým kanálem to znamená zejména snížení posunu prahového napětí. Zvýšená tvorba stavů na tomto rozhraní může mít za důsledek až takové zvýšení prahového napětí, že bude vyšší, než byla jeho hodnota před ozářením. Toto má za důsledek nižší přepínací rychlost CMOS součástky. [1]

V N vodivém kanálu jsou majoritním nosičem náboje elektrony, zatímco v P vodivém kanálu se jedná o díry. K přenosu náboje v součástkách typu MOS dochází právě přenosem majoritního nosiče náboje. Tento přenos není ovlivněn jevem vyražení atomů z krystalické mříže, dokud obdržená dávka nedosáhne přibližně 10 kGy. Pro obdržené dávky nižší než 10 kGy se majoritně projevují vlivy ionizující dávky. Efekt vyražení atomů z krystalové mříže je tak potřeba uvažovat až v případě polovodičových součástek, které budou po delší dobu vystaveny silnému gama záření nebo záření vznikajícímu v jaderném reaktoru. Čidla používaná v jaderné energetice mohou být vystavena toku rychlých neutronů až 10^{16} na cm^2 za sekundu. Takové toky již budou mít významný vliv na hustotu nosičů náboje, což povede ke změně charakteristiky tranzistoru. [1]

2.4.4 Časová závislost poškození

Existuje možnost odstranit zachycený náboj metodou vyžhání. Pokud by došlo k zahřátí zařízení na teplotu 200 °C nebo vyšší, dojde i k odstranění veškerého zachyceného náboje. Rychlost odstraňování zachyceného náboje je při tak vysokých teplotách relativně vysoká. Cyklus ozáření a žhání je možné provádět opakovaně, jelikož tím není významně ovlivněna funkčnost zařízení. Ačkoliv bylo v předchozích kapitolách zmíněno, že není možné odstranění náboje využitím tepelných procesů, v tomto případě je předpokládáno, že k jeho odstranění je výsledkem přesunu elektronů, jakožto nosičů náboje, do rozhraní izolant-polovodič. [1]

Při teplotách nižších než těch, jež byly zmíněny v předchozím odstavci, tedy například při teplotách pokojových, se míra zotavování ozářených součástek snižuje. Byly také pozorovány případy, kdy k zotavování tranzistorů s P vodivým kanálem docházelo pomaleji než v případě tranzistorů s N vodivým kanálem. Toto bylo pozorováno u součástek s izolační vrstvou oxidu křemičitého s tloušťkou 60 nm až 10 nm. Po několika dnech bylo v tranzistorech s N vodivým kanálem pozorováno zotavení 10 % a více. V určitém zlomku pozorovaných součástek došlo i k nárůstu prahového napětí na hodnotu vyšší, než byla hodnota tovární před ozářením. V případě tranzistorů s P vodivým kanálem pak naopak nezačalo docházet k okamžitému zotavování, ale jejich poškození dále rostlo stejně jako prahové napětí. Důvodem těchto nárůstů je tvorba nových stavů rozhraní izolant-polovodič. [1]

Ozářením MOS tranzistorů při velmi nízkých teplotách v nich dochází k větším posunům prahového napětí, než kdyby byly ozářeny za teplot blízkých pokojovým. Děje se tak, jelikož za pokojových teplot disponují vzniklé díry mnohem vyšší schopností migrovat směrem k rozhraní izolant-polovodič, kde dochází k jejich záchytu nebo k rekombinaci, zatímco při velmi nízkých teplotách jsou zachyceny tam, kde dojde k jejich vzniku, dříve, než stihnou změnit svoji pozici. Poškození ozářením při nízkých teplotách je tak větší než při pokojových teplotách. Pokud dojde k ohřátí součástky ozářené při nízké teplotě na pokojovou teplotu, dochází pak k uvolňování náboje v míře odpovídající pokojové teplotě. Pokud díry vzniknou okolo blízko teploty -100 °C, bude docházet k posunu prahového napětí po dobu přibližně jednoho roku. Pro díry vzniklé při teplotě -130 °C se tato doba prodlouží na 10 let. Při teplotě varu kapalného dusíku, tedy přibližně -196 °C, se v krátkodobém i dlouhodobém horizontu prahové napětí měnit nepřestane. [1]

2.4.5 Vzdut prahového napětí po zotavení

Náboje zachycené v izolační vrstvě tranzistorů s N vodivým kanálem mají na prahové napětí jiný vliv než v případě zachycení na rozhraní izolant-polovodič. Uvolnění náboje zachyceného v izolační vrstvě při pokojové teplotě zvyšuje pravděpodobnost nárustu prahového napětí na hodnotu vyšší, než byla hodnota tovární. Zařízení, která úspěšně absolvovala ozařovací zkoušky, tak mohou selhat i výrazně delší dobu po ozařování. [1]

2.5 Vliv záření na FGMOS prvky

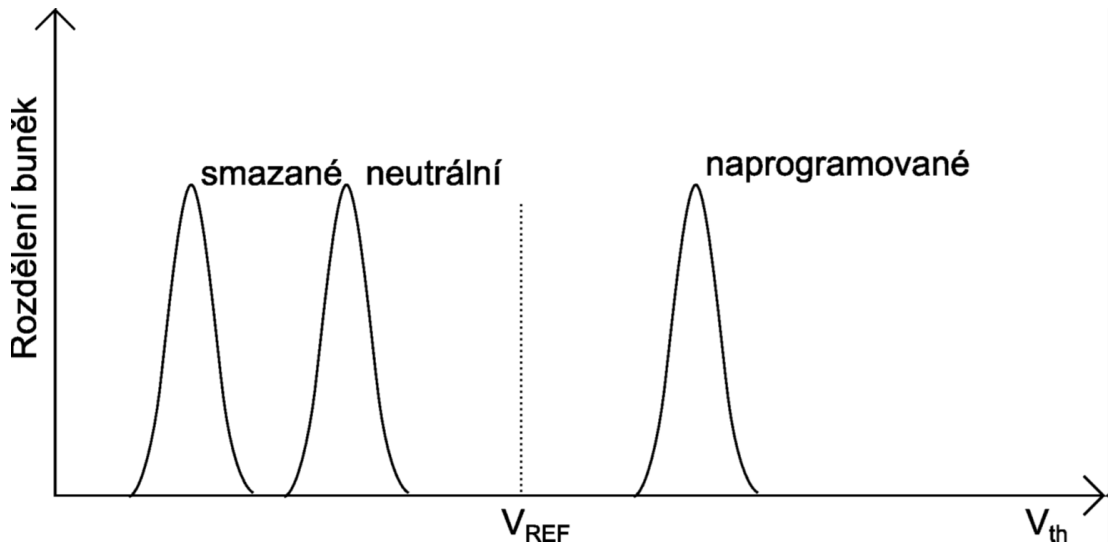
Tranzistory typu FGMOS jsou nejmenším strukturním prvkem téměř všech typů elektronických pamětí. Tyto různé typy jsou odlišné zejména rozdílným uspořádáním buněk a jinými způsoby přístupu k nim. Výzkum vlivu záření na elektronické paměťové prvky tak lze zjednodušit na výzkum vlivu záření na tranzistory typu FGMOS. [1]

2.5.1 Vliv ionizace

Elektronické paměťové součástky se obvykle skládají z vysokého počtu jednotlivých FGMOS tranzistorů, jejichž počty mohou dosahovat několika milionů, přičemž se jednotlivé buňky od sebe mohou lišit konkrétní hodnotou jejich prahového napětí. Rozdíly hodnot prahového napětí jednotlivých buněk jsou malé. Pro jejich popis je vhodné využít například Gaussova rozdělení. [1]

V závislosti na náboji, který je uložený ve Floating Gate, se mohou FGMOS tranzistory nacházet ve třech stavech. Tranzistor se může nacházet buď v naprogramovaném stavu, kdy je na FG zachycen záporný náboj, tranzistor má logickou hodnotu 0 a v buňce jsou zapsaná data. V případě logické hodnoty 1 se tranzistor může nacházet buď v neutrálním stavu, kdy náboj zachycený na FG je roven nule, nebo ve smazaném stavu, kdy je uložený náboj záporný. V těchto dvou případech v buňce uložená data nejsou. [1]

Obrázek 4 zobrazuje Gaussovo rozdělení prahových napětí velkého počtu buněk. Jako V_{REF} je označeno referenční napětí přivedené na Control Gate, které nejčastěji nabývá nulové hodnoty.

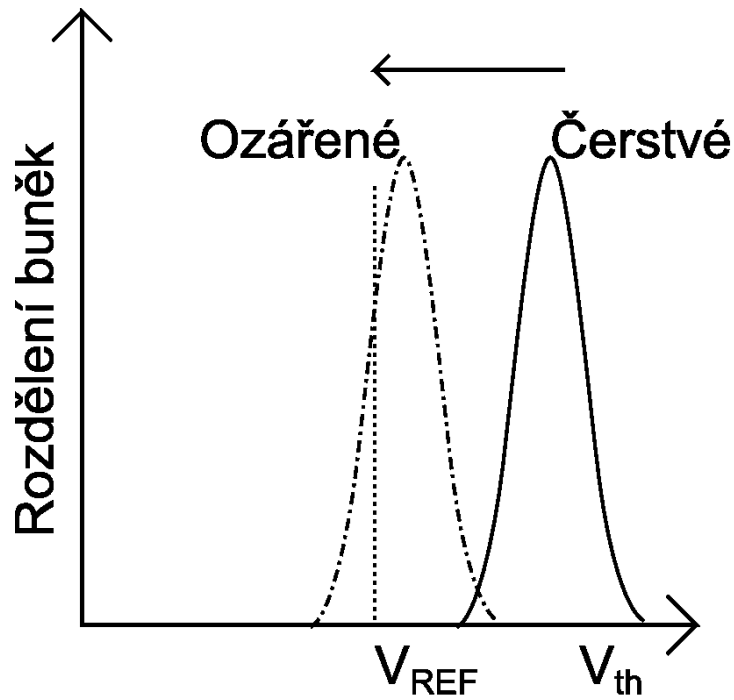


Obrázek 4: Závislost počtu buněk na jejich prahovém napětí. [2]

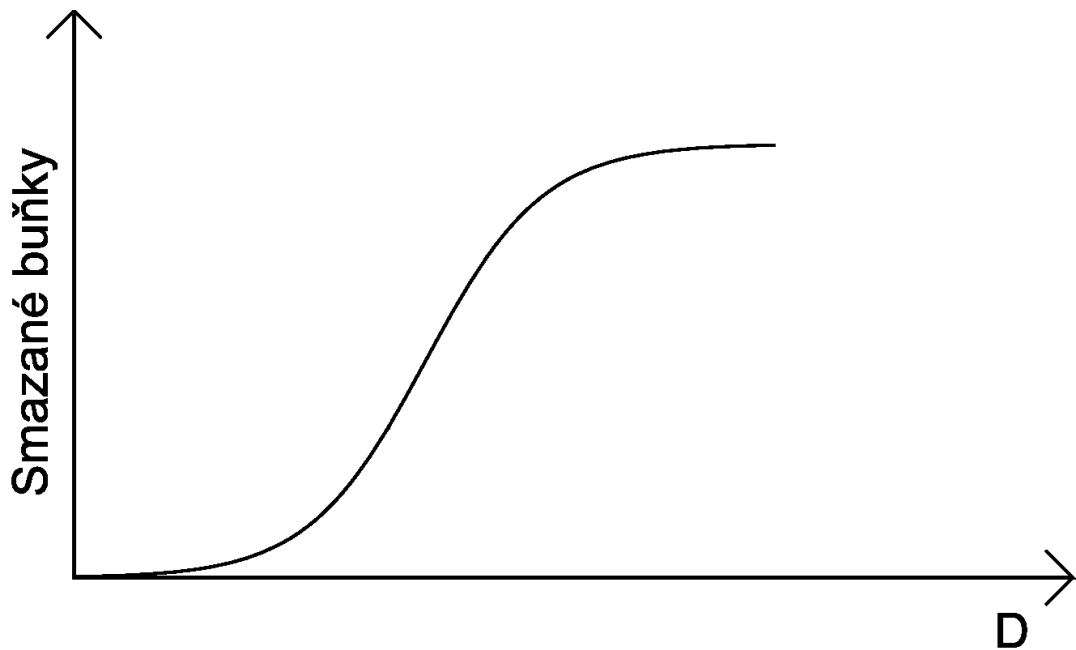
Na náboj uložený v FG má ionizace vliv takový, že dochází k jeho postupné ztrátě. Existují tři mechanismy, jak k takové ztrátě může dojít. Prvním mechanismem je injekce náboje přímo do FG, kde následně dochází k anihilaci s nábojem uloženým, druhým mechanismem je přímé vyražení elektronů z FG a třetím mechanismem je záchyt děr v izolační vrstvě oxidu křemičitého mezi FG, CG a substrátem. [1]

Jak postupně dochází k vybíjení náboje z FG, snižuje se prahové napětí postižené buňky, dokud není dosaženo hodnoty referenčního napětí. Jakmile je referenčního napětí dosaženo, dochází ke změně logického stavu tranzistoru z 0 na 1 a ten již nadále není naprogramovaný ale neutrální. Čím vyšší je dávka, kterou tranzistor obdrží, tím blíže se buňka dostane k neutrálnímu stavu a s tím spojené ztrátě uložených dat. V případě buněk ve smazaném stavu není nutné tento jev uvažovat, jelikož odstraněním náboje nedochází ke změně jejich logického stavu. [1]

Pokud by bylo využito předpokladu, že se vlivem ozáření posouvá prahové napětí všech buněk o stejnou hodnotu, dojde k posunu Gaussova rozložení prahového napětí doleva rovnoměrným způsobem. Tento posun je vyobrazen na Obrázku 5. Ztráta uložených dat začíná nejprve pomalu, ale s postupným přiblížením vrcholu Gaussova rozložení k hodnotě referenčního napětí dochází k postupnému zvyšování rychlosti ztráty dat, dokud se vrchol nedostane pod hodnotu referenčního napětí a rychlost ztráty dat se nezačne opět snižovat stejným trendem, jakým docházelo k jejímu zvyšování. Na Obrázku 6 je tak znázorněna závislost počtu buněk na obdržené dávce. [1]



Obrázek 5: Posun Gaussova rozdělení počtu buněk s klesajícím prahovým napětím [2]



Obrázek 6: Závislost počtu smazaných buněk na obdržené dávce [2]

Ionizací nedochází k trvalému poškození a ztrátě dat, pokud buňka neobdržela příliš vysokou dávku. Je tak možné preprogramování a opětovný zápis dat. [1]

2.5.2 Vliv vyrážení atomů z krystalové mříže

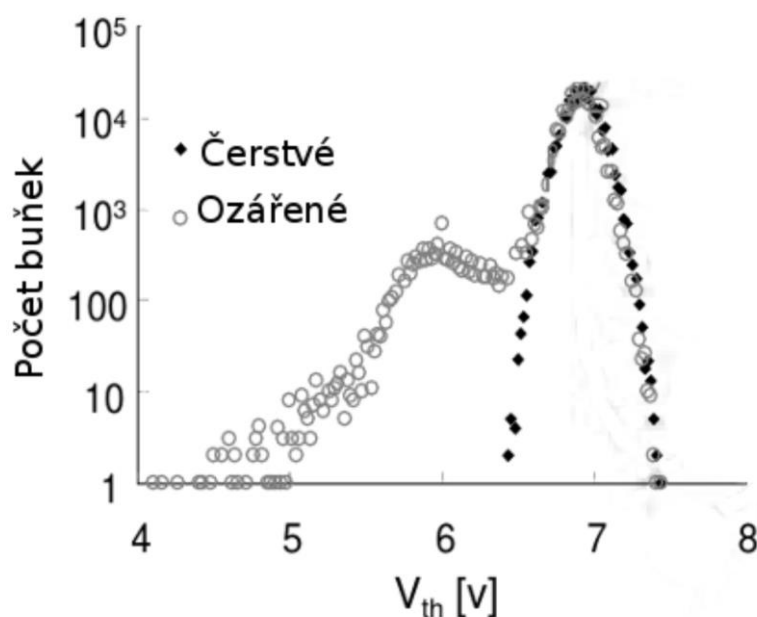
Obdržením vysoké dávky mechanismem vyrážení atomů z krystalové mříže, což vede k významnému porušení krystalové mříže křemíku, se snižuje počet volných nosičů náboje. Vlivem nižších dávek se pak zejména snižuje izolační schopnost vrstvy

oxidu křemičitého a dochází k vzrůstu povrchových proudů. Tímto dochází k vybití náboje zachyceného v FG. Důsledkem je poté ztráta uložených dat, která bývá doprovázená nemožností udržet data nově zapsaná nebo je vůbec zapsat. [1]

Stejně jako v případě poškození ionizací se opět posouvá prahové napětí, jehož míra posunu a množství postižených buněk závisí na dávce, kterou buňka vyražením atomů z krystalové mřížky obdrží. Rozdílem oproti poškození ionizací je, že se náboj v tomto případě z FG nevybíjí postupně, ale s poměrně vysokou rychlostí. K vybití náboje dochází buď povrchovými proudy mezi Source a Drain, nebo izolační vrstvou, jejíž izolační schopnosti jsou sniženy. [1]

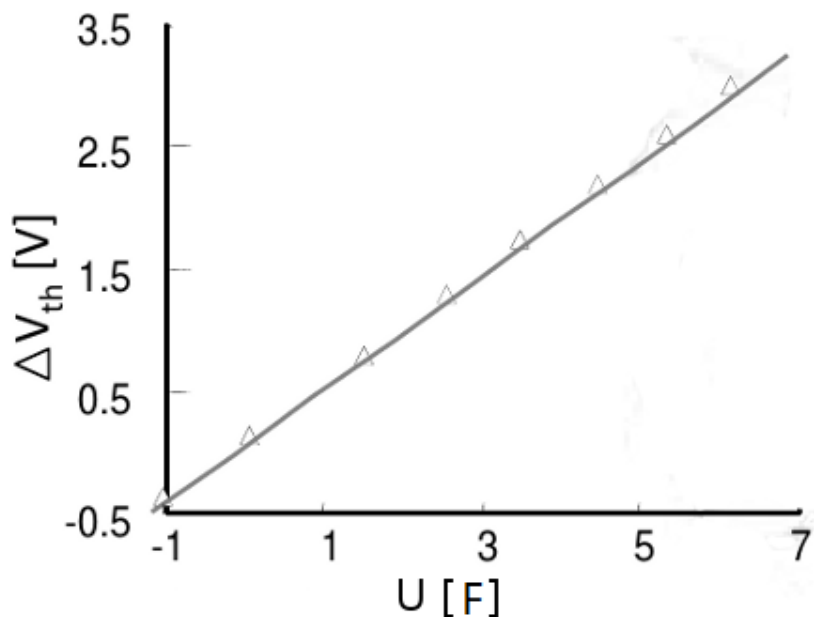
Pro popis počtu smazaných buněk je opět možné využít statistického přístupu a Gaussova rozložení jako v případě ionizace, je ale nutné zmínit, že s rostoucí dávkou nedochází k posunu celého rozdělení doleva, nýbrž ke vzniku dalšího vrcholu na levé straně Gaussova rozdělení. Nově vzniklý vrchol pak má vztah k počtu poškozených buněk. [1]

Obrázek 7 obsahuje Gaussovo rozdělení počtu buněk podle prahového napětí před a po ozáření těžkými ionty.



Obrázek 7: Závislost počtu buněk na prahovém napětí před a po ozáření [2]

Hodnota, o kterou se posune prahové napětí, je obvykle přímo úměrná elektrickému poli, které vzniká v izolační vrstvě oxidu křemičitého mezi FG a CG. Na Obrázku 8 je tato závislost vykreslena, přičemž jako jednotka intenzity elektrického bylo zvoleno F s hodnotou 5,1421 GV/cm. [1]



Obrázek 8: Závislost posuvu prahového napětí na intenzitě elektrického pole mezi CG a FG [2]

2.5.3 Vliv neutronové transmutace

Absorpcí neutronu na křemíku 30 dochází ke vzniku jádra křemíku 31, který se beta mínus rozpadem přeměňuje na fosfor 31. Fosfor je v polovodičových technologiích používán k dotování křemíku pro získání N vodivosti. S rostoucím množstvím vzniklého fosforu dochází v N vodivém křemíku k nárůstu stupně dotování, zatímco v případě P vodivého křemíku může od určité koncentrace fosforu dojít ke změně vodivosti z P na N. Taková změna vodivosti má drastický vliv na funkčnost součástky, kdy dochází k jejímu praktickému zničení. Záchyt neutronů samozřejmě neprobíhá pouze na jádrech křemíku 30, ale i na jádrech všech ostatních prvků, ze kterých se elektronická součástka skládá. I u těchto prvků může dojít ke vzniku nových alfa i beta zářičů. Hlavně nové alfa zářiče poté můžou svými částicemi vyřazovat atomy z krystalové mřížky. K ukončení poškození takto vzniklými zářiči nedochází ale v momentě ukončení ozařování, ale řídí se poklesem podle exponenciálního rozpadového zákona. [1]

2.6 Vliv záření na FLASH paměti

Výsledky dříve provedených studií naznačují, že k vážnému poškození FLASH paměti může dojít již s obdrženou dávkou v rozmezí 20 Gy až 200 Gy. Ze závěrů přechozích studií také vyplývá, že FLASH paměti jejichž buňky jsou uspořádány architekturou NOR disponují vyšší odolností vůči radiačnímu poškození než FLASH paměti s architekturou NAND. Tyto architektury se od sebe liší paralelním a sériovým způsobem zapojení buněk. Pokud jsou FLASH paměti vystaveny proudu elektronů nebo protonů, sníží se jejich prahové napětí pro zápis, zatímco v případě prahového napětí pro smazání dojde k jeho nárůstu. S rostoucí

teplotou se míra radiačního poškození snižuje, jelikož dochází k žíhání ve vyšší míře, než je tomu při pokojových teplotách. [1]

2.7 Vliv záření na FRAM paměti

Oproti předchozím zmíněným pamětem fungují FRAM součástky na principu polarizace feroelektrika, nikoliv na ukládání náboje v FG. FRAM paměti tak disponují vyšší odolností vůči nábojům indukovaným energetickými částicemi. V případě, že již dojde k selhání FRAM paměti, nedochází k němu z důvodu poškození samotného feroelektrika, které má schopnost vydržet dávky v řádu desítek kGy, ale z důvodu zničení kontrolní elektroniky, které se skládá z výrazně více citlivých CMOS prvků. Paměti tak jsou schopny vydržet dávky s horní hranicí okolo 1 kGy. [1]

3 Zvyšování radiační odolnosti polovodičových součástek

Všechny úpravy polovodičových součástek vedoucí ke zvýšené odolnosti vůči radiaci nesmí negativně ovlivňovat správnou součástku. Z tohoto důvodu je nutné důkladně poznat všechny procesy a jevy, které během těchto úprav mohou nastat. Všechny úpravy potenciálně vedoucí ke zvýšení radiační odolnosti by tak měly mít základ v matematických simulacích. Úprav, které splňují tyto podmínky, není mnoho.

Úpravy vedoucí ke zvýšení radiační odolnosti jsou prováděny již během výrobního procesu, kde se jedná zejména o úpravy oxidů a rozhraní. Konkrétními fázemi výrobního procesu, během kterých lze zvýšit radiační odolnost polovodičové součástky jsou: příprava a čištění materiálu, výroba vrstvy oxidu, Gate elektroda a další vysokoteplotní úpravy prvku. [1]

3.1 Příprava a čištění materiálu

Během procesu přípravy materiálu je potřeba klást důraz zejména na jeho kvalitu a čistotu. Nedokonalosti materiálu, mezi které se řadí kupříkladu dislokace, nežádoucí kontaminace a nečistoty, mohou negativně ovlivňovat odolnost vůči záření. Pro omezení povrchového poškození křemíkových destiček použitých během výrobního procesu by mělo před započatím výroby dojít k jejich vyleštění. Radiační odolnost je také možno zvýšit před oxidací hradla, když během posledního kroku čištění dojde k přidání kyseliny fluorovodíkové. [1]

3.2 Výroba vrstvy oxidu

Odolnost vůči radiaci je ovlivněna tloušťkou izolační vrstvy oxidu křemičitého. S rostoucí velikostí izolační vrstvy oxidu narůstá také množství děr, u kterých může dojít k zachycení v této vrstvě. Jedním z hlavních způsobů zvyšování odolnosti vůči záření tak je snižování tloušťky izolační vrstvy oxidu na co nejnižší únosnou mez. Tento proces je významným krokem ke zvýšení radiační odolnosti, a tak je často tím vůbec prvním krokem během výrobního procesu, jelikož snižování tloušťky izolační vrstvy oxidu vede ke zvýšení radiační odolnosti dvakrát až desetkrát. Výsledky výzkumu naznačují, že v případě užití izolačních vrstev s tloušťkou v řádu tisícín mikrometrů vykazují zvýšenou odolnost až do dávek v řádu desítek kGy. [1]

Radiační odolnost je také ovlivněna teplotou, při které dochází ke vzniku izolační vrstvy oxidu. Nejvhodnější teplota pro zajištění co nejvyšší radiační odolnosti se nachází v intervalu 850 °C až 1000 °C. Teplota však není jediným faktorem, který během tvorby vrstvy oxidu ovlivňuje radiační odolnost, dalším faktorem jsou například také plyny, které jsou během oxidace přimíchány do proudu kyslíku. Argon kupříkladu radiační odolnost zvyšuje, kdežto dusík způsobuje její snížení. [1]

Výzkum týkající se výroby oxidační vrstvy také navrhuje použití dotovaného oxidu nebo vrstvených struktur. Izolanty skládající se z více vrstev mohou využívat například hliníku, dusíku nebo chromu. Tyto materiály za určitých podmínek zvýší radiační odolnost, na druhou stranu mohou za jiných podmínek způsobit její snížení. Podobné chování vykazuje taky fosfosilikátové sklo nebo různé nitridy. [1]

3.3 Teplotní úprava vrstvy oxidu

Jakmile je izolační vrstva oxidu vyrobena přechází se k jejímu žhání v atmosféře inertního plynu. Tento krok je do výrobního procesu zahrnut proto, aby došlo uvolnění napětí mezi oxidem křemičitým a křemíkem a také k eliminaci potenciálních poruch v oxidu. Nejběžnější teplotou, při které žhání v dusíku probíhá, je 1100 °C. Při této teplotě však dochází k různým vysokoteplotním procesům, které je pro zvýšení radiační odolnosti nutné omezit na co nejmenší množství. Nejvhodnější teplota se tak snižuje mezi přibližně 850 °C a 950 °C, kde by elektronická součástka měla setrvat po dobu v řádu maximálně desítek minut. Doporučuje se také užití směsi kyslíku a dusíku v poměru 1 ku 9. Tato směs má na radiační odolnost pozitivní vliv, což se o čistém dusíku říci nedá. [1]

3.4 Gate elektroda

Gate elektroda se nejčastěji vyrábí z hliníku nebo polykrystalického křemíku. Při použití křemíku ovšem vyvstává podmínka, aby ke vzniku izolační vrstvy oxidu došlo během výrobního procesu co nejdříve. Dřívější vznik izolační vrstvy ovšem vede k její zvýšené náchylnosti během vysokoteplotních úprav. Materiál použitý při výrobě elektrody tak má na radiační odolnost nižší vliv než uspořádání výrobního procesu. [1]

V posledních letech dochází také k nástupu nových materiálů pro výrobu Gate elektrody. Příklady mohou být různé kovy nebo silicidy kovů, konkrétněji například tantal nebo wolfram. Tyto materiály mají nižší elektrický odpor, ale tato výhoda je z hlediska radiační odolnosti vyvážena jejich vysokými atomovými čísly. V prostředí s převážně nízkoenergetickým zářením mohou být příčinou obdržení vyšší dávky, jelikož při Comptonově jevu dochází ke vzniku volných elektronů, které mohou proniknout do izolační vrstvy oxidu křemičitého. [1]

4 Modulární manipulátor ILJA

Prvotní myšlenka vedoucí k vývoji modulárního robotického manipulátoru byla založena na požadavku Muzea Karlovy Vary na Centrum výzkumu Řež s.r.o., které vyjádřilo svůj zájem o technologii, která by finančně i časově zjednodušila možnosti průzkumu obtížně přístupných prostorů nacházejících se pod zemí. Modulární manipulátor má za úkol nahradit prostředky jako zemní radar nebo různé gravimetrické metody a zároveň dodat větší množství informací v lepší kvalitě. Takovému požadavku nejlépe vyhovuje konstrukce malého vozidla s pásovým pohonem, jehož vybavením bude zejména kamera. Pásový podvozek má za úkol zajistit co nejsnazší pohyb úzkými šachtami, zatímco pevnostně odolná a voděodolná konstrukce má zajistit ochranu manipulátoru pro případ jeho pádu nebo zavalení. S uvažováním plánovaného použití manipulátoru zejména v úzkých podzemních prostorech, kde by mohlo docházet k rušení nebo výpadkům bezdrátové komunikace, bylo zvoleno ovládání manipulátoru prostřednictvím pevného kabelového spojení. [4]

Centrum výzkumu Řež s.r.o. v době vznesení požadavku Muzeem Karlovy Vary žádnou takovou technologií nedisponovalo, ale z důvodu možnosti rozšířit tak jeho portfolio byl odsouhlasen vývoj robotického manipulátoru. Koncepce celého manipulátoru byla zvolena jako modulární stavebnicová, jelikož vývoj prostředku použitelného pro jeden účel byl nebyl dostatečně opodstatněn. Použití modulární konstrukce umožňuje následné zrychlení a zlevnění vývoje použití robotického manipulátoru v dalších aplikacích. V oblasti jaderné energetiky se jedná například o inspekci v šachtě reaktoru na Jaderné elektrárně Dukovany, kde bude manipulátor provádět měření vůlí mezi tlakovou nádobou reaktoru a drážkou šachty reaktoru při vytažení šachty reaktoru do stínícího válce. Mimo tato užití má takový robotický manipulátor potenciál být použit například u složek záchranných sborů, kde by pomáhal s průzkumem závalů a trosk, které by jinak nebyly člověku přístupné, nebo v případě možného lidského přístupu by byly příliš nebezpečné. [4]

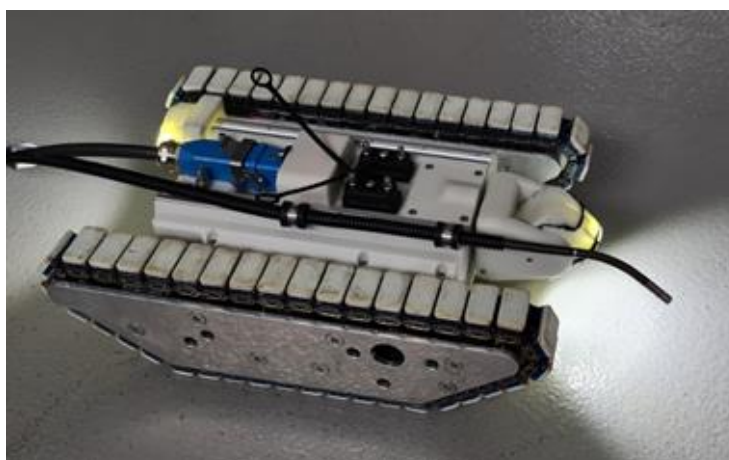
Modulární robotický manipulátor Ilja má ve své základní konfiguraci rozměry 350 mm na 250 mm na 105 mm se světlou výškou 30 mm. V takovém případě se jedná o pásové vozidlo, které disponuje schopností plnit úkoly, ke kterým bylo původně určeno. Může se tak významně podílet na průzkumu úzkých a nepřístupných prostorů a šachet, které by jinak neumožňovaly přístup lidským průzkumníkům. Aby manipulátor disponoval schopností se pohybovat po většině povrchů, může být vybaven více druhy podvozků. V případě pásových podvozků mohou být užity základní pásy určené pro pohyb po suti, dále byly vyvinuty pásy s měkkými články, které výrazně zjednodušují pohyb po hladkých površích, nebo existují pásy s výraznějším profilem, které umožňují pohyb po sypkých površích. Modulární manipulátor Ilja může být také osazen podvozkem stojícím na magnetických kolečkách. Jedná se o kolečka vybavená silnými neodymovými magnety s možností použití pryžových běhounů v případě nutnosti. V této konfiguraci jsou poháněna pouze přední kolečka manipulátoru, zatímco ta zadní jsou pouze uložena s volným pohybem ve třech osách. Díky použití silných magnetů se tak manipulátor může pohybovat po feromagnetických površích a může tak provádět vizuální průzkum

nádrží, kotlů nebo vnějších stěn potrubí. V konfiguraci s kolečkovým podvozkem se rozměry manipulátoru změní na 320 mm na 280 mm na 105 mm. [4]

Primární součástí příslušenství, které je k manipulátoru možné připojit je širokoúhlá kamera disponující rozlišením 5 Mpx při 15 snímcích za sekundu a samočinným zaostřováním od 10 cm. Tato kamera nachází využití nejen pro vizuální prohlídku, ale také pro účely vizuálního navádění celého robotického manipulátoru. Z tohoto důvodu je kamera zabudována přímo v hlavní jednotce. Osvětlení snímané scény zajišťuje dvojice výkonných LED s nastavitelným jasem, které jsou umístěny po obou stranách kamery. Další připojitelné moduly je možné mechanicky připevnit na profilové lišty nacházející se na víku hlavní jednotky. Elektrické propojení s hlavní jednotkou je pak zajištěno sadou signálových a napájecích konektorů, která zahrnuje napěťově stabilizované napájecí větve 5 V a 3,3 V, pro komunikaci poté slouží sběrnice USB, I2C, SPI a tři kanály analogově-číslicového převodníku. Moduly je možné připojit uvnitř i vně těla hlavní jednotky. [4]

Kromě kamery je součástí hlavní jednotky také řídicí počítač, napěťové regulátory, motory s převodovkami a jejich řízení. Motory se v hlavní jednotce nachází dva, přičemž jsou na sobě nezávislé a každý slouží k pohonu jedné poloviny podvozku. Dno šasi bylo vyfrézováno z duralu a plní funkci odvodu přebytečného tepla z výkonových elektronických prvků. Pouzdra převodů magnetických koleček a články pásů jsou vyrobeny metodou 3D tisku z plastu s příměsí skelných částic. Stejným způsobem bylo vyrobeno i víko skříně hlavní jednotky, jelikož jeho složitost nedovolovala výrobu celokovového víka. Z kovu jsou tak vyrobeny jen některé konstrukční části víka. Pro výrobu článků se zvýšenou přilnavostí k hladkým povrchům byly použity kompozitní materiály. Pro účely propojení manipulátoru s operátorským stanovištěm, jehož součástí je osobní počítač a olovený akumulátor sloužící k napájení hlavní jednotky manipulátoru, je využito 25 m dlouhého kabelu. Zvýšená pevnost kabelu umožňuje jeho použití jako tažné lano v případě poruchy a nutnosti ručního vytažení manipulátoru ze zkoumaného prostoru. [4]

Vzhled modulárního manipulátoru je vyfocen na Obrázku 9.



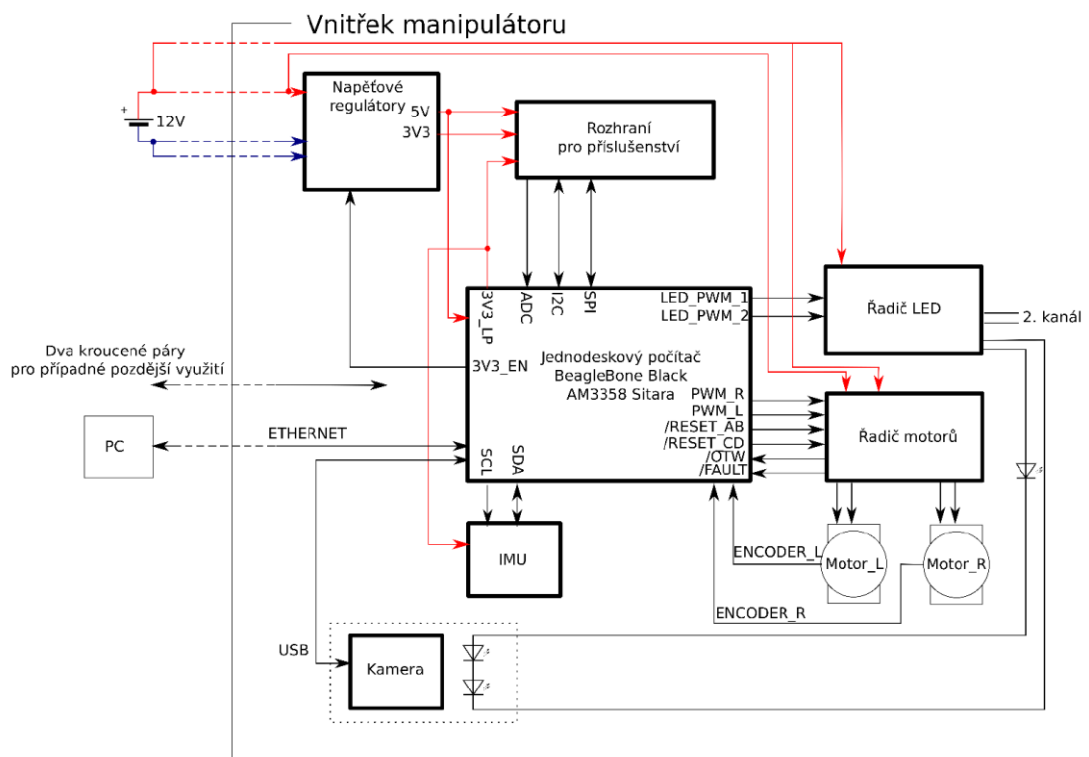
Obrázek 9: Vzhled modulárního manipulátoru [5]

Modulární manipulátor IJLA je zamýšlen pro inspekce a měření vůlí mezi perem tlakové nádoby reaktoru a drážkou šachty reaktoru na Jaderné elektrárně Dukovany. Předpokládá se 8 inspekcí, kdy každá bude trvat přibližně půl hodiny, při dávkovém příkonu 63 mSv/hod. Celková obdržená dávka by se tak měla pohybovat okolo hodnoty 0,252 Sv.

4.1 Významné elektronické součásti manipulátoru

Mezi významné elektronické součásti manipulátoru patří řídicí mikro počítač, napájecí zdroje, řadič motorů, řadič LED, periférie pro snímání analogových signálů, hlavní konektor, konektory pro připojení příslušenství a ostatní obvody. Tyto elektrické obvody jsou připojeny na základní desku. [6]

Na Obrázku 10 je blokové schéma zapojení vnitřních částí manipulátoru.



Obrázek 10: Blokové schéma zapojení elektronických částí [6]

4.1.1 Řídicí mikro počítač

Pro účely komunikace s ovládacím počítačem a připojeným příslušenstvím manipulátoru, a také pro generování řídicích signálů pro motory a LED bylo využito jednodeskového počítače BeagleBone Black rev. C. [6]

Základní vlastnosti použitého počítače jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1: Základní vlastnosti počítače BeagleBone [7]

	Vlastnost
Procesor	Sitara AM3359AZCZ100 1 GHz, 2000 MIPS
Grafický engine	SGX530 3D, 30M Polygons/S
Paměť SDRAM	512MB DDR3L 606 MHz
Flash paměť	2 GB
Řízení napájení	TPS65217C PMIC regulátor
Debug podpora	20 pin sériový CTI JTAG
Zdroj napájení	miniUSB nebo DC Jack nebo přes rozšiřovací port
Deska s tištěnými spoji	3,4 palce na 2,1 palce, šestivrstvá
Indikátory	1 indikátor napájení, 2 indikátory ethernet, 4 uživatelem ovladatelné LED
USB 2.0 port	miniUSB a USB A, 500 mA
Sériový port	6 pin TTL Header
Ethernet	10/100, RJ45
Slot na paměťovou kartu	microSD, 3,3 V
Vstupní tlačítka	Reset, Boot a Power tlačítka
Video výstup	16b HDMI, maximální rozlišení 1280x1024, dále 1024x768, 1280x720, 1440x900 s podporou EDID
Zvuk	Přes HDMI rozhraní, stereo
Rozšiřovací konektory	Napájení 5 V a 3,3 V 3,3 I/O McASP0, SPI1, I2C, GPIO(65), LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN (max 1,8 V), 4 časovače, 3 sériové porty, CAN0, EHRPWM(0,2), XDMA Interrupt, Power tlačítka, Expansion Board ID
Hmotnost	39,68 g

Na Obrázcích 11 a 12 je vyfocena horní a dolní strana Počítače BeagleBone Black rev. C.

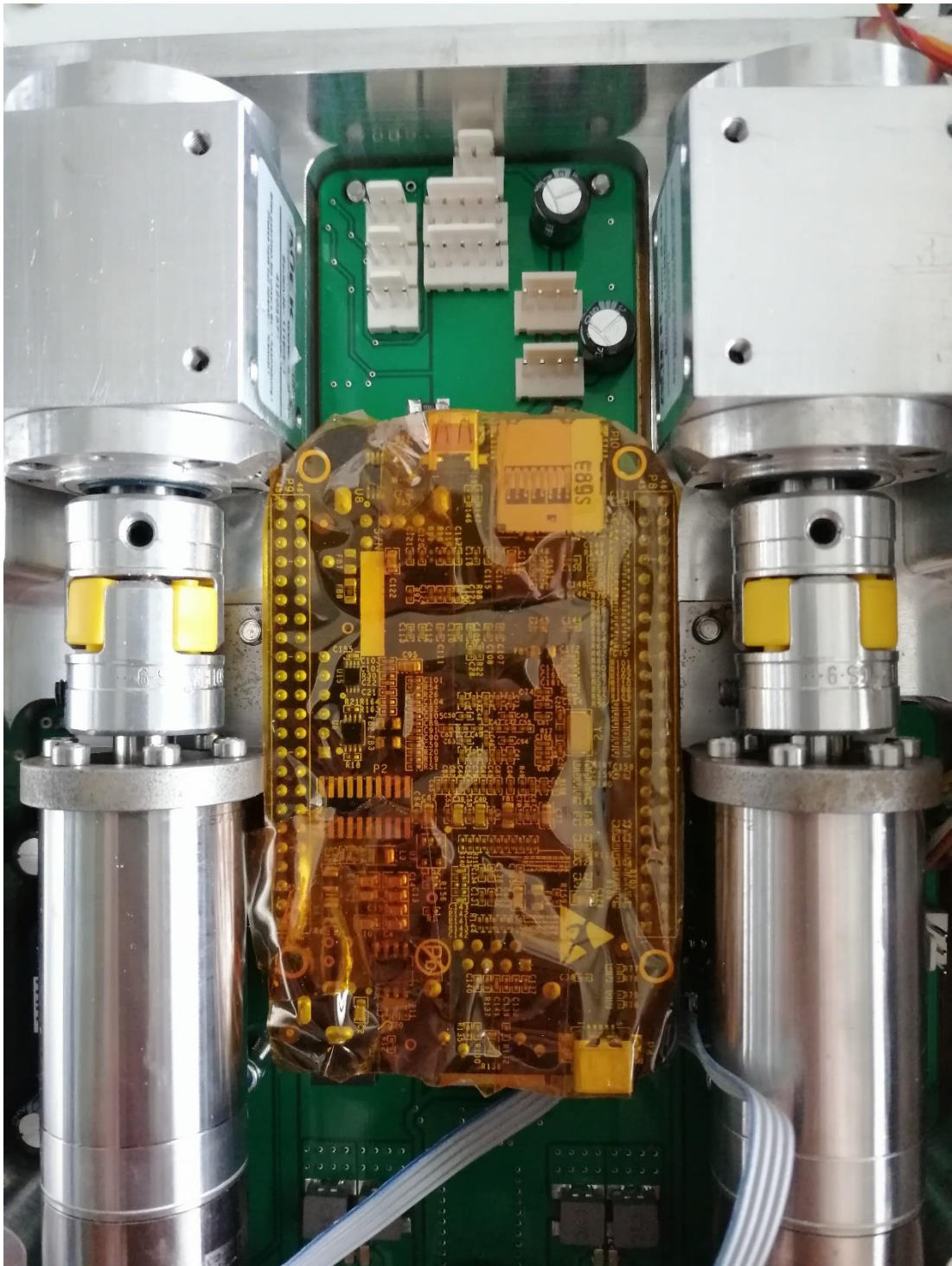


Obrázek 11: Horní strana řídicího mikropočítače BeagleBone



Obrázek 12: Dolní strana řídicího mikropočítače BeagleBone

Na Obrázku 13 je vyfoceno umístění řídicího mikropočítače v rámci hlavní jednotky manipulátoru ILJA.



Obrázek 13: Umístění řídicího mikropočítače v hlavní jednotce manipulátoru

4.1.2 Napájecí zdroje

Napájení elektronických částí manipulátoru je zajištěno dvěma spínanými regulátory pro napájecí větve 5 V a 3,3 V, které jsou ve starší verzi manipulátoru tvořeny obvody TPS563219, zatímco v novější verzi jsou nahrazeny kompaktním napájecím modulem SKM15A-05. Rozdíl v zapojení těchto dvou regulátorů je v odlišném nastavení děliče výstupního napětí pro zpětnou vazbu regulátoru a také

v možnostech vypnutí. To znamená, že regulátor na napěťové hladině 5 V je spuštěn v momentě, kdy je připojeno napájecí napětí, zatímco regulátor napětí 3,3 V je aktivován až v momentě, kdy je k tomu vydán pokyn z řídicího počítače. Jelikož větev 3,3 V slouží pouze k napájení příslušenství, není tak nutné, aby byla v provozu nepřetržitě, pokud není žádný modul příslušenství připojen. [6]

Základní vlastnosti zdroje SKM15A-05 jsou uvedeny v Tabulce 2.

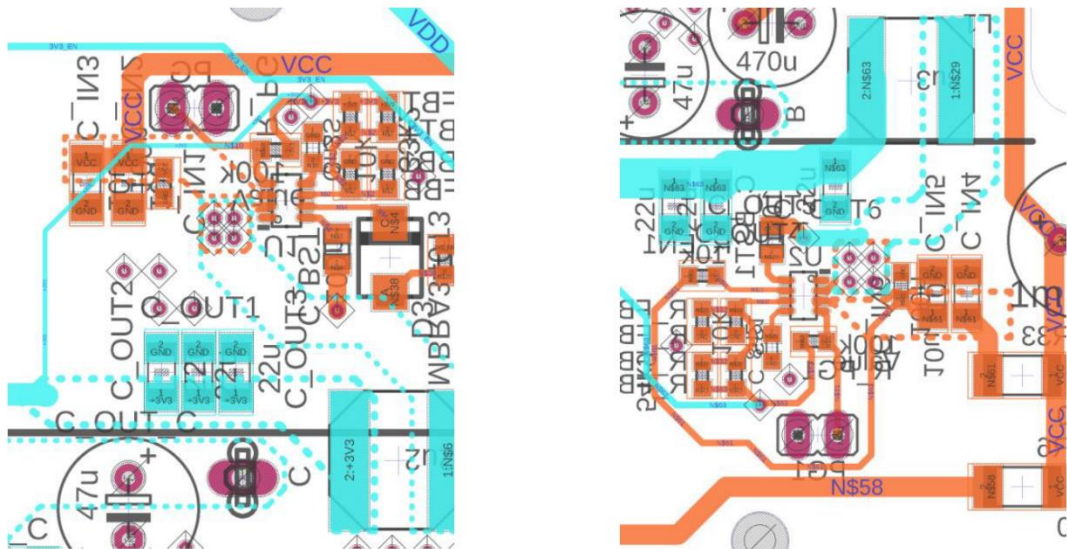
Tabulka 2: Vlastnosti zdroje SKM15-05 [8]

Výstupní parametry	
Napětí	5 V
Proudový interval	300 mA až 3000 mA
Jmenovitý výkon	15 W
Maximální šum	50 mV p-p
Přepínací frekvence	400 KHz
Externí kapacita	1000 µF
Vstupní parametry	
Napětí	9 V až 18 V DC
Účinnost	86 %
Proud v plné zátěži	1500 mA
Proud bez zátěže	80 mA
Ochrana	
Proti vysokému proudu	110 % až 180 % jmenovitého proudu
Proti zkratu	Pro všechny výstupy
Proti vysokému napětí	115 % až 150 % jmenovitého napětí
Prostředí	
Pracovní teplota	-40 °C až +80 °C
Pracovní vlhkost	20 % až 90 % relativní vlhkosti
Skladovací teplota	-55 °C až +100 °C
Skladovací vlhkost	10 % až 95 % relativní vlhkosti
Další	
Střední doba mezi poruchami	400 000 hodin
Rozměry	25,4 mm na 25,4 mm na 9,9 mm
Hmotnost	15 g

Na Obrázku 14 je vyfocena a na Obrázku 15 vyobrazena ve schématu pozice napájecího zdroje v rámci hlavní jednotky manipulátoru ILJA.



Obrázek 14: Umístění zdroje v rámci hlavní jednotky manipulátoru



Obrázek 15: Schéma zapojení 3,3 V větve (vlevo) a 5 V větve (vpravo) [6]

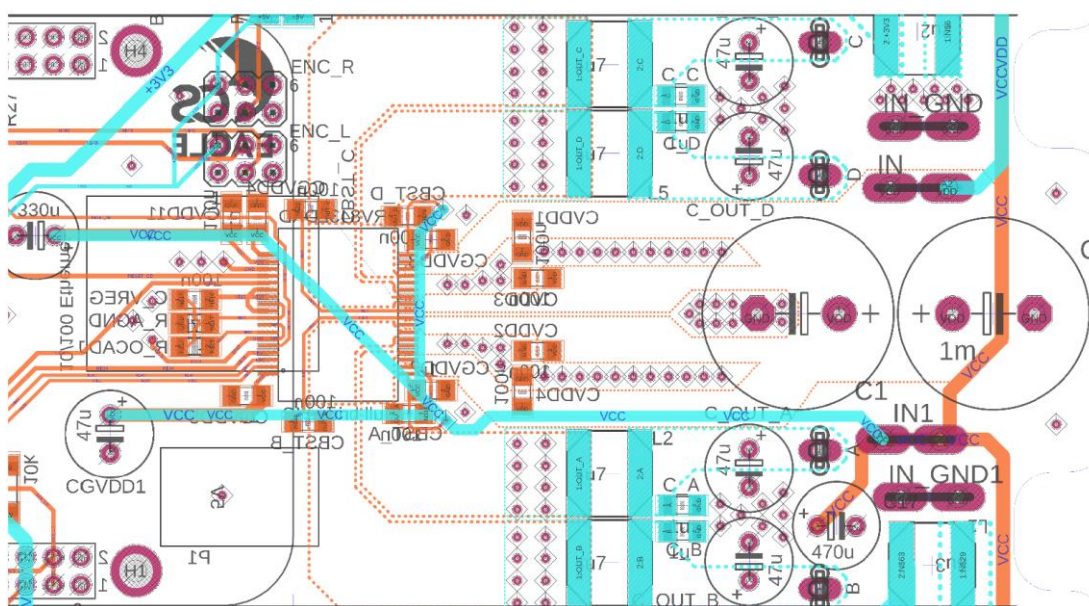
4.1.3 Řadič motorů

V modulárním manipulátoru ILJA je jako silový výstup řízení motorů použit dvojitý H-můstek tvořený integrovaným obvodem DRV8432, jehož základní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 3. [6]

Tabulka 3: Základní vlastnosti integrovaného obvodu DRV8432 [9]

Vlastnost	Hodnota
Počet můstků	2
Minimální napětí	10,8 V
Maximální napětí	70 V
Maximální výstupní proud	6 A
RDS	220 mΩ
Kontrolní mód	Nezávislá ½ můstku, PWM
Kontrolní rozhraní	Hardware (GPIO)
Vlastnosti	Regulace proudu

Schéma umístění řadiče motorů na základní desce je vyobrazeno na Obrázku 16.



Obrázek 16: Umístění řadiče motorů na základní desce [6]

4.1.4 Řadič LED

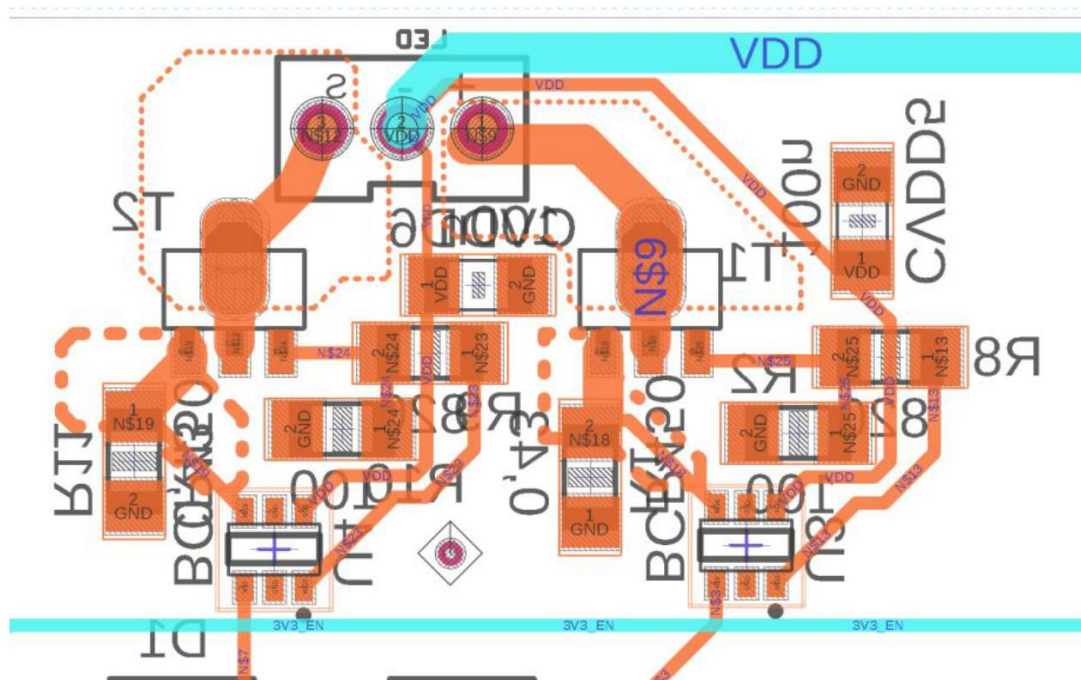
Na základní desce manipulátoru ILJA se nacházejí dva integrované obvody BCR450, které slouží jako řadiče LED. První z nich slouží jako ovládání LED osvětlující záběr kamery, zatímco druhý zůstává nevyužit a je vyhrazen pro pozdější použití. Řadič LED je možné využít buď jako zdroj konstantního proudu, kdy se ovládaná dioda nachází buď ve vypnutém nebo zapnutém stavu, nebo lze ovládat intenzitu osvětlení dodávanou diodou pomocí pulsně šířkové modulace. [6]

Základní parametry řadiče BCR450 jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry radiče BCR450 [10]

Vlastnost	Hodnota
Maximální napětí	40 V
Maximální výstupní proud	100 mA
Maximální tepelný výkon	500 mW
Skladovací teplota	-65 °C až 150 °C
Frekvence PWM signálu	1000 Hz
Napětí PWM	5 V

Na Obrázku 17 je vyobrazeno schéma umístění radiče LED na základní desce.



Obrázek 17: Umístění radiče LED na základní desce [6]

4.1.5 Periferie pro snímání analogových obvodů

Pro ochranu analogových vstupů řídicího počítače proti překročení napětí signálu přes hodnotu referenčního napětí AD převodníku jsou vstupy chráněny ochrannými diodami a omezovači z operačních zesilovačů. Operační zesilovač je použit i pro proudové posílení výstupu referenčního napětí před konektorem. [6]

Na Obrázku 18 je schéma zapojení analogových periferních obvodu na základní desce.

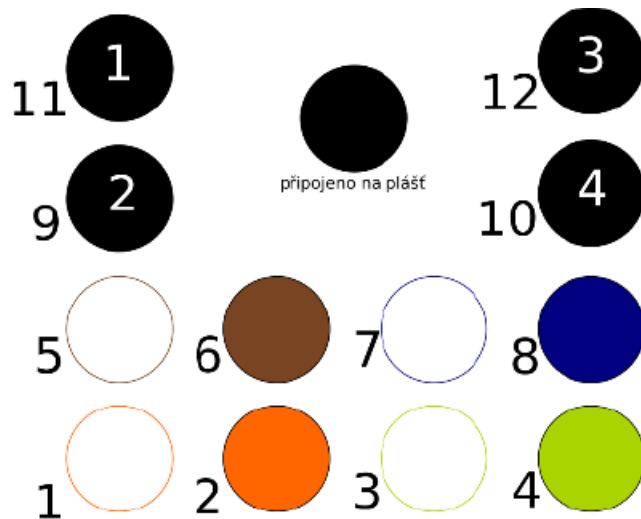


Obrázek 18: Zapojení analogových periferních obvodů na základní desce [6]

4.1.6 Hlavní konektor

Kabel, kterým je manipulátor ILJA ovládán a napájen, se skládá z ethernetové linky kategorie 6, tedy ze čtyř kroucených párů, a čtyř silových vodičů s průřezem 1,5 mm². Do manipulátoru je kabel připojen soustavou konektoru HARTIN 10360120001. V hlavní jednotce manipulátoru jsou poté silové vodiče připojeny na základní desku a ethernetové propojení je provedeno RJ45 konektorem připojeným do řídicího počítače. [6]

Schéma rozmístění kontaktů hlavního konektoru je na Obrázku 19.



11, 12: 12V
 9, 10: GND
 1 - 4: Ethernet
 5 - 8: Dva kroucené páry pro pozdější využití

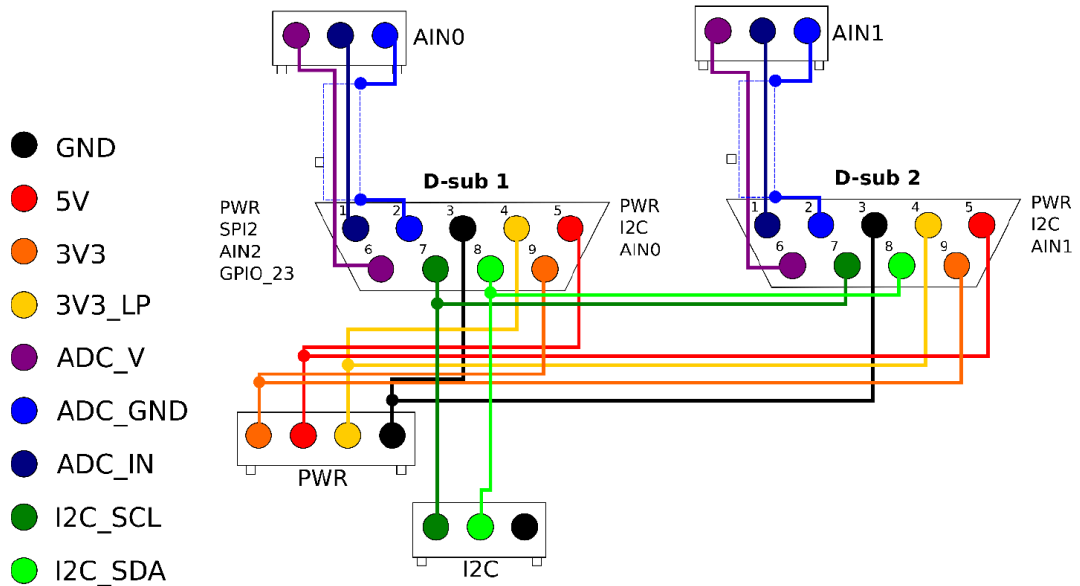
Obrázek 19: Rozmístění kontaktů hlavního konektoru [6]

4.1.7 Konektory pro připojení příslušenství

Ze základní desky jsou vyvedeny dva napájecí konektory, z nichž každý obsahuje tři napěťové větve. První větev pracuje s napětím 5 V s maximálním proudem 3 A, druhá větev je pod napětím 3,3 V rovněž s maximálním proudem 3 A, třetí větev je opět 3,3 V, ale může být použita jen pro malé výkony, jelikož je její maximální proud omezen na 250 mA. Ze základní desky jsou také vyvedeny konektory

pro komunikaci s připojenými zařízeními, které nesou signály analogově-číslicového převodníku a sběrnice I2C. Tyto komunikační kanály a napájecí větve jsou vyvedeny do vnějších konektorů D-Sub. [6]

Na Obrázku 20 je schéma zapojení kontaktů pro připojení příslušenství.



Obrázek 20: Rozmístění kontaktů pro připojení příslušenství [6]

4.1.8 Ostatní obvody

Mimo elektronické součásti zmíněné v předchozích odstavcích se na základní desce nachází také vodiče pro připojení desky inerciální navigace, signální LED na víko, vývody pro servopohony kamerového pouzdra a převodníky úrovně pro připojení enkodérů motorů. [6]

4.2 Konstrukce a použité materiály manipulátoru

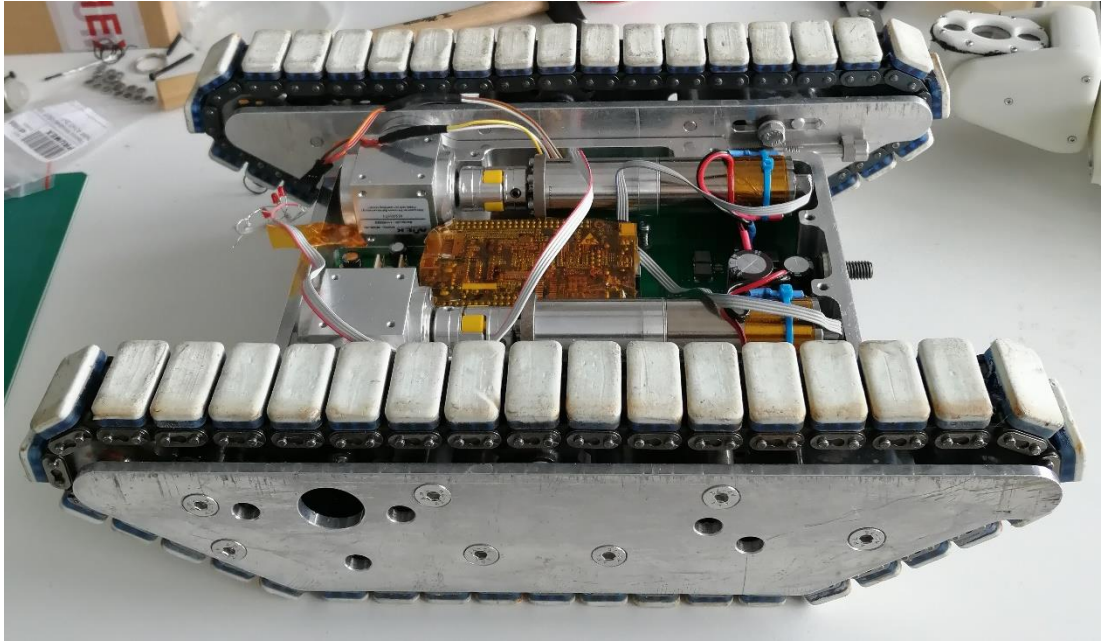
4.2.1 Konstrukce a materiály skříně manipulátoru

Konstrukce skříně základní jednotky se skládá ze třech částí, kterými jsou:

- Pohonná jednotka
- Víko
- Kamera

Dno skříně pohonné jednotky je vyrobeno obráběním z hliníku, a kromě funkce připevnění pohonných motorů a převodovky slouží také jako chladič řadiče motorů. [6]

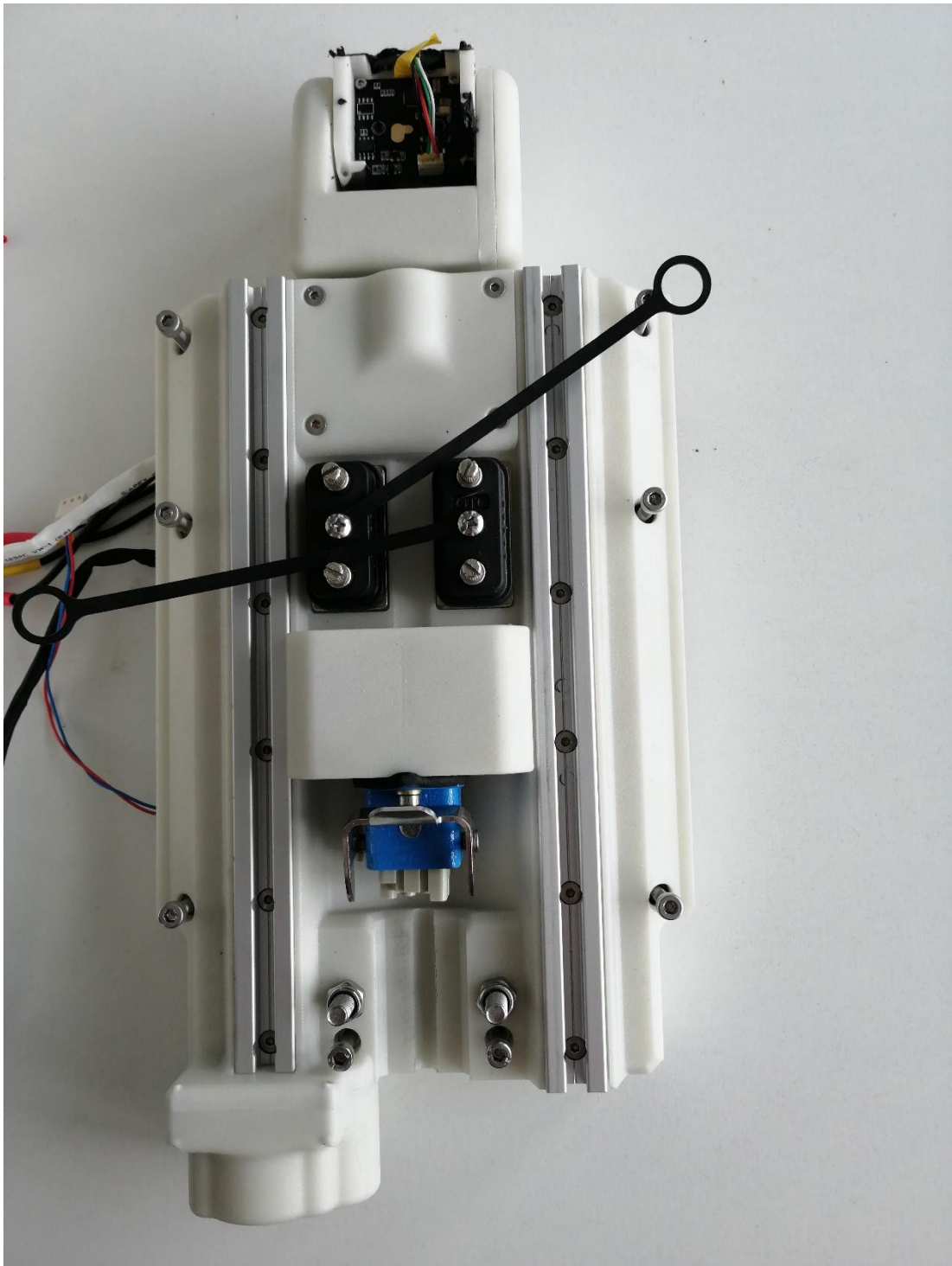
Boční pohled na skříň pohonné jednotky s umístěnými motory a připevněnými pásovými podvozky je vyfocen na Obrázku 21.



Obrázek 21: Boční pohled na skříň pohonné jednotky

Víko základní jednotky je vzhledem k složitosti svého tvaru téměř nemožné vyrobit obráběním z hliníku, a tak bylo navrženo pro výrobu z plastového kompozitu PA 3200 GF, což je druh sklem vyztuženého polyamidu. Součástí víka je konektorová výbava manipulátoru, soustava pro mechanické uchycení příslušenství, kamera a osvětlovací moduly. [6]

Horní pohled na víko základní jednotky je vyfocen na Obrázku 22.



Obrázek 22: Horní pohled na víko základní jednotky

Nejvýznamnějšími materiály, ze který se skládá skříň základní jednotky manipulátoru jsou tedy hliník a sklem vyztužený polyamid PA 3200 GF.

4.2.2 Materiály elektronických částí manipulátoru

Nejdůležitějším materiálem použitým v elektronických částech manipulátoru je samotný křemík, který je esenciálním materiálem všech elektronických součástí a zařízení na celém světě spolu s jeho oxidem SiO_2 , který se v polovodičových

součástkách nachází jako izolační prvek. Pro výrobu obalů elektronických součástek jsou nejčastěji používány různé druhy plastů, v menší míře potom kovy nebo keramika. Elektrody, kterými dochází k propojení součástky se zbytkem zařízení, jsou nejčastěji vyrobeny z hliníku. Obaly a elektrody polovodičových nejsou z hlediska radiační odolnosti příliš významné, a tak nejvýznamnějším materiálem z hlediska radiační odolnosti je křemík.

4.3 Možnosti manipulátoru v rámci ozařovacích experimentů

Možnosti manipulátoru v rámci ozařovacích experimentů nespočívají v ozařování manipulátoru jako celku včetně jeho vybavení, ale v ozařování jednotlivých elektronických komponent, případně jejich většího celku, a sledování vlivu záření na ně. Větším celkem elektronických součástek je myšlen například řídicí počítač BeagleBone, který sám o sobě obsahuje několik druhů elektronických prvků. Jednotlivými elektronickými komponentami poté jsou například řadiče motorů, řadiče LED, napájecí zdroje nebo zmíněné prvky použité v řídicím počítači.

Výčet jednotlivých součástek použitelných v rámci ozařovacích experimentů je uveden v Tabulce 5.

Tabulka 5: Typy a modely součástek použitelných v rámci experimentů

Typ součástky	Model součástky
Řadič motorů	DRV8432
Řadič LED	BCR450
Napájecí zdroj	SKM15A-05
Procesor ŘP	Sitara AM3359AZCZ100
SDRAM ŘP	Kingston D2516EC4BXGGB
FLASH paměť ŘP	Kingston EMMC04G-M627
Ethernetový transceiver ŘP	Microchip LAN8710A
Napájení procesoru ŘP	Texas Instruments TPS35217C
HDMI transmitter ŘP	NXP Semiconductors TDA19988BHN
Regulátor napětí ŘP	Texas Instruments TC5209

Výše vyčtené součástky je možné samostatně zakoupit, a tedy zkoumat vlivy záření na ně samotné.

4.4 Posouzení náchylnosti k radiačnímu poškození

Je očividné, že součástí manipulátoru nejnáchylnější k radiačnímu poškození je řídicí počítač. Toto tvrzení je založeno na faktu, že jeho součástí je velké množství elektronických součástek, jejichž ztráta funkčnosti by vedla ke ztrátě funkčnosti řídicího počítače, která nevyhnutelně znamená úplnou ztrátu funkčnosti celého manipulátoru. Součástkami řídicího počítače nejvíce náchylnými k takovému poškození jsou procesor, SDRAM, FLASH paměť a v neposlední řadě také Ethernetový transceiver, jehož zničení nezpůsobí nutně selhání celého řídicího počítače, ale dojde ke ztrátě komunikace mezi manipulátorem a řídicím stanovištěm, což se dá považovat za situaci rovnocennou úplné ztrátě funkčnosti řídicího počítače. Ovšem ne všechny součástky použité v řídicím počítači musí svým selháním způsobit

selhání celého manipulátoru. HDMI transmitter je v případě robotického manipulátor prakticky nevyužíván, a tak by jeho ztráta funkčnosti neměla mít vliv na celkovou funkčnost manipulátoru. Otázkou ovšem je, jakým způsobem reaguje samotný řídicí počítač při detekci nefunkční součástky.

Prakticky analogická situace nastává při posuzování náchylnosti elektronických součástek nacházejících se mimo řídicí počítač. Z těchto součástek se jako nejproblematičtější jeví ztráta funkčnosti napájecího zdroje, která naprosto nevyhnutelně vede ke ztrátě funkčnosti celého manipulátoru. O něco méně vážná situace nastává v případě ztráty funkčnosti řadiče motorů. Manipulátor tak sice ztrácí schopnost jakéhokoliv pohybu a bude muset být vytažen ručně pomocí komunikačního kabelu, ale stále disponuje zbytkem své funkčnosti a může nadále zkoumat své nejbližší okolí. Podobná méně vážná situace nastává v případě selhání řadiče LED. Manipulátor tak sice přichází o možnost vlastního osvětlení zkoumané scény, což v teoretické rovině ani nemusí znamenat vážný problém, pokud by se nacházel v dostatečně osvětleném prostoru, nebo pokud by pro osvětlení zkoumané scény byl použit externí zdroj světla. Jelikož jsou v případě selhání řadiče LED všechny ostatní funkce manipulátoru zachovány, nemusela by v takovémto případě být ohrožena jeho funkčnost téměř vůbec.

5 Návrh experimentálního ověření radiační odolnosti manipulátoru

Jako nejvhodnější zařízení pro provedení experimentu byly vybrán výzkumný jaderný reaktor LVR-15 a gama ozařovna. Obě zařízení se nacházejí v areálu ÚJV Řež. Reaktory LR-0 a VR-1 nejsou uvažovány jako zdroj záření pro experiment, jelikož výkon reaktoru VR-1, který je srovnatelný s LR-0, byl autorem této práce v jeho bakalářské práci označen jako nedostatečný. Následující odstavce pojednávají o vlastnostech a možnostech experimentálního využití dvou zvolených zařízení. Později jsou diskutovány různé způsoby provedení experimentálního ověření radiační odolnosti manipulátoru.

5.1 Jaderný reaktor LVR-15

Jaderný reaktor LVR-15 je výzkumný víceúčelový reaktor, jehož provozovatelem je Centrum výzkumu Řež s.r.o. Reaktor LVR-15 stojí na místě, kde byl mezi lety 1957 a 1987, tedy po dobu 30 let, provozován výzkumný reaktor VVR-S, jenž disponoval maximálním tepelným výkonem 2 MW. V letech 1988 a 1989 následně proběhla rekonstrukce, jejíž součástí byla i výměna reaktorové nádoby. Po skončení rekonstrukce byl reaktor v srpnu 1989 opětovně spuštěn, tentokrát již jako LVR-15. [11]

Jaderný reaktor LVR-15 výzkumným reaktorem tankového typu s nerezovou reaktorovou nádobou, která se nachází po stínícím víkem. Aktivní zóna jaderného reaktoru LVR-15 je složena z palivových článků typu IRT-4M, které jsou chlazeny nucenou cirkulací chladiva o atmosférickém tlaku. Maximální tepelný výkon jaderného reaktoru LVR-15 je 10 MW. Jako chladivo a zároveň také moderátor zde slouží demineralizovaná lehká voda. Pro účely reflektoru může být použita buď opět demineralizovaná lehká voda nebo bloky beryllia. Standardně je jaderný reaktor LVR-15 provozován v nepřetržitém režimu 24 hodin denně, které jsou rozděleny do dvou směn. Nepřetržitý provoz obvykle trvá po dobu 20 až 22 dní, které jsou následovány odstávkou trvající zhruba 7 až 10 dní. Během této odstávky bývá provedena údržba reaktoru, výměna paliva a přestavba aktivní zóny reaktoru. [11]

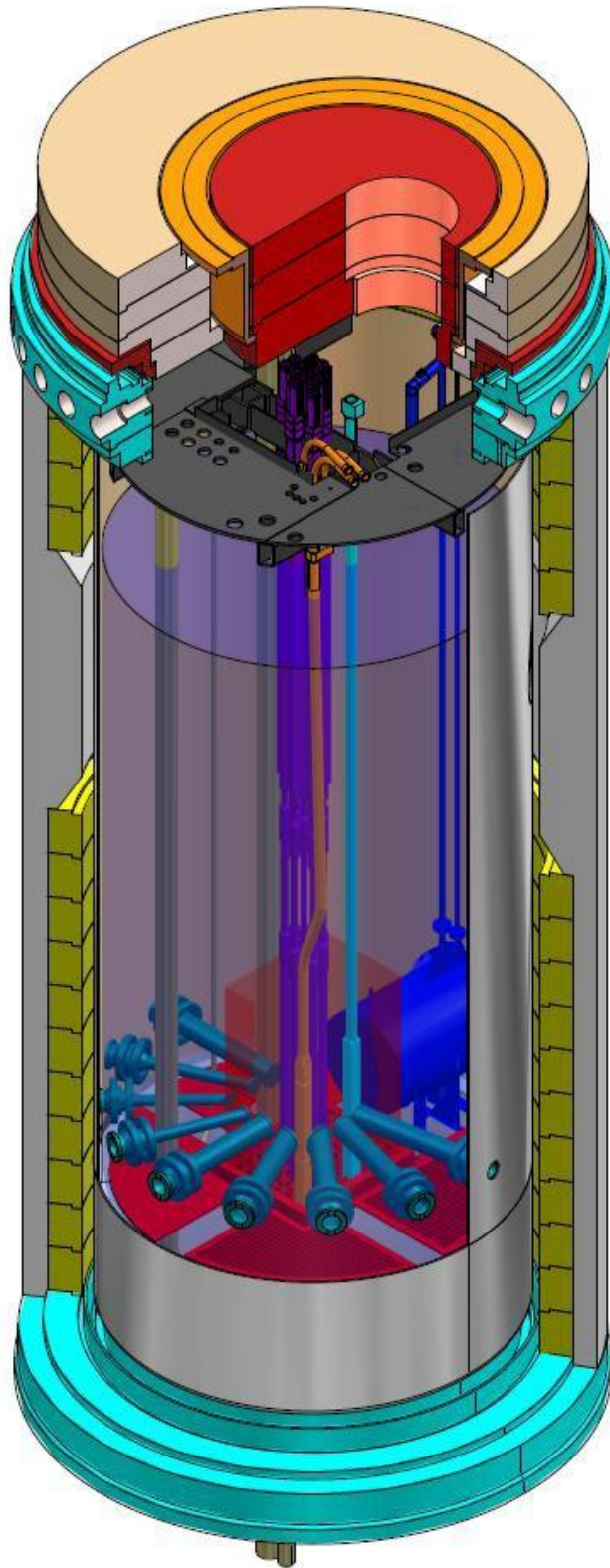
Jaderný reaktor LVR-15 je pro své vlastnosti a vybavení využíván nejen pro řadu výzkumných aplikací, ale nachází využití i v případě průmyslových aplikací. Příkladem průmyslového využití může být materiálový výzkum týkající se radiačního poškození součástí jaderných elektráren a fúzních reaktorů. Dále je jaderný reaktor LVR-15 pro korozní zkoušky materiálů a testování proudění v primárních okruzích jaderných elektráren. Na reaktoru LVR-15 je také možné provádět experimenty zahrnující neutronovou aktivační analýzu nebo argonové geologické datování. Mezi komerční aktivity prováděné na reaktoru LVR-15 patří výrobu radiofarmak a průmyslových zářičů, dotování křemíku metodou neutronové transmutace nebo radiační barvení drahokamů. Mimo aktivní zónu reaktoru, kde předchozí zmíněné činnosti probíhají, jsou vyvedeny horizontální kanály, které přivádějí svazek neutronů na další pracoviště. [11]

V Tabulce 6 jsou uvedeny základní technické parametry jaderného reaktoru LVR-15.

Tabulka 6: Základní technické parametry jaderného reaktoru LVR-15 [12]

Reaktorová nádoba	
Průměr	2300 mm
Výška	5760 mm
Tloušťka stěny	15 mm
Tloušťka dna	20 mm
Objem vody v nádobě	22 m ³
Hmotnost nádoby bez vody	7900 kg
Provozní podmínky	
Maximální tepelný výkon	10 MW
Maximální tepelný tok	10 ¹⁴ n·cm ⁻² ·s ⁻¹
Tlak	atmosférický
Teplota	Max. 56 °C
Palivo	
Typ	IRT-4M – trubkový, sendvičový
Aktivní délka	600 mm
Pokrytí	Al
Palivové jádro	UO ₂ + Al
Obohacení	19,75 % U ²³⁵
Řízení výkonu	
Regulační tyče 12 ks, 3 skupiny:	Kompenzační (8) Bezpečnostní (3) Automatický regulátor (1)
Absorbátor	B ₄ C

Na Obrázku 23 je schéma jaderného reaktoru LVR-15 s řezem reaktorovou nádobou, na obrázku jsou viditelné horizontální kanály vedoucí radiálně od aktivní zóny reaktoru.



Obrázek 23: Schéma jaderného reaktoru LVR-15 s řezem reaktorovou nádobou [12]

5.1.2 Experimentální vybavení jaderného reaktoru LVR-15

Součástí vybavení jaderného reaktoru LVR-15 jsou i tato experimentální zařízení [13]:

- Vysokotlaké vodní smyčky (RVS-3, BWR-2)
- Ozařovací sondy (standardní a speciální), vertikální ozařovací kanály široké stacionární o vnitřním průměru 62 mm, úzké stacionární a rotační o průměru 44 mm
- Vertikální kanály s rotací pro větší ozařovací pouzdra o průměru 115 mm
- Vertikální ozařovací kanály pro ozařování terčů IRE
- Pneumatická pošta pro krátkodobé ozařování vzorků
- Horizontální radiální kanály 9x
- Tepelná kolona
- Horké komory

Jelikož ne všechna uvedená experimentální zařízení jsou relevantní pro ozařovací experimenty, následující odstavce se věnují pouze těm, která pro ozařovací experimenty využít jdou.

Ozařovací sondy

Ozařovací sondy na jaderném reaktoru LVR-15 jsou využívány pro ozařování vzorků materiálů, kterými jsou nejčastěji součásti jaderných zařízení, které jsou dlouhodobě vystavovány radiaci. Například materiály tlakových nádob reaktorů. Na těchto vzorcích je tak možné simulovat řízené radiaci stárnutí vzorků v definovaném prostředí a za udržování stálé teploty. [13]

Součástí celého ozařovacího zařízení je kromě samotné ozařovací sondy také elektronická řídicí a měřicí aparatura, pomocná zařízení plynového hospodářství a řídicí jednotky. Samotná ozařovací sonda pak zahrnuje instrumentaci sloužící měření teploty a fluence rychlých a tepelných neutronů. Teplota uvnitř ozařovací sondy je díky její konstrukci regulovatelná. K regulaci teploty uvnitř ozařovací sondy tak dochází prostřednictvím radičního ohřevu, vlivem změny koncentrace plynů ve směsi tvořící ochrannou atmosféru nebo v případě nutnosti regulovanými topnými tělesy nacházejícími se přímo v sondě. Plyny, ze kterých se skládá ochranná atmosféra uvnitř ozařovací sondy jsou argon, helium a dusík. Odvod tepla ze sond probíhá prostřednictvím vody primárního okruhu jaderného reaktoru LVR-15. [13]

Ozařovací sondy používané na jaderném reaktoru LVR-15 mohou být rozděleny buď na standardní, nebo na speciální. V případě standardních ozařovacích sond dochází k používání trvalé části této sondy po celou dobu její životnosti. Speciální sondy jsou naopak po použití a ukončení experimentu demontovány a zničeny, jelikož byly navrženy a vyrobeny speciálně pro daný experiment. [13]

Velké vertikální kanály s rotací

Hliníkové vertikální kanály s vnitřním průměrem 67 mm a 115 mm jsou na jaderném reaktoru LVR-15 používány zejména pro ozařování vzorků o větších objemech, u kterých musí být zaručena rovnoměrnost ozáření v celém jejich objemu. Příklady takových ozařování jsou ozařování křemíku, radiační barvení drahokamů nebo výroba radiofarmak. Toto zařízení se skládá ze samotného vertikálního rotujícího kanálu, hnací jednotky a měřicí a řídicí aparatury. Rotace kanálu zajišťuje homogenitu ozáření v horizontálním směru, zatímco ve vertikálním směru je homogenita ozáření dosažena umístěním do místa s maximální hustotou neutronového toku a stíněním kanálu se stupňující se tloušťkou. [13]

Vertikální ozařovací kanály

Pokud ozařovací procedura nevyžaduje rovnoměrnost ozáření nebo větší rozměr kanálu, je možné využít buď rotační kanály s průměrem 44 mm, nebo stacionární kanály o průměru 62 mm. Vzorky ozařované v těchto kanálech mohou být buď uzavřeny v těsné hliníkové kapsli, nebo zataveny ve skle nebo v plastu. Tyto jsou následně vloženy do ozařovací schránky, která je vybavena nástavcem umožňující její uchopení a spuštění do ozařovacího kanálu zakládacím zařízením. [13]

Pneumatická pošta

V případě nutnosti krátkodobého ozařování vzorků s velmi malým objemem je možno využít pneumatickou potrubní poštu. Vzorky o hmotnosti od 50 mg do 200 mg jsou zataveny do polyethylenových kapslí, které se vloží do válcových polyethylenových pouzder. Pouzdro připravené pro ozáření je poté přibližně 3,5 s transportováno potrubím do ozařovacího kanálu, kde může setrvat 5 s až 10 minut. [13]

Horizontální kanály

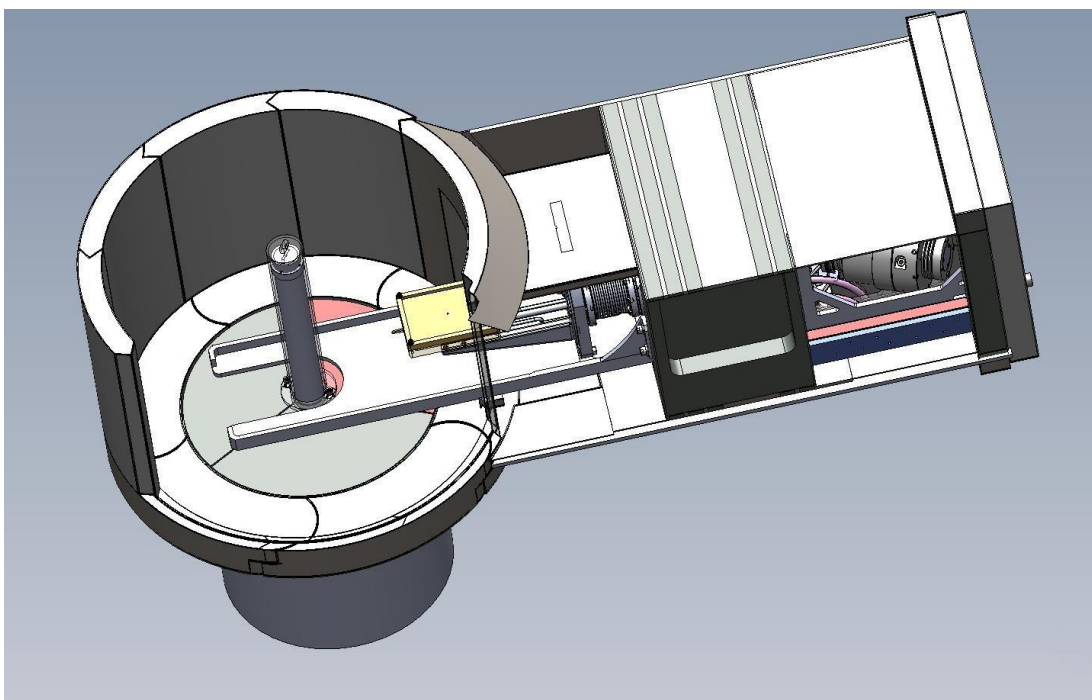
Pro ozařování mimo aktivní zónu jaderného reaktoru LVR-15 slouží 9 hliníkových radiálních horizontálních kanálů, které umožňují vyvádět svazky reaktorového záření mimo aktivní zónu. Kanály jsou přírubou připevněny k nádobě a v betonovém stínění reaktoru se nachází betonové uzávěry, kterými lze kanály otevírat a zavírat. Na vnějších koncích kanálů, z nichž 6 disponuje průměrem 100 mm a tři průměrem 60 mm se nachází experimentální zařízení. Kanály a experimentální zařízení jsou obklopeny stínicími materiály, které zajišťují, aby ani při otevřených kanálech nedošlo k ovlivnění radiační situace v reaktorové hale. [13]

5.2 Gama ozařovna

Zařízení sloužící pro studium vlivu gama záření v Centru výzkumu Řež s.r.o. je vybaveno uzavřeným zářičem ^{60}Co , který měl k 1.1.2020 hodnotu aktivity 157 TBq. Izotop kobaltu ^{60}Co vyzařuje dvě kvanta gama záření o energiích 1173 keV a 1333 keV. Část vyzářených gama fotonů je absorbována již v ocelovém pouzdře zářiče, kde dochází k produkci elektronů, tedy beta záření. V gama ozařovně tak dochází k ozařování směsným polem fotonů a elektronů. Dávkový příkon se pohybuje v intervalu od přibližně od 0,1 kGy/h po 10 kGy/h. Ozařovací zařízení nabízí široké

možnosti při provádění experimentů. Teplota ozařování se může pohybovat v rozmezí od -196 °C až po 400 °C a je možná její změna během průběhu experimentu. Tlak při ozařování může být snížen až na hodnoty hlubokého vakua. V možnostech prováděných experimentů je také použití inertní atmosféry z argonu nebo dusíku. Možná je také vizuální kontrola ozařovaného vzorku v průběhu experimentu, ale nespornou výhodou při testování elektronických součástek je poté možnost on-line monitorování. [14] [15]

Na Obrázku 24 se nachází vnitřní schéma vysokoaktivní kobaltové ozařovny.



Obrázek 24: Vnitřní schéma vysokoaktivní kobaltové ozařovny

5.3 Diskuse možností provedení experimentu

Ozařovací experiment je možné provést v několika podobách, které se budou lišit ve způsobu vyhodnocování, použitým zdrojem záření a přístupem ke zkoumání vlivu na elektronické součástky. Jak se tyto možnosti liší je vypsáno v Tabulce 7.

Tabulka 7: Možnosti ozařovacích experimentů

	Možnost 1	Možnost 2
Způsob vyhodnocování	Off-line	On-line
Použitý zdroj záření	LVR-15	Gama ozařovna
Množství součástek	Jednotlivé součástky	Větší celky

Kombinací možností v Tabulce 7 je možné sestavit celkem 8 způsobů, jakými lze experiment provést. Jsou jimi:

- Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním
- Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s on-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků v gama ozařovně s on-line vyhodnocováním
- Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s off-line vyhodnocováním
- Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s off-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků na reaktoru LVR-15 s off-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků v gama ozařovně s off-line vyhodnocováním

Následující odstavce se věnují rozboru experimentů s některými kombinacemi.

5.3.1 Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním

Výzkumný jaderný reaktor LVR-15 slouží jako směsný zdroj neutronového a gama záření v širokém spektru energií. Za nejvhodnější experimentální zařízení nacházející se na reaktoru LVR-15 použitelné pro tento typ experimentu považuje autor práce horizontální kanály sloužící k vyvedení reaktorového záření radiálním směrem od aktivní zóny reaktoru. Výhodou použití horizontálních kanálů je možnost co největšího snížení vzdálenosti ozařované součástky od vyhodnocovací aparatury, jelikož je tím snížena délka propojovacího kabelu, čímž je omezeno rušení a případné narušování komunikace mezi vyhodnocovacím zařízením a ozařované součástky. Vyhodnocování je možné provést použitím mikropočítače, jež by byl naprogramován na snímání hodnot napětí na vstupních a výstupních pinech zkoumané součástky. V případě ozařování elektronických paměťových prvků je pro vyhodnocování použít zařízení specializovaných na programování a vyčítání elektronických pamětí. Vyčítání stavu součástky v rozmezí vhodně zvoleného časového intervalu poté vytvoří závislost funkčnosti součástky na čase ozařování. Použití on-line vyhodnocovacích metod skýtá výhodu také ve snížení počtu součástek potřebných pro získání relevantních dat. Ozáření již jedné součástky je možné získat prvotní data, která budou dalšími měřeními dále zpřesňována. Nevýhodou on-line vyhodnocování je již zmíněná možnost narušování komunikace mezi testovanou součástkou a vyhodnocovací aparaturou. Další nevýhodou je nemožnost oddělení neutronového a gama záření, čímž není možné zkoumání vlivu samotného neutronů. Jednotlivými součástkami jsou myšleny například řadiče motorů, řadiče LED, napájecí zdroje, nebo vybrané součásti použité v řídicím počítači BeagleBone.

5.3.2 Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s on-line vyhodnocováním

Použití gama ozařovny jako zdroje záření umožňuje zúžit experiment pouze na pozorování vlivů gama záření, které zářič ^{60}Co produkuje na energiích 1173 keV a 1333 keV. Elektronový proud vznikající v ocelovém pouzdře zářiče je zastaven již v plastovém obalu součástek a na funkčnost by tak neměl mít vliv. Pokud by ovšem elektrony dokázaly projít obalem součástky, jejich vliv by byl v porovnání se zářením gama zanedbatelný. Jelikož gama ozařovna umožňuje on-line monitorování veličin ozařovaného vzorku, je i v tomto případě možné provádět vyhodnocování propojením ozařované součástky s vyhodnocovací aparaturou. V případě gama ozařovny, kde je možné měnit dávkový příkon je také možné studium vlivu záření na elektronické prvky v závislosti právě na dávkovém příkonu. Výhody tohoto způsobu provedení experimentu jsou shodné s výhodami použití reaktoru LVR-15 jako zdroje záření, tedy možnost zkrácení kabelového propojení součástky s vyhodnocovací aparaturou a tím omezení rušení a narušování komunikace zářením, nebo snížení počtu potřebných součástek použitím on-line vyhodnocování. Ačkoliv je tak rušení omezeno, není úplně vyloučeno a zůstává tak i nevýhodou. Oproti použití reaktoru LVR-15 však odpadá nevýhoda oddělení gama a neutronového záření, jelikož v gama ozařovně neutrony produkovány prakticky nejsou. Jednotlivými součástkami jsou stejně jako v přechodném případě myšleny například řadiče motorů, řadiče LED, napájecí zdroje a jednotlivé součástky použité v řídicím počítači BeagleBone.

5.3.4 Ozařování větších celků na reaktoru LVR-15 s on-line vyhodnocováním

V tomto případě by se opět jednalo o studium vlivu neutronového a gama záření. Opět by bylo využito horizontálních kanálů pro vyvedení reaktorového záření a vyhodnocování by probíhalo během ozařování. Rozdílem oproti použití jednotlivých součástek je v tomto případě většího počtu propojených součástek, za které lze třeba považovat celý řídicí mikropočítač BeagleBone, případně propojení více součástek na základní desce. Výhodou provedení experimentu s většími celky je možnost sledování komplexního chování ucelené části robotického manipulátoru v prostředí se zvýšenými dávkovými příkony. Jako vyhodnocovací aparatura by mohl být použit nejen specializovaný mikropočítač nebo programátor elektronických pamětí, ale také standardní aparatura používaná k ovládní manipulátoru. V případě ozařování větších celků je také potřeba upravit rozměry ozařované soustavy, aby odpovídaly rozměrům otvorů v horizontálních kanálech. Další výhody a nevýhody on-line vyhodnocování a použití reaktoru LVR-15 jako zdroje záření jsou stejné jako v předchozích odstavcích.

5.3.5 Ozařování jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 s off-line vyhodnocováním

Off-line vyhodnocování ozařovaných součástek spočívá v ozáření součástek, jejichž stav je vyhodnocen až po jejich vytažení z proudu částic. V principu je možné opět použít jednu součástku, která bude po vyhodnocení opět vrácena k ozařování a následně opět vytahována, vyhodnocována a ozařována. Druhou možností je použití několika součástek, které jsou do svazku částic reaktorového záření vloženy ve stejnou dobu a následně ve stanovených intervalech vytahovány, vyhodnoceny a ponechány

již mimo další ozařování. Použití off-line vyhodnocování opět má své výhody a nevýhody. Primární nevýhodou, která vyvstává pouze v případě jediného ozařovacího cyklu na každou součástku, je výrazně větší počet potřebných součástek k provedení celého experimentu a získání relevantních dat. Další nevýhodou je nepřesnost nalezení okamžiku, kdy dojde ke ztrátě funkčnosti součástky. Je tak nalezen pouze přibližný interval, kdy ke ztrátě funkčnosti došlo, a následně je v případě potřeby tento interval zpřesnit. Zpřesnění může být provedeno buď snížením časového kroku mezi vyhodnocováními součástek v okolí zjištěného intervalu, což opět vede k nárůstu počtu potřebných součástek, nebo použitím on-line vyhodnocovacích metod. Výhodou použití off-line vyhodnocovacích metod je možnost vyhodnocení stavu ozářených součástek až s časovým odstupem od ozáření, je tak možné provést ozařování, použité součástky přenést na jiné pracoviště, a tam až provést vyhodnocení. Odpadá tak nutnost přítomnosti vyhodnocovací aparatury v blízkosti ozařovacího pracoviště. Výhodou off-line vyhodnocování je také možnost jejího použití v případě příliš velké interference používaného svazku záření s on-line vyhodnocovací aparaturou, jelikož taková aparatura nemusí být při ozařování přítomná. Další výhody a nevýhody mohou být opět převzaty z předchozích odstavců zmiňujících použití jaderného reaktoru LVR-15 jako zdroje záření. Jedinou nevýhodou reaktoru LVR-15, která se v případě on-line vyhodnocování nemusí projevit, je indukovaná radioaktivita způsobená neutronovou transmutací. V případě on-line vyhodnocování není nutný kontakt pracovníka provádějícího experiment se součástkou, zatímco v případě off-line vyhodnocování musí být alespoň z části zajištěno člověkem.

5.3.5 Ozařování jednotlivých součástek v gama ozařovně s off-line vyhodnocováním

V případě použití gama ozařovny pro ozáření jednotlivých součástek oproti reaktoru LVR-15 odpadá zejména nevýhoda indukované radioaktivity, jelikož zdrojem použitým v gama ozařovně neutrony prakticky produkovány nejsou. Zbývající výhody, nevýhody a způsob provedení experimentu lze převzít z návrhu experimentu s ozařováním jednotlivých součástek na reaktoru LVR-15 a provést pouze nutné adaptace na provedení experimentu v prostředí gama ozařovny.

5.3.6 Ostatní kombinace

Výhody, nevýhody, provedení a doporučení pro experimenty s kombinacemi nediskutovanými v předchozích odstavcích, tedy

- Ozařování větších celků v gama ozařovně s on-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků na reaktoru LVR-15 s off-line vyhodnocováním
- Ozařování větších celků v gama ozařovně s off-line vyhodnocováním

Lze odvodit z kombinací výhod, nevýhod a provedení zmíněných u diskutovaných kombinací možností provedení experimentálního ověření.

Jediným dodatkem mohou být zvýšené dávkové příkony způsobené opět vlivem indukované radioaktivity v případě ozařování větších celků na reaktoru LVR-15, které jsou způsobené ozářením většího množství materiálu.

5.4 Vyhodnocení obdržených dávek

Dávku obdrženou v průběhu ozařování je možné změřit velkou škálou dozimetrů, a to jak těch, které dávku a dávkový příkon vyhodnocují on-line, tak těch, které jsou vyhodnoceny off-line. V případě kombinace on-line vyhodnocovaných dozimetrů a on-line vyhodnocování stavu součástek je možné přesně odečíst dávku obdrženou v momentě ztráty funkčnosti součástky. Kombinace on-line dozimetru a off-line vyhodnocování dávku určuje jen přibližně, jelikož není ihned přesně určen čas, kdy dojde k selhání součástky. Při použití off-line dozimetru a on-line je potřeba pro přesné změření dávky vedoucí k selhání vytáhnout součástku a dozimetr co nejdříve po zjištění nefunkčnosti součástky, jelikož její další setrvání v poli záření by vedlo k zvýšení změřené dávky, která by ovšem neodpovídala realitě. Kombinace off-line dozimetru a off-line vyhodnocování neskýtá žádná úskalí, jelikož v momentě odstranění součástky, jejíž stav je v tu dobu neznámý, z pole záření dochází i k zastavení měření obdržené dávky. Pro off-line vyhodnocování obdržené dávky se jako vhodný typ dozimetru jeví termoluminiscenční dozimetry, které dokážou měřit dávku obdrženou jak od gama záření, tak od neutronů, což je výhodou zejména při ozařování v jaderném reaktoru LVR-15.

5.5 Návrh experimentu

Autorovi této diplomové práce se, vzhledem ke zkušenostem s ozařovacími experimenty zahrnujícími elektroniku provedenými v jeho bakalářské práci, jeví jako nejvhodnější provedení experimentu s off-line vyhodnocováním výsledků. Názor vhodnosti off-line vyhodnocování je založen zejména na negativních zkušenostech s on-line metodami vyhodnocování stavu součástek z průběhu experimentů ze zmíněné bakalářské práce. Jako zdroj záření je vhodné použít jak jaderný reaktor LVR-15, tak gama ozařovnu, aby mohl být studován vliv neutronového i gama záření. Ozařovány by byly jednotlivé součástky uvedené v Tabulce 5, které by mohly být ve větším počtu kusů jednoho typu vloženy do horizontálního kanálu reaktoru LVR-15 nebo do gama ozařovny. Následně by vždy v předem určených časových intervalech byl jeden kus vytažen a byl by vyhodnocen jeho stav a funkčnost. V případě nálezů poškozeného kusu by se následně časový interval v okolí času ukončení ozařování rozdělil na více časových úseků, které by dovolily zpřesnit dobu ozařování vedoucí ke ztrátě funkčnosti součástky. V těchto nových časových úsecích by následně proběhl nový cyklus ozařování, kterým by se zpřesnila doba ozařování vedoucí ke ztrátě funkčnosti. K vyhodnocení dávky potřebné ke ztrátě funkčnosti by byly použity termoluminiscenční dozimetry, které by byly připevněny k jednotlivým ozařovaným součástkám. Tento postup by se následně aplikoval na všechny typy součástek uvedených v Tabulce 5.

Jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, ozařovací experimenty s off-line vyhodnocováním stavu jsou nevýhodné zejména z pohledu počtu potřebných součástek pro provedení experimentu. Autor této diplomové práce je však přesvědčen, že tato nevýhoda je dostatečně vykompenzována dostatečnou jednoduchostí praktického provedení experimentu, jednoduchostí následného vyhodnocení, ale zejména relativní jistotou získaných výsledků, které mohou v případě on-line

vyhodnocování být zkresleny interferencí záření s částmi on-line vyhodnocovací aparatury.

6 Teoretické ověření radiační odolnosti robotického manipulátoru

6.1 Výpočet vlivu neutronové transmutace

Izotop křemíku ^{30}Si může absorbovat neutron, čímž dojde k přeměně jádra na ^{31}Si . Takto nově vzniklé jádro je ovšem radioaktivní a beta mínus rozpadem s poločasem 2,62 h se přeměňuje na ^{31}P . Fosfor je pro polovodičové součástky speciální v tom, že se používá pro dotování křemíku pro získání N vodivosti. Vznik příliš velkého množství fosforu působením neutronového záření v P vodivém křemíku může mít za následek až změnu vodivosti křemíku z P na N, což nevyhnutelně znamená úplnou ztrátu funkčnosti postiženého prvku.

V následujících odstavcích je provedeno teoretické odvození doby potřebné pro ztrátu funkčnosti polovodičové součástky s P vodivým křemíkem.

Výpočet vychází z předpokladu, že se koncentrace jader na jednotku objemu s časem mění jako záporně vzatá reakční rychlost úbytku těchto jader. V matematickém zápisu se tedy jedná o následující vztah:

$$\frac{dN}{dt} = -F \quad (2)$$

kde N je hustota jader v atomech/cm³, t je čas v sekundách a F je reakční rychlost s jednotkou 1/cm³/s. Fyzikální rozměr je stejný na obou stranách rovnice, jelikož atomy nejsou definovány jako žádná fyzikální veličina.

Pro reakční rychlost F platí vztah:

$$F = \Sigma\phi \quad (3)$$

kde Σ je makroskopický účinný průřez s rozměrem 1/cm a ϕ je hustota toku neutronů s rozměrem 1/cm²/s.

Dále pro makroskopický účinný průřez platí vztah:

$$\Sigma = \sigma N \quad (4)$$

kde σ je mikroskopický účinný průřez s rozměrem cm² a N je opět hustota jader. Jelikož existují mikroskopické účinné průřezy pro velkou škálu reakcí, je nutné upřesnit, že v tomto výpočtu bude používán mikroskopický účinný průřez pro absorpci neutronů.

Dosazením vztahů (3) a (4) do rovnice (2) se rovnice změní do tvaru:

$$\frac{dN}{dt} = -\sigma\phi N \quad (5)$$

Diferenciální rovnici (5) je možné vyřešit metodou separace proměnných a získat tak její řešení ve tvaru:

$$\ln(N) = -\sigma\phi t + C \quad (6)$$

Umocněním Eulerova čísla na levou stranu rovnice a porovnáním tohoto výsledku s Eulerovým číslem umocněným na pravou stranu rovnice vznikne vztah:

$$e^{\ln(N)} = e^{-\sigma\phi t + C} \quad (7)$$

který se jednoduchou úpravou změní na tvar:

$$N(t) = e^C e^{-\sigma\phi t} \quad (8)$$

Nyní je nutné vyřešit konstantu e^C , kterou je možné získat z počáteční podmínky, která tvrdí, že v čase 0 s je hustota jader rovná původní koncentraci jader neboli:

$$N(0) = N_0 \quad (9)$$

Vyřešením této počáteční podmínky vyjde:

$$e^C = N_0 \quad (10)$$

a vztah pro výpočet v hustoty jader v závislosti na čase tak získává tvar:

$$N(t) = N_0 e^{-\sigma\phi t} \quad (11)$$

Za předpokladu, že ke kompenzaci jednoho atomu P dotujícího prvku postačuje právě jeden vzniklý atom ^{31}Si je podmínka pro určení času ozařování potřebnému pro změnu P vodivosti na N vodivost:

$$N_{31\text{Si}} = N_{P\text{dot}} \quad (12)$$

Hustota jader ^{31}Si se určí jako rozdíl původní hustoty jader mínus nová hustota jader závislá na čase:

$$N_{31\text{Si}}(t) = N_{30\text{Si}0} - N_{30\text{Si}0} e^{-\sigma\phi t} \quad (13)$$

Porovnáním s hustotou jader vznikne vztah:

$$N_{30\text{Si}0} - N_{30\text{Si}0} e^{-\sigma\phi t} = N_{P\text{dot}} \quad (14)$$

ze kterého lze vyjádřit čas potřebný k ozařování jako:

$$t = -\frac{1}{\sigma\phi} \ln\left(1 - \frac{N_{P\text{dot}}}{N_{30\text{Si}0}}\right) \quad (15)$$

6.1.1 Praktický příklad výpočtu

V tomto příkladu bude jako P dotující prvek použit bor. Ze znalosti hustoty $\rho=2,329 \text{ g/cm}^3$ [16], molární hmotnosti křemíku $M=28,085 \text{ g/mol}$ [16], atomového podílu ^{30}Si v přírodním křemíku $a_i=0,0308$ a Avogadrovy konstanty N_a lze určit hustotu jader ^{30}Si ze vztahu:

$$N_{30\text{Si}0} = a_i \frac{\rho N_a}{M} \quad (16)$$

Hustota jader ^{31}Si byla ze vztahu (16) vypočtena jako:

$$N_{30Si0} = 1,54 \times 10^{21} \text{ atomů/cm}^3$$

Při předpokladu maximální hustoty toku tepelných neutronů v reaktoru LVR-15 $\phi=10^{14}$ neutronů/cm²/s z Tabulky 6, mikroskopického účinného průřezu pro absorpci na ³⁰Si při energii tepelných neutronů $E = 0,0253$ eV $\sigma=0,107 \times 10^{-24}$ cm² [3] a typické hodnoty hustoty jader dotujícího boru jako $N_B = 10^{15}$ 1/cm³ [17] lze vypočítat podle vztahu (15) čas potřebný ke změně vodivosti z P na N jako:

$$t = -\frac{1}{0,107 * 10^{-10}} \ln \left(1 - \frac{10^{15}}{1,54 * 10^{21}} \right) = 60\,686,99 \text{ s} = 16,86 \text{ h} = 0,7 \text{ dne}$$

6.2 Numerický výpočet vlivu gama záření

K teoretickému určení vlivu gama záření na robotický manipulátor byl využit program MCNP, konkrétněji jeho verze MCNPX. Celý název Monte Carlo N-Particle Transport naznačuje, že tento výpočetní kód využívá metody Monte Carlo pro numerické simulace vzniku a transportu částic a záření. MCNP nachází využití v širokém spektru aplikací, které zahrnují například výpočty kritických stavů aktivních zón jaderných reaktorů nebo návrh detektorů záření. MCNP umožňuje simulovat také zdroje různých druhů záření a následné interakce s definovaným trojrozměrným modelem hmoty, a proto byl zvolen jako vhodný výpočetní kód pro teoretické ověření vlivu gama záření na robotický manipulátor.

6.2.1 Zjednodušený model manipulátoru

Vzhledem k poměrně složitému tvaru prakticky všech částí robotického manipulátoru bylo nutné provést při vytváření trojrozměrného modelu pro výpočetní kód MCNP provést několik zjednodušení. V první řadě nebyly do modelu zahrnuty součásti bez přímého vlivu na radiační odolnost elektronických součástí manipulátoru. Těmito vynechanými součástmi jsou zejména:

- Víko základní jednotky
- Podvozek
- Motory
- Převodovky
- Veškeré kabelové vybavení manipulátoru
- Modul kamery

Naopak, součástmi manipulátoru, které byly vyhodnoceny jako významné pro hodnocení radiační odolnosti elektronických částí manipulátoru, jsou:

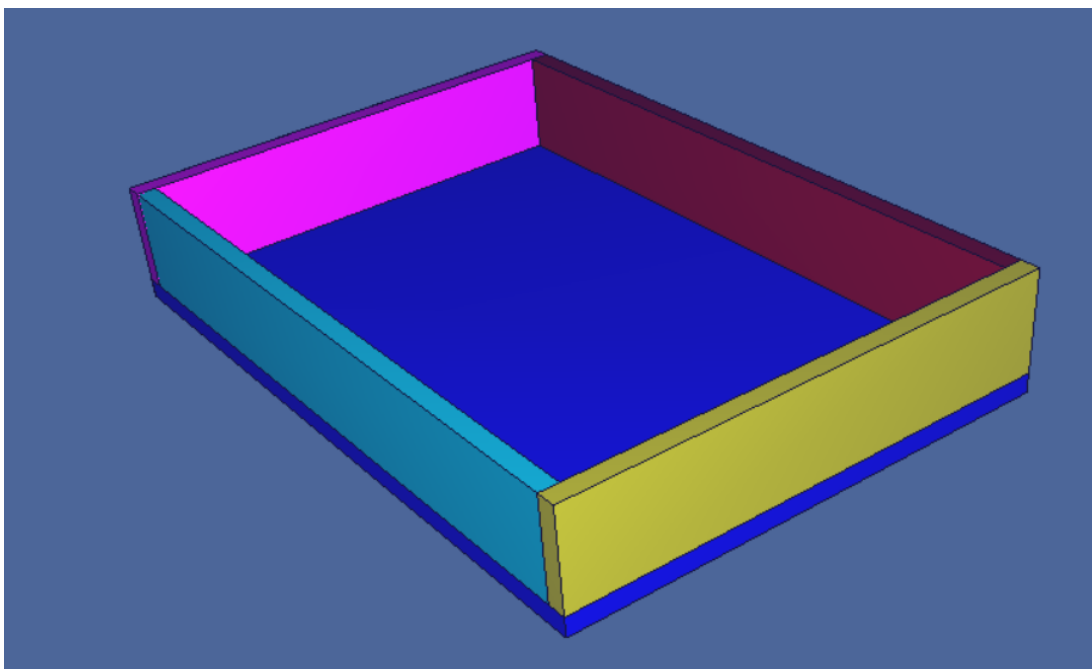
- Skříň pohonné jednotky
- Základní deska plošných spojů manipulátoru
- Deska plošných spojů řídicího počítače
- Elektronické součásti uvedené v Tabulce 5 mimo řadiče LED

Skříň pohonné jednotky byla vyhodnocena jako významná pro radiační odolnost vzhledem k možnosti odstínění části záření.

Tvar skříně pohonné jednotky byl zjednodušen na dutou nádobu ve tvaru kvádrů s vnějšími rozměry 220 mm (délka, osa X) na 152 mm (šířka, osa Z) na 37 mm (hloubka, osa Y) s tloušťkou stěn 6 mm. Nádoba je otevřená z horní strany přes plochu s nejvyšším obsahem a vnitřní rozměry nádoby jsou 208 mm (délka) na 140 mm (šířka) na 31 mm (hloubka). Rozměry zjednodušeného modelu byly zvoleny s ohledem na reálné rozměry skříně pohonné jednotky uvedené v technické zprávě robotického manipulátoru [6]. Jako materiál byl stejně jako v případě reálné předlohy zvolen hliník. Těleso skříně se v zjednodušeném modelu skládá z pěti buněk, kterými jsou:

- Dno skříně
- Přední stěna
- Zadní stěna
- Levá boční stěna
- Pravá boční stěna

Vzhled trojrozměrného zjednodušeného modelu skříně je vyobrazen na Obrázku 25.

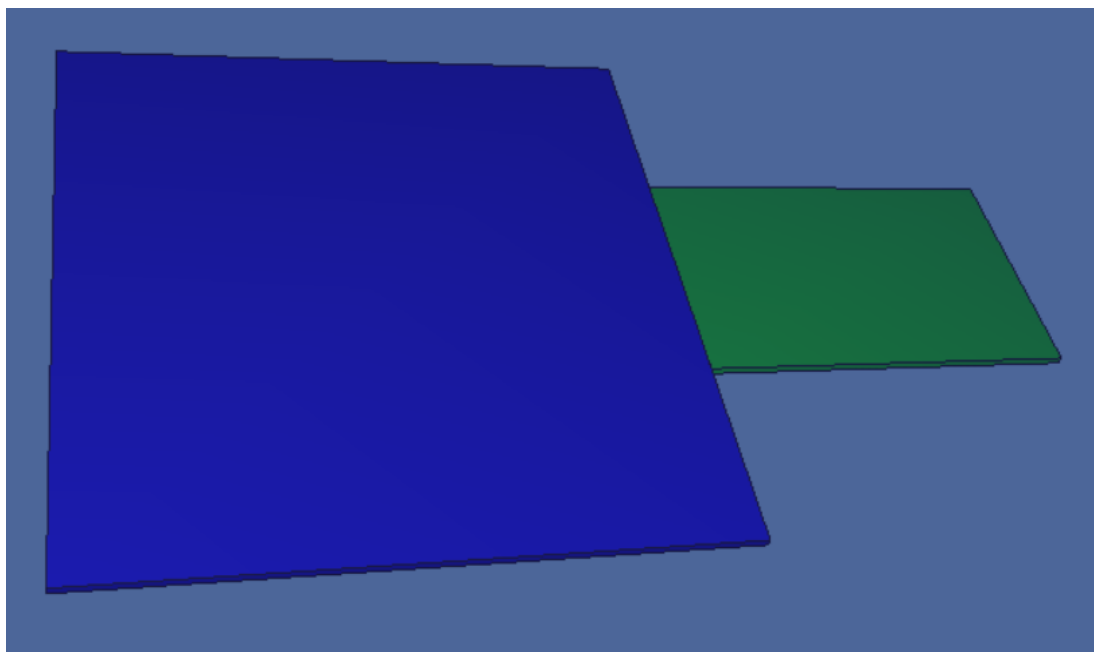


Obrázek 25: Vzhled zjednodušeného modelu skříně

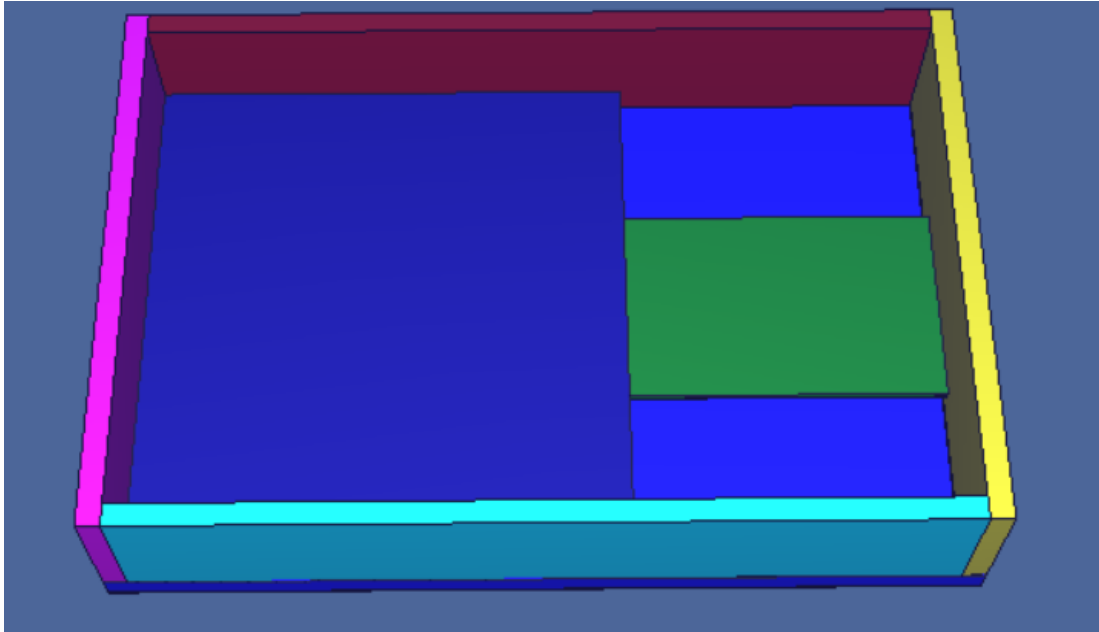
Tvar základní desky plošných obvodů manipulátoru byl zjednodušen na dvě části ve tvaru plochého kvádrů vzájemně se dotýkající jednou stranou a zároveň se dotýkající bočních stěn skříně pohonné jednotky manipulátoru. První část disponuje rozměry 81,9 mm (délka) na 54,9 mm (šířka) na 1,57 mm (hloubka) a je umístěna v přední části skříně pohonné jednotky rovnoběžně s dnem skříně, boční stěny první části se obě nacházejí ve stejné vzdálenosti od stěn skříně. Vzdálenost dolní strany

první části od horní části dna skříně byla zvolena 5 mm. Druhá část základní desky plošných obvodů manipulátoru disponuje rozměry 126,1 mm (délka) na 140 mm (šířka) na 1,52 mm hloubka a je umístěna v zadní části skříně pohonné jednotky rovnoběžně s dnem skříně, boční stěny druhé části se přímo dotýkají stěn skříně. Vzdálenost dolní strany druhé části od horní části dna byla zvolena 5 mm. Délka a šířka první i druhé části byly zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly reálným rozměrům základní desky uvedených v technické zprávě manipulátoru. Hloubka byla zvolena podle nejčastější tloušťky desek plošných obvodů [18]. Materiálem pro základní desku plošných obvodů byla zvolena molekula obsahující jeden atom kyslíku, dva atomy uhlíku a čtyři atomy vodíku, což je nejjednodušší molekula epoxidových pryskyřic, které se často využívají pro výrobu plošných spojů [19]. Zjednodušený model základní desky se tak skládá ze dvou buněk.

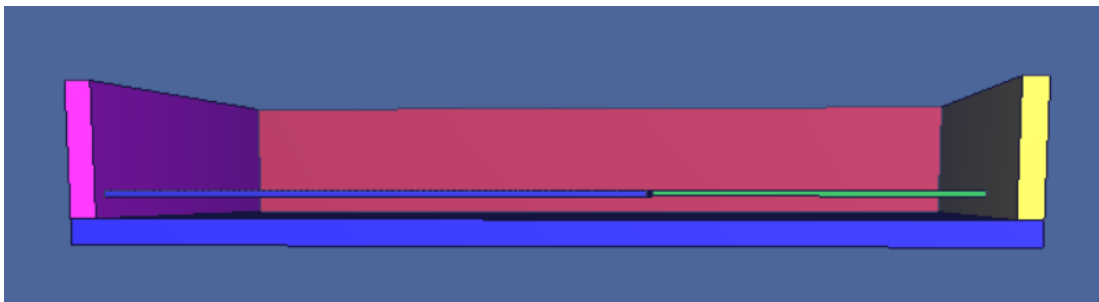
Na Obrázku 26 jsou vyobrazeny obě části zjednodušeného modelu základní desky a na Obrázcích 27 a 28 je vymodelovaná základní deska vyobrazena v kontextu skříně pohonné jednotky.



Obrázek 26: Zjednodušený model základní desky



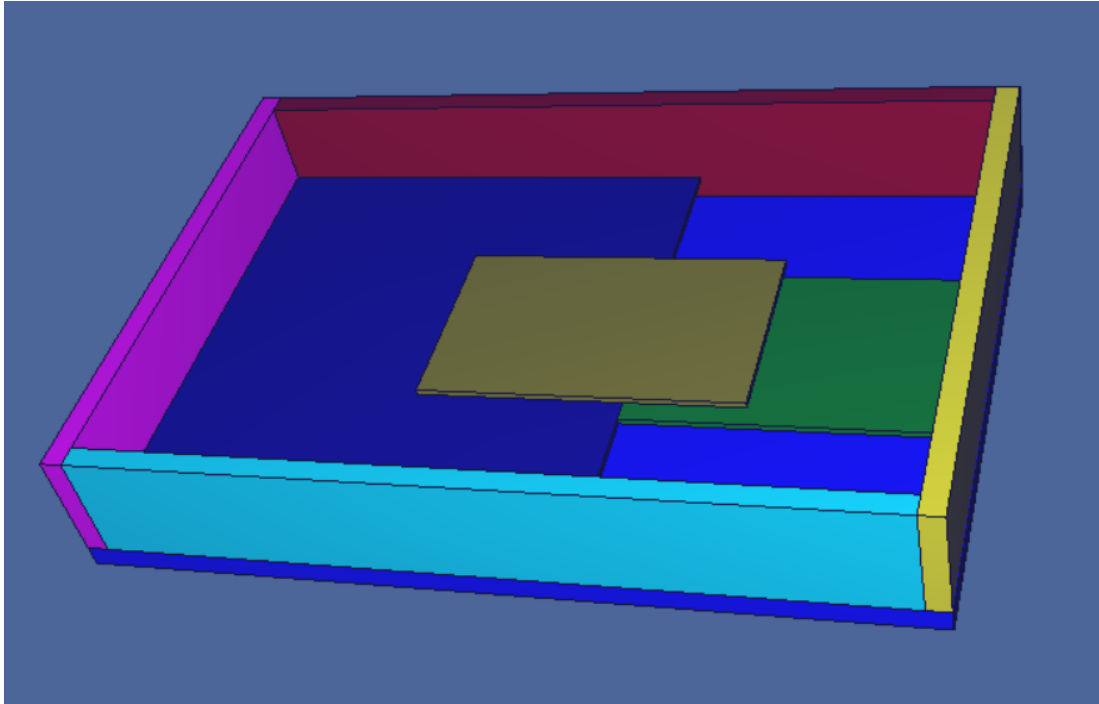
Obrázek 27: Základní deska ve skříňi pohonné jednotky, pohled shora



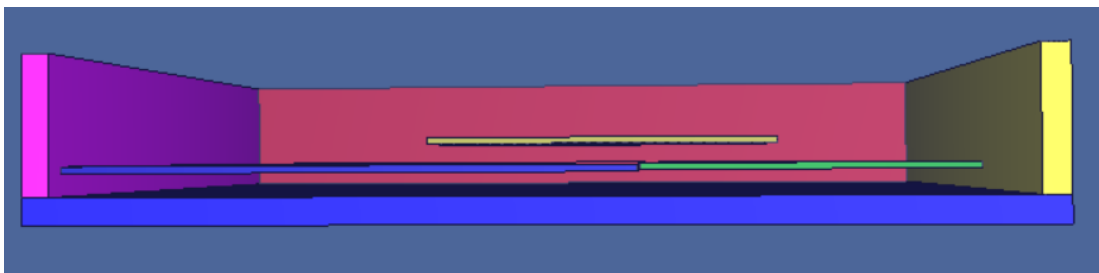
Obrázek 28: Základní deska ve skříňi pohonné jednotky, pohled z boku

Tvar desky plošných spojů řídicího počítače byl zjednodušen na plochý kvádr disponující rozměry 86,36 mm (délka) na 53,34 mm (šířka) na 1,57 mm (hloubka). Šířka a délka byly zvoleny přepočtením údajů z Tabulky 1 z palců na milimetry, hloubka byla zvolena podle nejčastější tloušťky desek plošných spojů. Vzdálenost dolní strany desky plošných spojů řídicího počítače byla zvolena 5 mm a deska je situována rovnoběžně s dnem skříňe pohonné jednotky. Přední strany desky počítače je vzdálena 48,5 mm od přední strany skříňe pohonné jednotky. Materiálem pro desku plošných obvodů řídicího počítače byla zvolena molekula obsahující jeden atom kyslíku, dva atomy uhlíku a čtyři atomy vodíku, což je základní molekula epoxidových pryskyřic, které se často využívají pro výrobu plošných spojů [19]. Zjednodušený model desky řídicího počítače se tak skládá z jedné buňky.

Na Obrázcích 29 a 30 je vyobrazeno umístění desky plošných spojů řídicího počítače ve skříňi pohonné jednotky.



Obrázek 29: Umístění desky řídicího počítače ve skříni, pohled shora



Obrázek 30: Umístění desky řídicího počítače ve skříni, pohled z boku

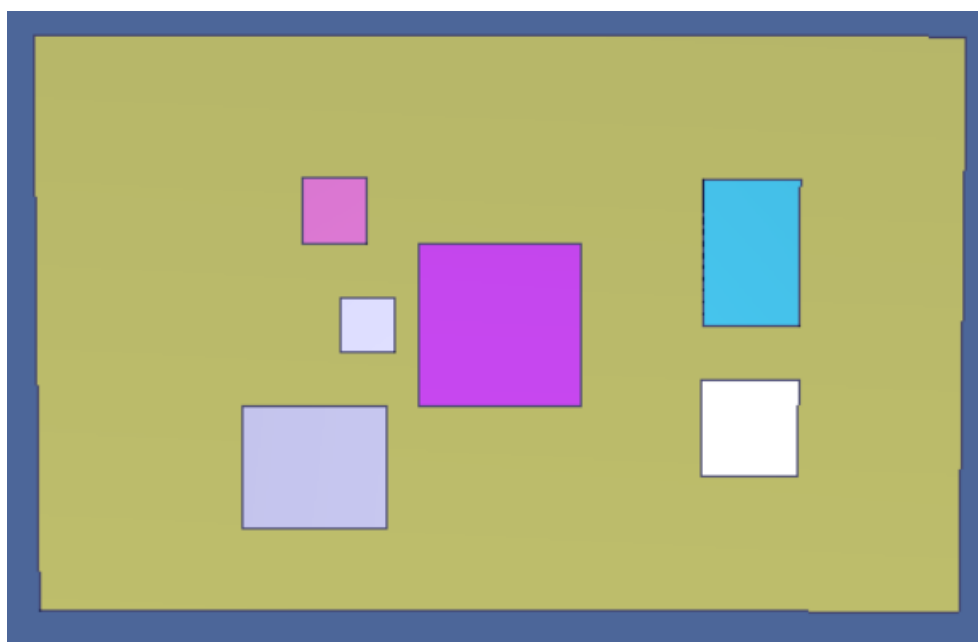
Na základní desku plošných spojů a desku plošných spojů byly následně přidány jednotlivé elektronické součástky zmíněné v Tabulce 5 mimo řadiče LED. Model součástek byl zjednodušen na velmi plochý křemíkový kvádr s šířkou a délkou odpovídající rozměrům v dokumentaci součástek a hloubka křemíkové vrstvy byla zvolena 250 μm jako běžná hodnota, v jejíž blízkosti se tloušťky křemíkových vrstev pohybují [20]. Vzdálenost křemíkových vrstev od desek plošných spojů byla zvolena jako 0,5 mm a vrstvy jsou orientovány rovnoběžně s deskami plošných spojů. Pozice jednotlivých součástek byly zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly pozicím součástek na reálné předloze.

Výčet součástek, jejich rozměry, plocha a umístění jsou uvedeny v Tabulce 8.

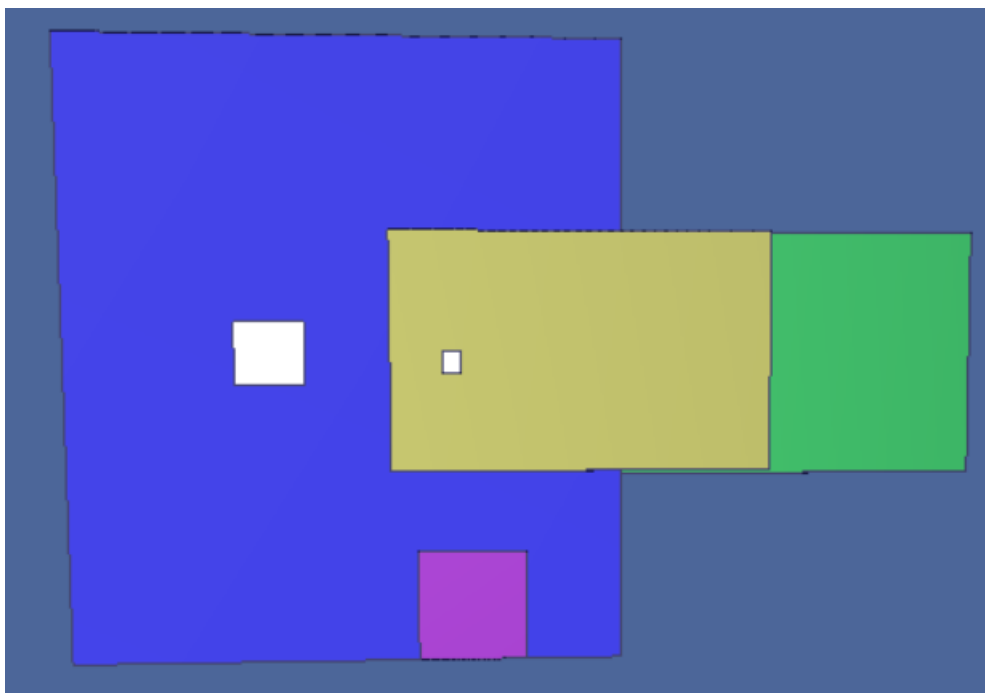
Tabulka 8: Parametry umístění elektronických součástek

Typ součástky	Rozměry [cm]	Plocha [cm ²]	Umístění
Řadič motorů	1,59 na 1,42	2,2578	Horní strana základní desky
Napájecí zdroj	2,5 na 2,5	6,25	Horní strana základní desky
Procesor ŘP	1,5 na 1,5	2,25	Dolní strana desky ŘP
SDRAM ŘP	0,9 na 1,35	1,215	Dolní strana desky ŘP
FLASH paměť ŘP	1,15 na 1,3	1,495	Dolní strana desky ŘP
Ethernetový transceiver ŘP	0,5 na 0,5	0,25	Dolní strana desky ŘP
Napájení procesoru ŘP	0,6 na 0,6	0,36	Dolní strana desky ŘP
HDMI transmitter ŘP	0,9 na 0,9	0,81	Dolní strana desky ŘP
Regulátor napětí ŘP	0,49 na 0,391	0,19159	Horní strana desky ŘP

Rozmístění součástek na deskách plošných spojů je vyobrazeno na Obrázcích 31 a 32.



Obrázek 31: Rozmístění součástek na spodní straně desky řídicího počítače



Obrázek 32: Rozmístění součástek na horních stranách desek plošných spojů

Celkový počet buněk zjednodušeného modelu robotického manipulátoru je 17 a jejich výpis je uveden v Tabulce 9.

Tabulka 9: Výpis všech buněk zjednodušeného modelu

Číslo buňky	Součást modelu
1	Dno skříně
2	Přední stěna skříně
3	Zadní stěna skříně
4	Levá boční stěna skříně
5	Pravá boční stěna skříně
6	Přední část základní desky
7	Zadní část základní desky
8	Deska řídicího počítače
9	Procesor
10	RAM
11	HDMI transmitter
12	FLASH paměť
13	Ethernetový transceiver
14	Napájení procesoru
15	Napěťový regulátor
16	Řadič motorů
17	Napájecí zdroj

6.2.2 Nastavení výpočtu

Jako zdroj částic byl použit plošný zdroj s uniformním rozložením generovaných částic. Zdroj se nacházel v rovině X-Z, což je plocha rovnoběžná s dnem skříně pohonné jednotky, ve vzdálenosti 30 mm od spodní strany dna skříně pohonné

jednotky. Bylo provedeno 9 výpočtů, tedy pro každou zkoumanou součástku jeden, přičemž se v každém výpočtu zdroj nacházel v jiné pozici. Pozice zdrojů a jejich rozměry byly vždy zvoleny tak, aby odpovídaly kolmému průmětu celé plochy aktuálně zkoumané součástky do roviny X-Z.

Jako zdroj účinných průřezů pro fotony byla zvolena knihovna *mcplib*, která je součástí programu MCNPX. Ve všech buňkách byla nastavena důležitost výpočtu transportu fotonů jako 1. Zbývající nastavení výpočtu jsou uvedeny v Tabulce 10.

Tabulka 10: Zbývající nastavení výpočtu

Druh nastavení	Nastavená hodnota
Mód výpočtu	Fotony, Neutrony
Typ částic generovaných zdrojem	Fotony
Energie částic generovaných zdrojem	1 MeV
Vektor směru letu částic	0 1 0, ve směru osy Y
Kosinus úhlové odchylky od zadaného vektoru směru letu částic	1, žádná odchylka
Počet simulovaných částic na jeden cyklus výpočtu	10^7

Byly tedy provedeny výpočty pro celkem 9 různých pozic a rozměrů zdroje částic s výše zmíněným nastavením, které se mezi jednotlivými výpočty neměnilo.

6.2.3 Výsledky výpočtu

Pro získání výsledků výpočtu bylo využito integrované funkce MCNP Tally F6, která slouží k určení energie deponované prolétávajícími částicemi v jednotlivých buňkách. Tally F6 podává výstup v podobě průměrné energie, kterou jedna simulovaná částice předá v dané buňce na gram hmoty v jednotce MeV/g. Jelikož se jedná o stochastický výpočet, Tally F6 také určuje relativní chybu vypočtené hodnoty. Hodnoty deponované energie byly zkoumány pouze pro buňky 9 až 17, což jsou elektronické součásti zjednodušeného modelu manipulátoru. Pro každou zkoumanou buňku byl proveden výpočet 10^7 částic vygenerovaných zdrojem.

V Tabulce 10 jsou uvedeny čísla zkoumaných buněk, typ součástky odpovídající dané buňce, hodnota průměrné energie deponované jednou simulovanou částicí v MeV/g určená pomocí Tally F6, přepočtené této hodnoty na Gy a relativní chyba výsledku určená pomocí Tally F6. V posledním sloupci tabulky je také uveden počet interakcí, které za dobu výpočtu v dané buňce proběhly.

Tabulka 10: Výsledky výpočtu pomocí MCNP

Číslo buňky	Součástka	Energie [MeV/g]	Dávka [Gy]	Relativní chyba	Počet interakcí
9	Processor	$5,24380 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-20}$	0,0630	74
10	RAM	$9,23274 \times 10^{-7}$	$1,4791 \times 10^{-19}$	0,0613	72
11	HDMI transmitter	$1,31846 \times 10^{-6}$	$2,1122 \times 10^{-19}$	0,0611	74
12	FLASH paměť	$7,36933 \times 10^{-7}$	$1,1806 \times 10^{-19}$	0,0620	72
13	Ethernetový transceiver	$4,11337 \times 10^{-6}$	$6,5896 \times 10^{-19}$	0,0589	74
14	Napájení procesoru	$2,82202 \times 10^{-7}$	$4,5209 \times 10^{-19}$	0,0607	72
15	Napěťový regulátor	$1,17355 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-21}$	1,0000	74
16	Řadič motorů	$2,98888 \times 10^{-8}$	$4,7882 \times 10^{-21}$	0,3389	73
17	Napájecí zdroj	$9,74414 \times 10^{-8}$	$1,561 \times 10^{-20}$	0,0821	72

6.3 Vliv gama záření na smazání FLASH paměti řídicího počítače

Radiační odolnost řídicího počítače je možné hodnotit například z pohledu paměťových prvků, které se na něm nacházejí. Nevolatilní typ paměti, tedy ten, kde nedochází ke ztrátě dat při ztrátě napájení, kterým je v tomto případě paměť typu FLASH, používá FGMOS tranzistorů k uložení dat Floating gate, což je elektricky odizolovaný kus křemíku, na který je prostřednictvím napětí, které prorazí izolační vrstvu, přiveden náboj, čímž dojde k zapsání dat. Každý jeden FGMOS tranzistor se rovná jednomu bitu uložených dat, neboť může nabírat hodnoty pouze 1 nebo 0. Při předpokladu elektrické kapacity jednoho Floating gate $0,8 \text{ fF}$ [21], a znalosti napětí na FLASH paměti použité v řídicím mikropočítači $3,3 \text{ V}$ [22] lze ze vztahu pro elektrickou kapacitu:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (16)$$

vyjádřením tohoto vztahu pro Q:

$$Q = UC \quad (17)$$

kde Q je elektrický náboj, U je napětí a C je elektrická kapacita, vypočítat množství náboje potřebné ke změně logického stavu tranzistoru jako:

$$Q = 2,64 * 10^{-15} C = 2,64 fC$$

Užitím dalšího předpokladu, že v křemíku se na každých $3,6 \text{ MeV}$ deponované energie indukuje náboj o velikosti $0,16 \text{ pC}$ [28], lze poté vypočítat energii potřebnou k indukovaní náboje $2,64 \text{ fC}$ jako:

$$E = 3,6 * 10^6 * \frac{0,16 * 10^{-12}}{2,64 * 10^{-15}} = 218,18 \text{ eV} = 349,53 * 10^{-19} \text{ J}$$

Pro výpočet dávky je nutné tuto hodnotu vztáhnout na hmotnost m jednoho Floating gate, kterou lze vypočítat z rozměrů jednoho FGMOS tranzistoru 100 nm na 100 nm [23], tloušťky Floating gate vrstvy 300 nm [24] a hustoty křemíku 2,329 g/cm³ [16] jako:

$$m = 6,987 * 10^{-18} \text{ kg}$$

a vydělením energie a hmotnosti podle vztahu (1) je vypočtena potřebná dávka:

$$D = \frac{349,53 * 10^{-19}}{6,987 * 10^{-18}} = 5 \text{ Gy}$$

Tato vypočtená dávka je nižší než dávka postačující ke zničení FLASH paměti v intervalu 20 Gy až 200 Gy předpokládaná v kapitole 2.6, jelikož samotné přepsání nebo smazání dat obvykle neznamená zničení FLASH paměti a lze jej napravit přeprogramováním paměti.

V kapitole 4 je vyjádřen předpoklad práce manipulátoru v prostředí s dávkovým příkonem 63 mSv/hod. Při vypočtené dávce vedoucí ke smazání dat uložených ve FLASH paměti řídicího počítače manipulátoru 5 Gy by tak měl být manipulátor schopný v tomto prostředí fungovat 79,3 hodiny, tedy více než tři dny, což je doba výrazně větší než 4 hodiny potřebné pro provedení 8 inspekci. I při velmi konzervativním zvýšení odhadu obdržené dávky z 0,252 Gy na 1 Gy je doba potřebná pro smazání FLASH paměti pětikrát vyšší než doba potřebná pro provedení inspekci.

6.4 Diskuse výsledků

6.4.1 Diskuse numerického výpočtu

V Tabulce 10 je důležité si povšimnout relativní chyby výsledku v buňce 15, tedy v napěťovém regulátoru. Relativní chyba rovná 1 indukuje prakticky nulovou přesnost výpočtu a nejedná se tedy o relevantní výsledek. Výpočet pro buňku 15 byl několiknásobně zkontrolován a zopakován, pokaždé se stejným výsledkem. Jelikož byl počet interakcí v buňce prakticky stejný, jako v případě ostatních buněk, autor této práce předpokládá, že během výpočtu byly jednotlivé hodnoty, ze kterých je průměr deponované energie vypočten v rozmezí velké odchylky.

Mírně zvýšenou relativní chybu výpočtu vykazuje také výsledek v buňce 16. Tato relativní chyba rovná přibližně 33 % je opět způsobena velkým rozptylem hodnot deponovaných energií v dané buňce, čímž nebylo možné získat statisticky přesnější data. Zbývající buňky vykazují relativní chybu v řádu od 6 % do 8 %, což je vzhledem k nízkému počtu interakcí v každé buňce dostatečná přesnost.

Jelikož je výsledek deponované energie průměrován mezi všechny simulované částice, lze celkovou deponovanou dávku během výpočtu určit vynásobením počtem simulovaných částic. Pro porovnání vlivu mezi jednotlivými buňkami je poté vhodné porovnávat deponované dávky na jednu interakci, čehož lze dosáhnout vydělením celkové energie počtem interakcí v dané buňce. Tyto zmíněné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 11.

Tabulka 11: Obdržené dávky na jednu částici, celkové deponované dávky a dávky deponované na jednu interakci

Číslo buňky	Součástka	Dávka na jednu simulovanou částici [Gy]	Celková dávka [Gy]	Dávka na jednu interakci [Gy]
9	Procesor	$8,4 \times 10^{-20}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$1,14 \times 10^{-14}$
10	RAM	$1,4791 \times 10^{-19}$	$1,4791 \times 10^{-12}$	$2,05 \times 10^{-14}$
11	HDMI transmitter	$2,1122 \times 10^{-19}$	$2,1122 \times 10^{-12}$	$2,85 \times 10^{-14}$
12	FLASH paměť	$1,1806 \times 10^{-19}$	$1,1806 \times 10^{-12}$	$1,64 \times 10^{-14}$
13	Ethernetový transceiver	$6,5896 \times 10^{-19}$	$6,5896 \times 10^{-12}$	$8,90 \times 10^{-14}$
14	Napájení procesoru	$4,5209 \times 10^{-19}$	$4,5209 \times 10^{-12}$	$6,28 \times 10^{-14}$
15	Napěťový regulátor	$1,88 \times 10^{-21}$	$1,88 \times 10^{-14}$	$2,54 \times 10^{-16}$
16	Řadič motorů	$4,7882 \times 10^{-21}$	$4,7882 \times 10^{-14}$	$6,56 \times 10^{-16}$
17	Napájecí zdroj	$1,561 \times 10^{-20}$	$1,561 \times 10^{-13}$	$2,16 \times 10^{-15}$

Z Tabulky 11 lze vyčíst, že z jednotlivých elektronických součástek použitých v manipulátoru by na poškození zářením měl být nejnáchylnější ethernetový transceiver použitý v řídicím počítači. Jako nejméně náchylné komponenty z Tabulky 11 vyházejí řadič motorů a napěťový regulátor řídicího počítače, což jsou ovšem ty dvě součástky s vyšší relativní chybou numerického výpočtu než ostatní. Při zanedbání těchto dvou výsledků, tak nejméně náchylný vychází napájecí zdroj celého manipulátoru. Porovnáním energií deponovaných na jednu interakci s plochami jednotlivých součástek z Tabulky 8 lze také odpozorovat nárůst deponované energie na jednu interakci, a s ní související náchylností k radiačnímu poškození, s klesající plochou součástky.

6.4.2 Diskuse vlivu gama záření na FLASH paměť řídicího počítače

Ačkoliv smazání dat neznamená úplné zničení paměťového čipu, lze dobu, za kterou dojde ke ztrátě dat na FLASH paměti řídicího počítače, považovat za praktickou životnost robotického manipulátoru v prostředí se zvýšeným dávkovým příkonem. Vzhledem k poměrně nízké dávce potřebné pro smazání, dojde ke smazání FLASH paměti dříve, než dojde ke zničení jiné součástky řídicího počítače. Paměť FLASH je možné opětovně přeprogramovat, ale do té doby zůstává manipulátor v nepoužitelném stavu. Tento cyklus lze také opakovat pouze v počtu omezeném hlavní celkovou radiační životností FLASH paměti.

Z hodnoty energie předané při jedné interakci z Tabulky 11 $1,64 \times 10^{-14}$ Gy a dávky potřebné pro smazání FLASH paměti 5 Gy lze také určit počet interakcí gama záření s křemíkem v paměťovém čipu vedoucích ke smazání paměti na $3,05 \times 10^{14}$.

6.4.3 Diskuse vlivu neutronové transmutace

Ačkoliv byl proveden pouze demonstrační příklad výpočtu času potřebného pro zničení součástky a v reálném prostředí se hodnoty hustot jader dotujícího boru a hustoty toku neutronů mohou lišit, lze předpokládat, že reálné hodnoty času ozařování do zničení se budou pohybovat v podobném časovém řádu jako výsledek demonstračního příkladu, tedy v řádu zlomků až jednotek dní. Samotný čas, kdy dojde k úplnému zničení polovodičové součástky bude o několik hodin delší, jelikož po vzniku jádra ^{31}Si musí ještě dojít k jeho přeměně beta minus rozpadem na ^{31}P , která má poločas rozpadu 2,62 h.

7 Návrhy úprav robotického manipulátoru vedoucí ke zvýšení radiační odolnosti a jejich zhodnocení

Ačkoliv byl robotický manipulátor zhodnocen jako dostatečně radiačně odolný, v následujících odstavcích jsou navrženy možné úpravy manipulátoru vedoucí ke zvýšení radiační odolnosti.

7.1 Konstrukční úpravy manipulátoru

Jako možná konstrukční úprava robotického manipulátoru se jeví přidání stínících prvků okolo skříně pohonné jednotky. Vrstva olova o tloušťce 2 mm dokáže odstínit zhruba 10 % přicházejícího gama záření a pokrytí vnějších stran skříně pohonné jednotky touto vrstvou by zvýšilo hmotnost manipulátoru o přibližně 1,4 kg. Použití vrstvy olova o tloušťce 5 mm dokáže odstínit už přibližně 23 % záření, ale zvedá hmotnost manipulátoru o téměř 3,5 kg.

Nabízí se taky možnost náhrady hliníku, jakožto materiálu skříně pohonné jednotky, olovem. Hmotnost skříně pohonné jednotky manipulátoru by vzrostla z 1,138 kg [6] o 3,621 kg na 4,759 kg. Jelikož je tloušťka stěny skříně pohonné jednotky 6 mm [6], došlo by tak k odstínění téměř 27 % záření za cenu přibližně stejného zvýšení hmotnosti, jako v případě 5 mm vrstvy olova na vnější straně skříně. Materiál skříně však také slouží jako chladič řadiče motorů, na což bylo nutné brát ohledy, jelikož je koeficient tepelné vodivosti olova téměř sedmkrát nižší [25], než je tomu v případě hliníku.

Autorovi této práce se tak z výše navržených variant konstrukčních úprav jeví jako nejvhodnější přidání 2 mm tlusté vrstvy olova, ostatní navržené úpravy vedou k příliš vysokému nárůstu hmotnosti manipulátoru.

7.2 Úpravy elektronických částí manipulátoru

Jelikož jsou elektronické součástky manipulátoru zakoupeny již v hotovém stavu, neexistuje tak praktická možnost zvýšení jejich radiační odolnosti. Jediným způsobem, jak zvýšit radiační odolnost přímými úpravami elektronických částí manipulátoru, je tak použití součástek, které byly vyrobeny s důrazem na zvýšenou radiační odolnost. Nabízí se tak náhrada řídicího počítače například počítačem SCS 3740 [26], nebo řadiče motorů součástkou PW-82336 [27], obě zmíněné součástky disponují radiační odolností do dávek vyšších než 100 Sv. Takové součástky jsou však zamýšleny pro použití ve vesmírných zařízeních, což však nepochybně zvedá jejich pořizovací cenu, která by mohla vyšší, než by byla cena nahrazení zničených elektronických součástek manipulátoru.

III Závěr

Prvním cílem této diplomové práce bylo provést rešerši dostupných publikací týkajících se vlivu záření na elektronické prvky. V této části tak byly popsány mechanismy poškození gama zářením, které v elektronických prvcích způsobuje poškození zejména ionizací, jelikož během fotoelektrického jevu, Comptonova rozptylu a tvorby elektron-pozitronových párů vznikají elektrony, které se tím stávají volnými nosiči elektrického náboje. Mechanismy poškození neutronovým zářením pak zahrnují vyražení atomů z krystalické mříže, které způsobuje narušení struktury křemíkového krystalu v elektronických prvcích, a neutronovou transmutací, která způsobuje přeměnu části křemíku na fosfor, což je prvek používaný k dotování křemíku pro získání N vodivosti. Vznik dostatečně velkého množství fosforu v P vodivém křemíku tak způsobí změnu vodivosti na N a dojde tak ke ztrátě funkčnosti součástky. V rešeršní části jsou také popisovány konkrétnější vlivy záření na elektronické prvky. Prvním jevem je indukovaná radioaktivita, ke které dochází přeměnou stabilních jader na nestabilní. Následuje vysvětlení jednorázových jevů, které je obvykle možné napravit pouze opětovným přeprogramováním elektronického prvku. Poté je popisována ionizující dávka, při které dochází k zachytu nosičů náboje v různých částech polovodičových prvků, čímž dochází k jejich změnám, které zahrnují zejména vznik elektrických polí nebo snižování izolačních schopností oxidových vrstev. Vznik elektrických polí poté způsobuje zkreslení volt-ampérové charakteristiky prvku a dochází tak k posunu prahového napětí, které může vést až k úplné ztrátě ovladatelnosti prvku. Rešerše vlivu záření na FGMOS tranzistory, které jsou základním stavebním prvkem elektronických pamětí, odhalila, že posunem prahového napětí dochází k postupnému mazání dat uložených v pamětech. Byl studován také vliv záření na FLASH paměti, jejichž životnost je odhadována pro dávky mezi 20 Gy a 200 Gy, a na FRAM paměti, které potřebují dávky okolo 1 kGy, aby došlo k jejich zničení. Poslední kapitola rešeršní části se zabývá zvyšováním radiační odolnosti elektronických prvků během výrobního procesu.

Dalším cílem této práce bylo seznámit se s modulárním manipulátorem Ilja. Byly tak popsány hlavní konstrukční i elektronické součásti manipulátoru. Hlavní elektronické součásti zahrnují zejména řídicí mikropočítač, napájecí zdroje, řadič motorů a řadič LED. Zhodnocením možností použití manipulátoru v ozařovacích experimentech byl vyvozen závěr, že k ozařování mohou být použity nejen výše zmíněné součástky, ale také jednotlivé elektronické součástky použité v řídicím mikropočítači. V závěru této části práce poté byla posouzena náchylnost jednotlivých elektronických částí k radiačnímu poškození. Za nejnáchylnější byl označen řídicí mikropočítač, který obsahuje větší množství elektronických prvků, jejichž zničení ve většině případů vede ke ztrátě funkčnosti počítače a celého manipulátoru. Ze součástek mimo řídicí mikropočítač poté byl označen za nejproblematičtější napájecí zdroj, jehož zničení okamžitě vede ke ztrátě funkčnosti manipulátoru. Jako nejméně problematický byl vyhodnocen řadič LED, jelikož ztráta osvětlení nemusí nutně znamenat ztrátu funkčnosti a je řešitelná jinými způsoby.

Následujícím cíle práce bylo provést návrh experimentálního ověření radiační odolnosti manipulátoru. V této části byl popisován jaderný reaktor LVR-15, jakožto

první potenciální zdroj gama a neutronového záření, a jeho experimentální vybavení se zaměřením na vybavení využitelná pro ozařovací experimenty. Mezi tato zařízení patří ozařovací sondy, velké vertikální kanály s rotací, vertikální ozařovací kanály, pneumatická pošta a horizontální kanály. Jako nejvhodnější zařízení z výše vyjmenovaných byly vybrány horizontální kanály. Druhým potenciálním zdrojem záření je gama ozařovna, která nabízí různé podmínky během ozařování a dávkové příkony od 100 Gy/h po 10 kGy/h. Následně byly diskutovány možnosti provedení ozařovacího experimentu, které se lišily zdrojem záření, způsobem vyhodnocování stavu součástek a množstvím najednou ozařovaných součástek. Z těchto diskutovaných možností byl následně autorem práce proveden návrh experimentu, který zahrnuje ozařování v jaderném reaktoru LVR-15 i v gama ozařovně. V navrženém experimentu by byly ozařovány jak jednotlivé součástky včetně těch použitých v řídicím mikropočítači, tak samotný řídicí mikropočítač. Vyhodnocování stavu ozařovaných součástek by probíhalo off-line metodou a pro vyhodnocení dávek by bylo použito termoluminiscenčních dozimetřů.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení teoretického ověření radiační odolnosti robotického manipulátoru a posouzení jeho použitelnosti v prostředí jaderné elektrárny. Pro toto posouzení bylo použito několika analytických i numerických přístupů.

První výpočet se týkal posouzení vlivu neutronové transmutace. Za předpokladu, že ke změně vodivosti z P na N dojde při rovnosti hustoty atomových jader P dotujícího a N dotujícího prvku, bylo provedeno odvození vztahu vyjadřujícího čas potřebný pro tuto změnu v závislosti zejména na hustotě toku neutronů a hustotě jader P dotujícího prvku. V praktickém příkladu tohoto výpočtu byl poté pro hustotu toku tepelných neutronů 10^{14} 1/cm²/s a hustotu jader P dotujícího boru 10^{15} 1/cm³ vypočten čas potřebný ke zničení elektronického prvku jako 0,7 dne. Ačkoliv se jednalo pouze o demonstrační výpočet, autor práce předpokládá, že reálné hodnoty se budou pohybovat v podobných časových rozmezích, tedy v desetinách až jednotkách dní.

Pro posouzení vlivu gama záření na robotický manipulátor byl zvolen numerický výpočet pomocí výpočetního kódu MCNP. Aby bylo možné takový výpočet provést bylo nejprve nutné vytvořit zjednodušený trojrozměrný model robotického manipulátoru. V tomto modelu byly zanedbány součásti manipulátoru, u kterých není očekávaný přímý vliv na jeho radiační odolnost. Model se tak skládal ze skříně pohonné jednotky, základní desky plošných spojů manipulátoru, desky plošných spojů řídicího počítače a 9 elektronických součástek nacházejících se na deskách plošných spojů. Po sestavení zjednodušeného modelu robotického manipulátoru bylo provedeno 9 výpočtů, tedy pro každou elektronickou součástku jeden, kdy každý simuloval průlet 10 milionů gama fotonů o energii 1 MeV. Tyto fotony přilétaly dnem skříně manipulátoru, kolmo na jeho rovinu. Výsledkem numerického výpočtu byla dávka deponovaná v jednotlivých elektronických součástkách na jednu interakci. Tyto výsledné hodnoty byly následně použity pro porovnání náchylnosti k radiačnímu poškození mezi jednotlivými elektronickými součástkami. Jako nejnáchylnější tak byl vyhodnocen ethernetový transceiver použitý

v řídicím počítači s dávkou $8,9 \times 10^{-14}$ Gy na jednu interakci. Jako nejméně náchylný byl vyhodnocen napájecí zdroj manipulátoru s dávkou $2,16 \times 10^{-15}$ Gy na jednu interakci. Porovnáním hodnot dávek na jednu interakci a ploch jednotlivých součástek byla také nalezena spojitost mezi těmito hodnotami, kdy dávka na jednu interakci roste s klesající plochou součástky.

Posledním provedeným výpočtem bylo určení vlivu gama záření na FLASH paměť řídicího počítače. Byla vypočtena elektrická kapacita jednoho Floating gate jako 2,64 fC a následně byl užit předpoklad, že je v křemíku na každých 3,6 MeV deponované energie indukován náboj o velikosti 0,16 pC, který vedl k určení energie potřebné pro vymazání dat z jednoho FGMOS tranzistoru na $349,53 \times 10^{-19}$ J. Vztažením této energie na hmotnost jednoho Floating gate, která byla určena z typických rozměrů jako $6,987 \times 10^{-18}$ kg, byla získána dávka potřebná pro smazání dat z jednoho Floating gate s hodnotou 5 Gy. Tato vypočtená dávka je nižší než předpokládaných 20 Gy až 200 Gy pro zničení FLASH paměti, jelikož smazáním dat nedochází k jejímu úplnému zničení a tuto ztrátu dat lze napravit přeprogramováním. Doba do smazání dat uložených ve FLASH paměti manipulátoru lze považovat za jeho praktickou životnost, jelikož ztrátou dat dochází i ke ztrátě funkčnosti manipulátoru až do jejich opětovného naprogramování.

Porovnáním vypočtené hodnoty dávky 5 Gy s dávkovým příkonem 64 mSv/hod očekávaným v prostředí, kde se bude manipulátor v jaderné elektrárně pohybovat, byla vypočtena životnost manipulátoru v tomto prostředí na 79,3 hodiny. Tato doba je výrazně nižší než předpokládané 4 hodiny potřebné pro provedení požadovaných inspekcí. Celková předpokládaná dávka, kterou by manipulátor měl obdržet je 0,252 Gy a i při jejímu konzervativnímu navýšení na 1 Gy je životnost manipulátoru pětinasobná. Radiační odolnost robotického manipulátoru tak byla vyhodnocena jako dostatečná pro jeho plánované použití.

V závěrečné části práce byly i přes předpovězenou dostatečnou radiační odolnost robotického manipulátoru navrženy konstrukční úpravy a úpravy elektronických částí manipulátoru, které by vedly ke zvýšení jeho radiační odolnosti. V případě konstrukčních úprav byly navrženy různé varianty použití olověného stínění, které však naráží na problém velkého zvyšování hmotnosti. Jako úpravy elektronické části manipulátoru byly navrženy výměny řídicího počítače a radiče motorů za jejich radiačně odolnější alternativy. Jelikož jsou ale nově navrhované součástky zamýšleny pro užití ve vesmíru, vyjádřil autor této práce znepokojení nad jejich cenou, která by jejich použití nemusela opodstatnit. Jako jediná schůdná navržená možnost se tak autorovi jeví použití 2 mm tlusté stínicí vrstvy olova, která by odstínila zhruba 10 % přicházejícího záření za zvýšení hmotnosti manipulátoru o přibližně 1,4 kg.

Radiační odolnost předpovězenou teorií byl však bylo vhodné ověřit navazujícím ozařovacím experimentem s použitím gama ozařovny. Pro tento experiment by bylo vhodné použít FLASH paměť řídicího mikropočítače, kterou je možné sehnat jako samostatnou součástku. Při očekávané dávce vedoucí ke smazání paměti 5 Gy a minimálního dávkového příkonu v gama ozařovně 100 Gy/h by mělo dojít k vymazání dat z paměti za pouhé 3 minuty. Paměť by tak musela být

vyhodnocována pravidelně v relativně krátkých intervalech, které by se pohybovaly v řádu jednotek sekund. Pro tak rychlé vyhodnocování je nejvhodnější použít on-line metodu, která ovšem může narážet na interferenci se zářením v gama ozařovně. V případě použití off-line vyhodnocovací metody by paměť musela být pravidelně vytahována v okolí 3 minut ozařovacího času, nebo použito větší množství pamětí.

Pro úplné shrnutí závěrů práce je tedy potřeba zmínit, že teoretickým ověřením radiační odolnosti byl robotický manipulátor shledán vhodným pro plánované použití v jaderné elektrárně a rezerva jeho životnosti je více než pětinasobná, ale tento předpoklad je nutné ověřit experimentem.

Reference

- [1] SEDLÁČEK, Michal. *Vliv záření na elektronické paměťové prvky*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [2] BĚLOHLÁVEK, Arnošt. *Vliv záření na elektronické prvky*. Praha, 2012. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [3] Evaluated Nuclear Data File. *Java-based Nuclear Data Information System* [online]. OECD-NEA [cit. 2019-6-20]. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/janisweb/renderer/557>
- [4] JANSÁ, Jindřich a Jiří KANTA. *Modulární manipulátor Ilja pro vizuální inspekci*. Centrum výzkumu Řež, s.r.o., 2019.
- [5] MAREŠ, P., J. NETUŠIL a J. JANSÁ. *Záznam z testování dálkově ovládané robotické technologie pro vizuální zkoušení a 3D profilometrii ponořených zařízení*. Centrum výzkumu Řež, s.r.o., 2020.
- [6] JANSÁ, Jindřich, Jiří KANTA a Josef ŠVEC. *Dálkově ovládaná robotická technologie pro vizuální zkoušení a 3D profilometrii ponořených zařízení: Technický popis a výrobní dokumentace*. Centrum výzkumu Řež, s.r.o., 2020.
- [7] COLEY, Gerald. BeagleBone Black System Reference Manual. *BeagleBone Black System Reference Manual* [online]. BeagleBoard, 2013 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf
- [8] *15 W DC-DC Regulated Single output converter: SKM15 Series* [online]. Mean Well, 2021 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.332-652.1.pdf>
- [9] *DRV84x2 Dual Full-Bridg ePWM Motor Driver* [online]. Texas Instruments, 2009 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8432.pdf>
- [10] *LED Driver ICBCR450: Datasheet* [online]. Infineon, 2013 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BCR450-DataSheet-v03_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca38901156008609e1dc9
- [11] ŠOLTĚS, Jaroslav. *Vývoj filtra neutronových zvázkov*. Praha, 2017. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [12] Výzkumný reaktor LVR-15. *Centrum výzkumu Řež* [online]. Řež: Centrum výzkumu Řež [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <http://cvrez.cz/vyzkumna-infrastruktura/vyzkumny-reaktor-lvr-15/>
- [13] DOSTÁL, P. *Provozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR-15*. 3. vyd. Centrum výzkumu Řež, s.r.o., 2020.
- [14] Výzkumný program Laboratoře optické absorpční spektroskopie v Centru výzkumu Řež. *Aldebaran bulletin* [online]. Aldebaran, 2020 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_28_cvr.php

- [15] *Ozařování v gama spektru*. Centrum výzkumu Řež, s.r.o., 2020.
- [16] Silicon - Element information, properties and uses. *Royal Society of Chemistry* [online]. Royal Society of Chemistry [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/14/silicon>
- [17] *Doping concentration - an overview* [online]. ScienceDirect [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/doping-concentration>
- [18] *What is the Standard PCB Thickness?* [online]. Tempo Automation [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <https://www.tempoautomation.com/blog/what-is-the-standard-pcb-thickness/>
- [19] *Printed Circuit Board (PCB) Materials* [online]. Printed Circuits [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <https://www.printedcircuits.com/printed-circuits-materials/>
- [20] *About wafers* [online]. Addison Engineering [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <https://www.addisonengineering.com/about-wafers.html>
- [21] *Floating gate - an overview* [online]. ScienceDirect [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/floating-gate>
- [22] Embedded MultimediaCard: EMMC04G-M627. *LCSC Electronics* [online]. Kingston Solutions, 2016 [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2006081033_Kingston-Technology-EMMC04G-M627-A01_C577446.pdf
- [23] HASLER, Jennifer, Sihwan KIM a Farhan ADIL. Scaling Floating-Gate Devices Predicting Behavior for Programmable and Configurable Circuits and Systems. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2016, 6(13), 19. Dostupné z: doi:10.3390/jlpea6030013
- [24] DE NARDI, Christophe. *Direct Measurements of Charge in Floating Gate Transistor Channels of Flash Memories Using Scanning Capacitance Microscopy* [online]. 2006, [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268415811_Direct_Measurements_of_Charge_in_Floating_Gate_Transistor_Channels_of_Flash_Memories_Using_Scanning_Capacitance_Microscopy
- [25] *Thermal conductivity coefficient - an overview* [online]. ScienceDirect [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-conductivity-coefficient>

- [26] High-Speed, SWaP Optimized 3U SpaceVPX SBC. *DDC* [online]. DDC, Conectivity Power Control [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: <https://www.ddc-web.com/ddc/public/en/radhard/sbcsforspace/low-power-quad-core-3u-spacevpx-computer-for-space?partNumber=SCS3740>
- [27] PW-82336 Radiation Tolerant Smart Power 3-Phase Motor Drive. *DDC* [online]. DDC, Conectivity Power Control [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.ddc-web.com/ddc/public/en/radhard/motordrives/pw-82336?partNumber=PW-82336>
- [28] HOLMES-SIEDLE, Andrew a Len ADAMS. *Handbook of radiation effects second edition*. 2. Oxford: Oxford university press, 2007. ISBN 9780198507338.