

# **Kvantni celični avtomati in kvantno procesiranje**

Uredila dr. Miha Janež in prof. dr. Miha Mraz

*oktober 2024*



## Predgovor

S povečevanjem gostote integriranih vezij postajajo tranzistorji vse manjše nanoelektronske naprave. Želeno delovanje tranzistorjev velikosti le nekaj nanometrov pa pričnejo ovirati kvantni pojavi in sile med elektroni. Zato so se pojavile zamisli o novih platformah, ki jih ti pojavi ne le ne bi ovirali, pač pa bi jih platforme izkoristile za procesiranje. Poleg tega lahko nove nanoelektronske naprave prinesejo še več prednosti pred današnjimi računalniki, npr. večjo gostoto, manjšo porabo energije, hitrejšo delovanje itd.

Ena od takih predlaganih platform so kvantni celični avtomati (Quantum Cellular Automata - QCA). Namesto tranzistorjev vsebujejo celice z elektroni, katerih razporeditev znotraj celice določa logično stanje. Procesiranje se izvede z ustrezno razporeditvijo QCA celic, pri čemer se izkoriščata Coulombova sila in kvantno tuneliranje. Do sedaj so bile fizično implementirane le manjše QCA strukture z majhnim številom celic, ker je praktično težko izdelati QCA celice nanometrskih velikosti. Možno pa je načrtovati in optimizirati večja QCA vezja s pomočjo računalniškega simulatorja.

V zadnjem času je zaradi praktične implementacije veliko pozornosti posvečene kvantnemu procesiranju z osnovnimi gradniki kvantnimi biti. Superpozicija in kvantna prepletenost omogočata novo paradigmo procesiranja, ki obljublja eksponentno pospešitev nekaterih algoritmov glede na klasične računalnike. Izgradnja skalabilnega kvantnega računalnika trenutno otežuje zahteven nadzor neizoliranega sistema kvantnih bitov. Vendar predstavljene implementacije, množica razvitih kvantnih algoritmov in protokolov, dostopni računalniški simulatorji in možnost uporabe manjših fizičnih kvantnih računalnikov preko spleta dopuščajo preučevanje in razvoj področja.

Tako QCA kot kvantnemu procesiranju je skupna reverzibilnost. Fizično reverzibilno procesiranje brez izgube informacij se približa minimalni možni porabi energije. Kvantno procesiranje je inherentno reverzibilno, saj informacije v kvantnem bitu ni mogoče izbrisati. Primerna zasnova QCA vezja omogoča implementacijo fizično reverzibilne procesne platforme.



## Navodila za izdelavo seminarske naloge

- Vaše datoteke se nahajajo v direktorijih `Skupina*`, kjer `*` predstavlja številko vaše skupine - glavna datoteka je `main.tex`.
- Slike shranjujte v svoj direktorij.
- Vse labelle začnite z znaki `g*`, kjer `*` predstavlja številko vaše skupine.
- Pri navajanju virov uporabite datoteko `references.bib`, ki se nahaja v ko-renskem direktoriju projekta.
- Pred dodajanjem novih virov v datoteko `references.bib` dobro preverite, če je vir mogoče že vsebovan v datoteki - v tem primeru se sklicujte na obstoječ vnos.

V okviru prvega seminarja se boste ukvarjali s procesnimi platformami, ki za delovanje izkoriščajo kvantne pojave. Delo bo potekalo v skupinah s štirimi študenti. Za skupinsko delo uporabljajte repozitorij, kot je npr. `dropbox`<sup>1</sup> ali `git`<sup>2</sup>. Cilj seminarja so izdelki in poročila, ki jih lahko ob zaključku združimo v celoto (glej rezultate seminarjev iz prejšnjih let). Poročilo pišite v okolju LaTeX, kjer lahko za lažje skupinsko delo uporabljate okolje, kot je npr. `overleaf`<sup>3</sup>. Za iskanje virov uporabljajte iskalnike znanstvene literature<sup>4</sup>. Rok za izdelavo prvega seminarja je 24. 11. 2024. Predstavitve nalog bodo v tednu od 25. 11. 2024 v terminu vaj. Na zagovoru seminarja bo imela vsaka skupina 10 minutno predstavitev svojega izdelka, nato bo sledila krajša diskusija.

Za predlogo uporabite strukturo znanstvenega članka, ki obsega poglavja Uvod, Metode, Rezultati, Zaključek in Literatura. Slike naj bodo v formatu PDF ali EPS, z ustreznimi viri (literaturo) polnite vašo BIB datoteko. Poročilo redno izpopolnjujte. Ker gre za skupinsko delo, mora biti na koncu poročila tudi poglavje z naslovom Doprinosi avtorjev, kjer v enem stavku zapišite, kakšen je bil doprinos posameznega člana skupine.

---

<sup>1</sup> <https://www.dropbox.com>

<sup>2</sup> <https://bitbucket.org>

<sup>3</sup> <https://www.overleaf.com/>

<sup>4</sup> <https://scholar.google.si>, [www.sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com), <https://www.scopus.com>, <https://arxiv.org>, <http://citeseerx.ist.psu.edu>

## Kvantni celični avtomati

Ena izmed tem za prvi seminar je področje kvantnih celičnih avtomatov (angl. QCA) [1, 2, 3, 4], ki so možna alternativna tehnologija procesiranja v prihodnosti. Cilj seminarja je lahko na primer zasnova in realizacija reverzibilne QCA strukture v okolju QCADesigner. Reverzibilno procesiranje je opisano v [5, 6, 7]. Primera osnovnih univerzalnih reverzibilnih logičnih operatorjev sta Toffolijeva in Fredkinova vrata. V seminarju izdelajte kompleksnejšo reverzibilno strukturo, na primer polni seštevalnik, LFSR (pomikalni register z linearno povratno vezavo) itd. Potreben pogoj za fizično reverzibilnost je logična reverzibilnost. Zato najprej zasnujte logično reverzibilno QCA strukturo. Logična reverzibilnost pomeni, da lahko iz logičnih vrednosti izhodov enolično določimo logične vrednosti vhodov, torej med vhodi in izhodi obstaja bijektivna preslikava. Nato poskusite z orodjem QCADesigner zasnovati še fizično reverzibilno strukturo QCA. Slednja mora biti najprej logično reverzibilna. Poleg tega mora izpolnjevati tudi dodatni pogoj: če spremenimo izhodne celice v vhodne in obratno ter določimo vhodne logične vrednosti (na prej izhodnih celicah), moramo na izhodi (prej vhodne celice) dobiti ustrezne vrednosti, določene z bijekcijo. Z reverzibilno strukturo lahko torej izračunamo vrednost bijektivne funkcije (npr. pretvorbo v dvojiški komplement, izračun zgoščevalnih (hash) funkcij itd.) in z zamenjavo vhodov in izhodov tudi njeno inverzno vrednost.

V poglavju Metode opišite, ali ste uporabili ad hoc metodo ali ste formalizirali metodo snovanja QCA strukture. Navedite tudi, ali prosto določite urino cono vsaki posamezni QCA celici ali je vaša struktura zasnovana z uporabo strukturiranih pravokotnih urin con.

QCA strukturo izdelajte s pomočjo orodja QCADesigner, s katerim tudi simulirajte in testirajte njeno delovanje. Poročilo izdelajte v okolju LaTeX in dopolnjujte repozitorij s pripadajočimi datotekami (QCAD datoteke, slike itd.).

## Kvantni računalniki

Danes v računalništvu prevladujoča tehnologija CMOS se z miniaturizacijo tranzistorjev bliža vrhuncu učinkovitosti, ko je zaradi fizikalnih omejitev ne bo več možno izboljševati. Za nadaljnji napredek strojne računalniške opreme bo nujno prevzeti katero od alternativnih procesnih platform. Ena od teh je kvantno računalništvo, ki za procesiranje izkorišča kvantne pojave in operira z delci na nanometrskem nivoju. Poleg tega teoretične raziskave in tudi praktične implementacije prikazujejo večjo zmogljivost kvantnega računalništva od današnje tehnologije.

Kvantno računalništvo se s hitrim razvojem kaže kot perspektivna alternativa za dopolnitev in nadomestitev tehnologije CMOS. Številna velika podjetja so razvila in izdelala svoje kvantne računalnike ter prikazala njihovo delovanje. Med najbolj znanimi so izvedbe:

- IBM,
- Google,
- Intel,
- Rigetti,
- D-Wave Systems
- ter mnoga druga podjetja in univerze po celem svetu.

Raziskovalci so predstavili kvantne algoritme (npr. Shorov in Groverjev), ki imajo manjšo časovno kompleksnost kot najboljši klasični algoritmi. To bi lahko privedlo do eksponentno hitrejšega reševanja določenih problemov, vendar zaenkrat praktične implementacije teh algoritmov še niso skalabilne. V zadnjem času pa so fizično izdelali kvantne računalnike, ki nekatere probleme rešijo hitreje od najzmogljivejših klasičnih računalnikov, s čimer so prikazali t.i. "quantum supremacy". Med najbolj odmevnimi izvedbami sta Googlov procesor Sycamore [8] in računalnik Zuchongzhi, razvit na univerzi USTC [9].

Cilj seminarske naloge s področja kvantnega računalništva je spoznavanje osnovnih konceptov te procesne platforme. V nadaljevanju je naštetih nekaj predlogov tem (odebeljeno besedilo). Za seminarsko nalogo si izberite eno izmed njih, lahko pa predlagate tudi kakšno drugo temo s tega področja.

Ker kvantni računalniki še niso v splošni uporabi, se za analizo delovanja uporabljajo razni simulatorji, s katerimi lahko načrtujemo, implementiramo in simuliramo delovanje kvantnih algoritmov. V številnih programskih jezikih je bilo razvitih mnogo simulatorjev z različnimi funkcijami in lastnostmi. Obsežen seznam se nahaja na spletni strani Quantiki. Ena izmed tem seminarske naloge je **načrtovanje in implementacija kvantnih algoritmov v več različnih simulatorjih**. Pri tem predstavite prednosti in slabosti izbranih simulatorjev in njihove koristne funkcije.

Za fizično implementacijo kvantnih računalnikov so raziskovalci ponudili številne tehnologije in v izbranih dejansko realizirali procesorje. Med tehnologijami so superprevodna vezja, ujeti ioni, kvantne pike, jedrska magnetna resonanca, uporaba fotonov, elektronov in številni drugi predlogi. V seminarski nalogi lahko **predstavite predlagane tehnologije, njihove prednosti in slabosti ter primere fizične implementacije**.

Razvitih je bilo mnogo kvantnih algoritmov, ki predstavljajo reševanje problemov učinkoviteje kot s klasičnimi računalniki. V seminarju lahko **izvedete podrobno analizo kompleksnega kvantnega algoritma**. Pri tem algoritem načrtujete in implementirate v simulatorju, analizirate njegovo kompleksnost, simulirate delovanje z različnimi vhodnimi podatki in predlagate možne optimizacije katerega od parametrov algoritma.

Sčasoma želimo splošno uporabljati univerzalne kvantne računalnike, s katerimi lahko izvedemo poljubno aplikacijo, kot sedaj to omogočajo klasična vezja. Trenutno pa realizacije kvantnih računalnikov prikazujejo svojo učinkovitost pri reševanju specifičnih nesplošnih problemov. **Navedite nekatere od teh problem-skih področij (npr. boson sampling), jih podrobno opišite in predstavite obstoječe ter potencialne rešitve.**

Za izdelavo skalabilnih kvantnih računalnikov je zelo pomembno popravljanje napak pri kvantnem procesiranju, ki se zaradi lastnosti kvantnih delcev precej razlikuje od popravljanja napak pri klasičnem procesiranju. **Podrobno preučite algoritme za popravljanje napak pri kvantnem procesiranju, jih implementirajte, prikažite njihovo delovanje z uporabo simulatorja in analizirajte njihove lastnosti.**



# Kazalo

<b>1</b>	<b>Contribution Title</b> . . . . .	11
	Name of First Author and Name of Second Author	
1.1	Section Heading . . . . .	11
1.2	Section Heading . . . . .	12
1.2.1	Subsection Heading . . . . .	12
1.3	Section Heading . . . . .	14
1.3.1	Subsection Heading . . . . .	15
	Appendix . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Implementacija reverzibilnega MUX s QCA</b> . . . . .	17
	Anže Arhar, Kristjan Kostanjšek in Nejc Ločičnik	
2.1	Uvod . . . . .	17
2.1.1	QCA . . . . .	18
2.1.2	Reverzibilno procesiranje . . . . .	19
2.2	Multiplekser . . . . .	20
2.3	Metode . . . . .	22
2.3.1	Realizacija reverzibilnega 2:1 multiplekserja s QCA . . . .	22
2.3.2	Realizacija reverzibilnega 4:1 multiplekserja s QCA . . . .	24
2.4	Rezultati . . . . .	26
2.5	Zaključek . . . . .	26
2.6	Doprinosi avtorjev . . . . .	27
	<b>Literatura</b> . . . . .	29



# Poglavje 1

## Contribution Title

Name of First Author and Name of Second Author

**Povzetek** Each chapter should be preceded by an abstract (10–15 lines long) that summarizes the content. The abstract will appear *online* at `www.SpringerLink.com` and be available with unrestricted access. This allows unregistered users to read the abstract as a teaser for the complete chapter. As a general rule the abstracts will not appear in the printed version of your book unless it is the style of your particular book or that of the series to which your book belongs.

Please use the 'starred' version of the new Springer `abstract` command for typesetting the text of the online abstracts (cf. source file of this chapter template `abstract`) and include them with the source files of your manuscript. Use the plain `abstract` command if the abstract is also to appear in the printed version of the book.

### 1.1 Section Heading

Use the template `chapter.tex` together with the Springer document class `SVMono` (monograph-type books) or `SVMult` (edited books) to style the various elements of your chapter content in the Springer layout.

[10]

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations. And please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

---

Name of First Author

Name, Address of Institute, e-mail: `name@email.address`

Name of Second Author

Name, Address of Institute e-mail: `name@email.address`

## 1.2 Section Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations.

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

Use the standard `equation` environment to typeset your equations, e.g.

$$a \times b = c, \quad (1.1)$$

however, for multiline equations we recommend to use the `eqnarray` environment<sup>1</sup>.

$$\begin{aligned} a \times b &= c \\ \vec{a} \cdot \vec{b} &= \vec{c} \end{aligned} \quad (1.2)$$

### 1.2.1 Subsection Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Please do not use quotation marks when quoting texts! Simply use the `quotation` environment – it will automatically render Springer’s preferred layout.

#### 1.2.1.1 Subsubsection Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.1, see also Fig. 1.1<sup>2</sup>

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

---

<sup>1</sup> In physics texts please activate the class option `vecphys` to depict your vectors in *boldface-italic* type - as is customary for a wide range of physical subjects

<sup>2</sup> If you copy text passages, figures, or tables from other works, you must obtain *permission* from the copyright holder (usually the original publisher). Please enclose the signed permission with the manuscript. The sources must be acknowledged either in the captions, as footnotes or in a separate section of the book.

## Paragraph Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

For typesetting numbered lists we recommend to use the `enumerate` environment – it will automatically render Springer’s preferred layout.

1. Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development.
  - a. Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development.
  - b. Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development.
2. Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development.

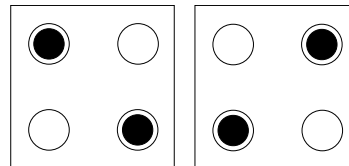
## Subparagraph Heading

In order to avoid simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2, see also Fig. 1.2.

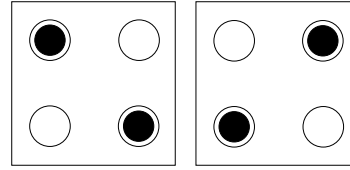
For unnumbered list we recommend to use the `itemize` environment – it will automatically render Springer’s preferred layout.

- Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development, cf. Table 1.1.
  - Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeconomic development.

**Slika 1.1** If the width of the figure is less than 7.8 cm use the `sidecaption` command to flush the caption on the left side of the page. If the figure is positioned at the top of the page, align the sidecaption with the top of the figure – to achieve this you simply need to use the optional argument `[t]` with the `sidecaption` command



**Slika 1.2** If the width of the figure is less than 7.8 cm use the `sidecaption` command to flush the caption on the left side of the page. If the figure is positioned at the top of the page, align the sidecaption with the top of the figure – to achieve this you simply need to use the optional argument `[t]` with the `sidecaption` command



- Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioe-  
conomic development.
- Livelihood and survival mobility are oftentimes coutcomes of uneven socioeco-  
nomic development.

**Run-in Heading Boldface Version** Use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

*Run-in Heading Italic Version* Use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Tabela 1.1: Please write your table caption here

Classes	Subclass	Length	Action Mechanism
Translation	mRNA <sup>a</sup>	22 (19–25)	Translation repression, mRNA cleavage
Translation	mRNA cleavage	21	mRNA cleavage
Translation	mRNA	21–22	mRNA cleavage
Translation	mRNA	24–26	Histone and DNA Modification

<sup>a</sup> Table foot note (with superscript)

### 1.3 Section Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

If you want to list definitions or the like we recommend to use the Springer-enhanced `description` environment – it will automatically render Springer’s preferred layout.

- Type 1    That addresses central themes pertaining to migration, health, and disease. In Sect. 1.1, Wilson discusses the role of human migration in infectious disease distributions and patterns.
- Type 2    That addresses central themes pertaining to migration, health, and disease. In Sect. 1.2.1, Wilson discusses the role of human migration in infectious disease distributions and patterns.

### 1.3.1 Subsection Heading

In order to avoid simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

If you want to emphasize complete paragraphs of texts we recommend to use the newly defined Springer class option `graybox` and the newly defined environment `svgraybox`. This will produce a 15 percent screened box ‘behind’ your text.

If you want to emphasize complete paragraphs of texts we recommend to use the newly defined Springer class option and environment `svgraybox`. This will produce a 15 percent screened box ‘behind’ your text.

#### 1.3.1.1 Subsubsection Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Please note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

**Theorem 1.1.** *Theorem text goes here.*

**Definition 1.1.** Definition text goes here.

*Dokaz.* Proof text goes here.  $\square$

### Paragraph Heading

Instead of simply listing headings of different levels we recommend to let every heading be followed by at least a short passage of text. Further on please use the  $\LaTeX$  automatism for all your cross-references and citations as has already been described in Sect. 1.2.

Note that the first line of text that follows a heading is not indented, whereas the first lines of all subsequent paragraphs are.

**Theorem 1.2.** *Theorem text goes here.*

**Definition 1.2.** Definition text goes here.

*Dokaz.* Proof text goes here. □

**Acknowledgements** If you want to include acknowledgments of assistance and the like at the end of an individual chapter please use the `acknowledgement` environment – it will automatically render Springer’s preferred layout.

## Appendix

When placed at the end of a chapter or contribution (as opposed to at the end of the book), the numbering of tables, figures, and equations in the appendix section continues on from that in the main text. Hence please *do not* use the `appendix` command when writing an appendix at the end of your chapter or contribution. If there is only one the appendix is designated “Appendix”, or “Appendix 1”, or “Appendix 2”, etc. if there is more than one.

$$a \times b = c \tag{1.3}$$



## Poglavje 2

# Implementacija reverzibilnega MUX s QCA

Anže Arhar, Kristjan Kostanjšek in Nejc Ločičnik

**Povzetek** V seminarski nalogi smo realizirali in preizkusili tri različne obstoječe implementacije Fredkinovih vrat. Primerjali smo jih glede na pravilnost delovanja, število uporabljenih celic, površino, energijsko razpršitev in število potrebnih urnih ciklov. Najbolj perspektivno implementacijo smo v nadaljevanju uporabili za izdelavo kompleksnejšega 4:1 multiplekserja.

### 2.1 Uvod

S sodobnim razvojem nanotehnologij tako na tehnološkem (razvoj novih materialov in načinov njihove obdelave) kot na procesnem področju (implementacija nadzorljivih dinamičnih procesov) se posledično razvija tudi področje nanoračunalništva. Trenutni kazalniki razvoja na področju nanoračunalništva dolgoročno nakazujejo na pospešen razvoj kvantnih računalnikov. Ti bodo ob adopciji v industriji prinesli prednosti, kot so energijska varčnost, pospešitev obstoječih algoritmov in minimizacija procesnih enot.

Ena izmed perspektivnih tehnologij, ki omogoča zgoraj opisane prednosti kvantnega računalništva je QCA (angl. *quantum-dot cellular automata*).

---

Anže Arhar

UL FRI, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, e-mail: aa3178@student.uni-lj.si

Kristjan Kostanjšek

UL FRI, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, e-mail: kk7609@student.uni-lj.si

Nejc Ločičnik

UL FRI, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, e-mail: nl4952@student.uni-lj.si

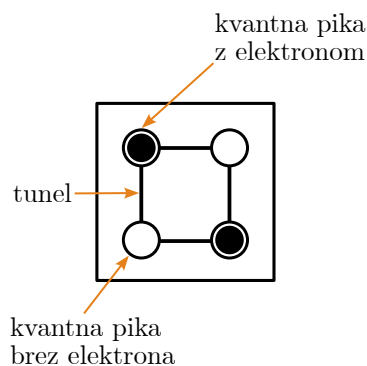
### 2.1.1 QCA

Delovanje QCA procesne strukture temelji na zakonih delovanja kvantne fizike. Najmanjša osnovna komponenta QCA je kvantna ali QCA celica. Ta je laično predstavljena kot dvodimenzionalna struktura kvadratne oblike s štirimi kvantnimi pikami v robovih celice. Vsaka kvantna pika ima pozitiven električni naboj, ki privlači dva elektrona, ki sta ujeta znotraj celične strukture. Zaradi električnih odbojnih sil med obema elektronoma, se ta ne moreta istočasno nahajati v isti kvantni piki. Kvantne pike so v celici povezane s štirimi tuneli, ki omogočajo prosto prehajanje ali tuneliranje elektronov med sosednjimi kvantnimi pikami. Shematski prikaz kvantne celice je prikazan na sliki 2.1.

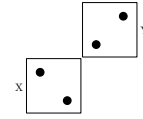
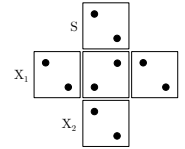
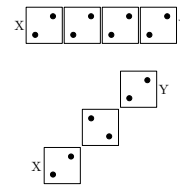
Elektrona v kvantni celici se vedno postavita v energetske najbolj ugodni poziciji, kar je ena izmed diagonalnih leg (polarizacija  $P = +1$  ali  $P = -1$ ). S prostim prehodom elektronov v celici je omogočen prenos informacij med sosednjimi kvantnimi celicami. Ker lega elektronov v celici vpliva na lego elektronov v sosednjih celicah, lahko s skrbno postavljenimi celicami izdelamo minimalne strukture, kot so vodila ali druge logične strukture.

Na slikah 2.2 in 2.3 sta predstavljena osnovna gradnika za dvovrednostno procesiranje v QCA. To sta negacija (NOT) in majoritetna vrata (delimo jih na AND in OR del), ki skupaj tvorita poln funkcijski nabor, s katerim lahko izrazimo katerokoli poljubno funkcijo.

Poleg gradnikov potrebujemo tudi strukturo za prenos informacij med gradniki. Tu uporabimo vodila, ki so lahko realizirana v ortogonalni ali diagonalni izvedbi. Pri slednji moramo paziti, da se z vsako celico prenešen podatek negira. Slika 2.4 prikazuje shematski prikaz obeh vrst vodil.



**Slika 2.1** Struktura kvantne celice

**Slika 2.2** Realizacija negacije (NOT)**Slika 2.3** Realizacija majoritetnih vrat**Slika 2.4** Realizacija vodil

### 2.1.2 Reverzibilno procesiranje

Za učinkovito realizacijo kvantnega procesiranja potrebujemo vezje zasnovati z metodološkim pristopom reverzibilnosti. Ta pristop sloni na definiciji logične reverzibilnosti, ki pravi, da mora biti njegova prevajalna funkcija bijektivna.

Pravilnostne tabele bijektivnih funkcij tipa (1,1) (funkcije z enim vhodom in enim izhodom) so predstavljene v tabeli 2.1. Od naštetih funkcij sta reverzibilni le identiteta in negacija.

Tabela 2.1: Tabela: Pravilnostna tabela funkcij tipa (1,1)

$x$	identiteta	negacija	konstanta 0	konstanta 1
0	0	1	0	1
1	1	0	0	1

Najboljšo osnovo za prehod na reverzibilno procesiranje naj bi predstavljale funkcije tipa (3,3). Tu izmed vseh funkcij izpostavljam Toffolijeva vrata (Controlled-controlled-not ali CCNOT), ki sama po sebi predstavljajo poln funkcijski nabor. Shematski prikaz je prikazan na sliki 2.5.

Prav tako izpostavljam univerzalno Fredkinovo funkcijo (Controlled-swap ali CSWAP), katere pravilnostna tabela je napisana v tabeli 2.2. Ta funkcija prav tako predstavlja poln funkcijski nabor.

**Slika 2.5** Shematski prikaz  
Toffolijevih vrat

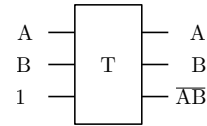
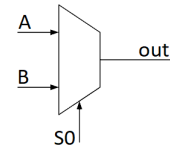


Tabela 2.2: Tabela: Pravilnostna tabela Fredkinove funkcije tipa (3,3)

$A$	$B$	$C$	$P$	$Q$	$R$
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1

## 2.2 Multiplekser

Multiplekser (okrajšano MUX) je logično vezje z  $2^n$  vhodnimi signali,  $n$  adresnimi signali in enim izhodnim signalom. Deluje kot stikalo, ki omogoča izbiro enega izmed več vhodov, glede na adresne signale. Slika 2.6 prikazuje najbolj osnoven 2:1 multiplekser z dvema vhodnima signaloma, enim adresnim signalom in enim izhodnim signalom.

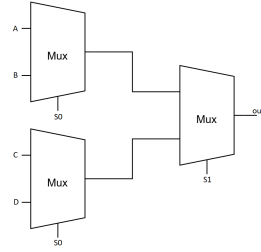


**Slika 2.6** 2:1 multiplekser

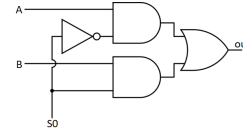
Multiplekserji imajo več praktičnih primerov uporabe, med katerimi so: izbira podatkov iz različnih virov (pomnilniški čipi, strojne periferne naprave) v računalniških sistemih, časovno multipleksiranje (angl. Time-Division Multiplexing) v digitalnih komunikacijah, usmerjanje analognih signalov in drugi. Multiplekser predstavlja polni funkcijski nabor, torej je z njim mogoče implementirati poljubno logično funkcijo. Prav tako lahko osnovne 2:1 multiplekserje uporabimo za realizacijo kompleksnejših multiplekserjev (npr. 4:1 MUX, 8:1 MUX...), kot je prikazano na sliki 2.7.

Slika 2.8 predstavlja najbolj osnovno logično predstavitev multiplekserja, izvedeno z uporabo osnovnih logičnih vrat AND, OR in NOT.

**Slika 2.7** Realizacija 4:1  
multiplekserja z uporabo treh  
2:1 multiplekserjev



**Slika 2.8** Realizacija 2:1  
multiplekserja z uporabo  
AND, OR in NOT vrat



Vseeno pa nam takšna realizacija multiplekserja ne ustreza, saj vezje ni reverzibilno, kar je očitno že iz neujemanja števila vhodov in števila izhodov. Za realizacijo logično reverzibilnega multiplekserja smo se odločili uporabiti Fredkinovo funkcijo (imenovano tudi Controlled SWAP oziroma C-SWAP), definirano s sledečimi logičnimi izrazi (za vhodne signale  $S0$ ,  $A$  in  $B$ ):

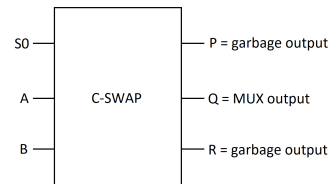
$$P = S0 \quad (2.1)$$

$$Q = (\text{NOT } S0 \text{ AND } A) \text{ OR } (S0 \text{ AND } B) \quad (2.2)$$

$$R = (\text{NOT } S0 \text{ AND } B) \text{ OR } (S0 \text{ AND } A) \quad (2.3)$$

Realizacija multiplekserja s Fredkinovo funkcijo je trivialna: na izhodu  $Q$  dobimo MUX izhodni signal, medtem ko  $P$  in  $R$  postaneta neuporabna (angl. garbage) izhoda. Za lažjo predstavitev je realizacija 2:1 MUX z uporabo Fredkinovih vrat prikazana na sliki 2.9, kjer signal  $S0$  predstavlja adresni signal multiplekserja in signala  $A$  in  $B$  predstavljata vhodna signala multiplekserja.

**Slika 2.9** Realizacija 2:1  
multiplekserja z uporabo  
Fredkinovih vrat (C-SWAP)



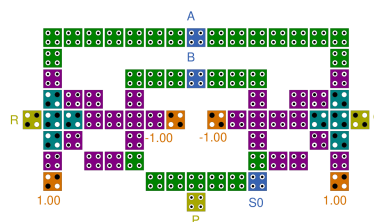
## 2.3 Metode

### 2.3.1 Realizacija reverzibilnega 2:1 multiplekserja s QCA

Kot smo ugotovili v poglavju 2.2, za realizacijo 2:1 multiplekserja potrebujemo zgolj eno instanco Fredkinovih vrat. V tem poglavju bomo implementirali različne realizacije Fredkinovih vrat v QCA z uporabo orodja QCADesigner [11].

#### 2.3.1.1 Prva implementacija Fredkinovih vrat

Najprej smo z orodjem QCADesigner implementirali Fredkinova vrata iz članka [12]. Postavitev celic je predstavljena na sliki 2.10. Za realizacijo smo uporabili 73 QCA celic in tri urine cikle. Vhodna celica  $S0$  predstavlja adresni signal, vhodni celici  $A$  in  $B$  pa vhodna signala v multiplekser. Izhodni signal  $Q$  predstavlja izhod iz multiplekserja medtem ko, izhodna signala  $P$  in  $R$  predstavljata neuporabna izhoda.



**Slika 2.10** Realizacija prvih Fredkinovih vrat s QCA

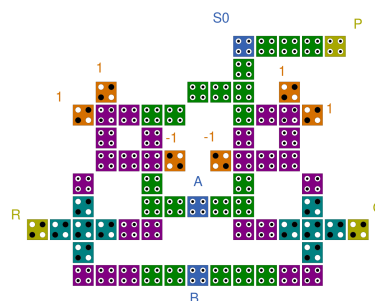
Rezultati simulacije Fredkinovih vrat so prikazani na sliki 2.11. Primerjava teh rezultatov s pravilnostno tabelo Fredkinovih vrat 2.2 potrjuje, da vezje deluje pravilno.

#### 2.3.1.2 Druga implementacija Fredkinovih vrat

Za drugo različico implementacije Fredkinovih vrat smo si izbrali članek [13]. Postavitev celic je predstavljena na sliki 2.12. Tokrat smo za realizacijo uporabili 68 celic in tri urine cikle. Vhodni in izhodni signali imajo zopet enaka poimenovanja.

Rezultati simulacije so predstavljeni na sliki 2.13. Po podrobnem pregledu lahko ugotovimo, da se rezultati ne ujemajo popolnoma s pravilnostno tabelo Fredkinovih vrat. Napaka se pojavi, ko so vhodni signali  $S0$ ,  $A$  in  $B$  nastavljeni na 1, 1 in 0, v tem zaporedju. Izhodni signal  $R$  bi v tem primeru moral biti nastavljen na 1, mi pa smo dobili izhodno vrednost 0. Kljub ugotovljeni napaki bi to vezje lahko uporabili za implementacijo multiplekserja, saj se napaka pojavi zgolj na neuporabnem (garbage) izhodnem signalu. Glavni izhodni signal  $Q$ , ki predstavlja izhod multiplekserja, ostaja nepokvarjen in deluje skladno s pričakovanji.

**Slika 2.11** Rezultati simulacije prvih Fredkinovih vrat s QCA



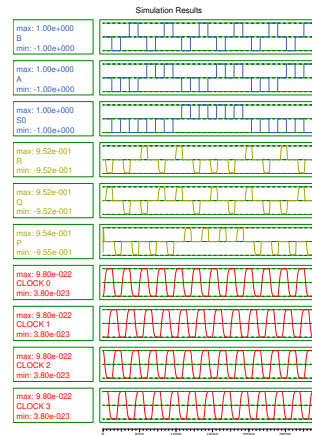
**Slika 2.12** Realizacija drugih Fredkinovih vrat s QCA

### 2.3.1.3 Tretja implementacija Fredkinovih vrat

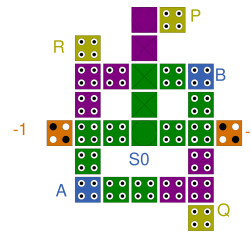
Za tretjo različico implementacije Fredkinovih vrat smo si izbrali članek [14]. Postavitev celic je predstavljena na sliki 2.14. Tokrat smo za realizacijo uporabili 30 celic v treh slojih (za prehod), ki se izvede v dveh urinih ciklih. Vhodni in izhodni signali imajo zopet enaka poimenovanja.

Ta realizacija je v primerjavi s prvima dvema bistveno bolj kompaktna. Dobra je tudi njena simetričnost, ki dovoljuje različne orientacije/konfiguracije na površini iste velikosti.

Rezultati simulacije Fredkinovih vrat so prikazani na sliki 2.15. Primerjava teh rezultatov s pravilnostno tabelo Fredkinovih vrat 2.2 potrjuje, da vezje deluje pravilno.



**Slika 2.13** Rezultati simulacije drugih Fredkinovih vrat s QCA



**Slika 2.14** Realizacija tretjih Fredkinovih vrat s QCA

### 2.3.2 Realizacija reverzibilnega 4:1 multiplekserja s QCA

Realizacija 4:1 reverzibilnega MUX (RMUX) je kot je opisano (ref nazaj na 2.2 k je standard 4:1 slika) iz vidika logike enostavna, saj lahko kaskadno dodajamo 2:1 multipleksorje (npr. 3x 2:1 MUX za 4:1 MUX, 7x 2:1 MUX za 8:1 MUX).

Na voljo imamo prvo in tretjo različico 2:1 RMUX realizacije, saj druga ni delovala. Za poizkus smo se odločili za tretjo različico, saj je bistveno bolj kompaktna in se izvede v samo dveh urinih ciklih. V teoriji bi se potem 4:1 RMUX lahko izvedel v enem urinem ciklu (4 fazah).

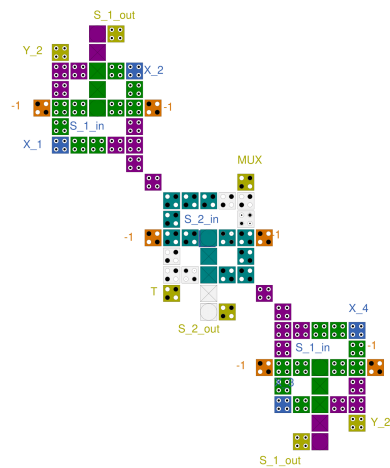
Na koncu se je izkazalo, da je kompaktnost, za katero smo mislili da je prednost, dejansko slabost. Nikakor nam ni uspelo povezati izhod enega 2:1 RMUX-a na vhod drugega. Problem je pri poziciji vhodov. Edina možnost, kjer konstanta ob strani ne popači vhoda ali vhod ne popači izhoda za kontrolni signal ( $P$ ) je, da signal pripeljemo po diagonali (negacija), ki pa žal ni dovolj močan (pade nazaj v nevtrarno stanje oz. nima dovolj moči, da deluje kot vhod/konstanta). To je prikazano na sliki





**Slika 2.15** Rezultati simulacije tretjih Fredkinovih vrat s QCA

2.15, kjer vidimo, da sta vhodna signala na srednjem RMUX-u dovolj šibka, da vse celice srednjega RMUX-a konvergirajo v stanje 0 (-1 polarizacija), zaradi konstant.



**Slika 2.16** Poizkus realizacije 4:1 RMUX

Če bi takšna konfiguracija delovala, bi jo lahko enostavno razširili na 8:1 RMUX. Iz teh poskusov smo ugotovili, da ob preveč kompaktnih realizacijah nimamo dovolj fleksibilnosti za vodila in jih je težko uporabiti kot bloke za bolj kompleksne logične funkcije. V tem primeru je bolje ustvariti čisto drugo realizacija QCA.

## 2.4 Rezultati

Tabela 2.3: Rezultati

Vir MUX	Število celic	Površina [ $\mu m^2$ ]	Razpršitev energije [eV]	Število urinih ciklov	Deluje
2:1	73	0.08	2,91e-002 eV	3	Da
2:1	68	0.09	2,71e-002 eV	3	Ne
2:1	30	0.03	2.50e-002 eV	2	Da
/ 4:1	92	0.21	5.00e-002 eV	4	Ne

Kot je razvidno iz tabele 2.3, je najboljši 2:1 multiplekser (MUX) dosežen s tretjo implementacijo Fredkinovih vrat. Ta implementacija izstopa, ker je zgrajena iz najmanjšega števila celic, zavzema najmanjšo površino, ima najnižjo razpršitev energije, uporablja najmanj urinih ciklov in deluje pravilno. Zaradi teh prednosti se tretja implementacija izkazuje kot najbolj učinkovita rešitev v okviru izvedenih testiranj.

Prav tako lahko v tabeli opazimo korelacijo med številom celic in razpršitvijo energije. Ta povezava je pričakovana, saj večje število celic povečuje kompleksnost vezja, kar neposredno vpliva na višjo energijsko razpršitev in zmanjšano energijsko učinkovitost.

## 2.5 Zaključek

V seminarski nalogi smo najprej definirali logično reverzibilno realizacijo osnovnega 2:1 multiplekserja, z uporabo Fredkinovih vrat.

Nato smo v okolju QCA Designer preizkusili tri obstoječe implementacije Fredkinovih vrat, zgrajenih iz QCA celic, in jih medsebojno primerjali glede na pravilnost delovanja, število uporabljenih celic, površino, energijsko razpršitev in število potrebnih urinih ciklov. Na podlagi primerjav se je kot najboljša izkazala tretja implementacija, saj je dosegla najboljše rezultate na vseh ključnih metrikah.

V nadaljevanju smo poskusili uporabiti najboljšo obstoječo implementacijo Fredkinovih vrat za realizacijo kompleksnejšega 4:1 MUX-a. Pri tem smo naleteli na težave pri povezovanju več instanc Fredkinovih vrat, kar je preprečilo uspešno izvedbo.

Seminarska naloga torej potrjuje uporabnost Fredkinovih vrat za realizacijo multiplekserja, hkrati pa izpostavlja omejitve pri skaliranju vezij in grajenju kompleksnejših struktur v QCA tehnologiji.

## 2.6 Doprinosi avtorjev

Anže Arhar	Uvod, povzetek, izdelava shematskih slik, izdelava poročila
Kristjan Kostanjšek	Podpoglavje Multiplekser, prvi dve implementaciji Fredkinovih vrat, zaključek
Nejc Ločičnik	Tretja implementacija Fredkinovih vrat, realizacija reverzibilnega 4:1 multiplekserja



## Literatura

1. C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod, and G. H. Bernstein, "Quantum cellular automata," *Nanotechnology*, vol. 4, no. 1, p. 49, 1993.
2. P. D. Tougaw and C. S. Lent, "Logical devices implemented using quantum cellular automata," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, no. 3, pp. 1818–1825, 1994.
3. C. S. Lent and P. D. Tougaw, "A device architecture for computing with quantum dots," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 4, pp. 541–557, 1997.
4. R. Cowburn and M. Welland, "Room temperature magnetic quantum cellular automata," *Science*, vol. 287, no. 5457, pp. 1466–1468, 2000.
5. T. Toffoli, "Reversible computing," in *Proceedings of the 7th Colloquium on Automata, Languages and Programming*, (London, UK, UK), pp. 632–644, Springer-Verlag, 1980.
6. "The fantastical promise of reversible computing," <https://www.technologyreview.com/s/422511/the-fantastical-promise-of-reversible-computing>, 2011.
7. M. P. Frank, "Throwing computing into reverse," *IEEE Spectrum*, vol. 54, no. 9, pp. 32–37, 2017.
8. F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. Brandao, D. A. Buell, *et al.*, "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, vol. 574, no. 7779, pp. 505–510, 2019.
9. Y. Wu, W.-S. Bao, S. Cao, F. Chen, M.-C. Chen, X. Chen, T.-H. Chung, H. Deng, Y. Du, D. Fan, *et al.*, "Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor," *arXiv preprint arXiv:2106.14734*, 2021.
10. M. Mraz, "Kvantni celični avtomati," 2024.
11. K. Walus, T. Dysart, G. Jullien, and R. Budiman, "Qcadesigner: a rapid design and simulation tool for quantum-dot cellular automata," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 3, no. 1, pp. 26–31, 2004.
12. G. Singh, R. Sarin, and B. Raj, "Design and analysis of area efficient qca based reversible logic gates," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 52, pp. 59–68, 2017.
13. T. N. Sasamal, A. K. Singh, and U. Ghanekar, "Toward efficient design of reversible logic gates in quantum-dot cellular automata with power dissipation analysis," *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 57, pp. 1167 – 1185, 2017.
14. B. Safaiezhadeh, L. Kettunen, and M. Haghparast, "Novel high-performance qca fredkin gate and designing scalable qca binary to gray and vice versa," *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 79, pp. 7037 – 7060, 2023.