

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

ANALIZA MOŽNOSTI RAZŠIRJAVE PROSTORA STANJ KVANTNE CELICE KOT SESTAVNEGA DELA STRUKTURE KVANTNIH CELULARNIH AVTOMATOV

Diplomsko delo

Primož Pečar

Diplomsko delo je bilo predloženo kot delna
izpolnitev pogoja za pridobitev naziva
univerzitetni diplomirani inženir računalništva in informatike

Mentor: doc. dr. Miha Mraz

Ljubljana, september 2004

KAZALO

POVZETEK.....	I
ABSTRACT.....	III
SLOVAR UPORABLJENIH POJMOV IN KRATIC.....	V
SLIKE	VII
1. UVOD	1
2. KVANTNI CELULARNI AVTOMAT (QCA)	4
2.1. Splošna ideja.....	4
2.2. Kvantno zajetje	5
2.3. Celularni avtomat.....	7
2.4. Celica QCA.....	8
2.5. Interakcija z okolico.....	13
2.6. Model procesiranja	14
2.7. Preklapljanje QCA	17
2.7.1. Disipativno preklapljanje.....	17
2.7.2. Adiabarno preklapljanje.....	18
2.8. Adiabatna cevovodna arhitektura	20
2.9. Strukture QCA	23
2.9.1. Linija QCA	23
2.9.2. Logična vrata	25
2.9.3. Kompleksne strukture.....	27
2.9.4. Spomin	27
3. ZVEZNA KVANTNA CELICA	30
3.1. Splošna ideja.....	30
3.2. Model celice.....	31
3.3. Model linije.....	36
4. SIMULACIJA INTERAKCIJE ZVEZNIH KVANTNIH CELIC	37
4.1. Model elektrona v simulatorju.....	37
4.2. Model celice v simulatorju	40
4.3. Model linije v simulatorju.....	41
4.4. Simulator.....	41
5. REZULTATI SIMULACIJE	44
5.1. Interakcija dveh celic	44

5.2. Interakcija celic v liniji	50
6. ZAKLJUČEK	52
7. LITERATURA IN VIRI	55
8. ZAHVALA	57
9. IZJAVA	58

POVZETEK

Arhitekturni in tehnološki pristopi s pomočjo katerih se je v zadnjih letih dosegalo vedno boljše performanse integriranih vezij so skorajda dosegli svojo mejo. Trenutno osnovni gradniki električnih vezij (tranzistorji) dosegajo velikosti 90 nm, do leta 2010 pa se pričakuje velikosti okrog 50 nm. Pri gradnikih manjših od 50 nm se pojavlja problem predvsem zaradi odvajanja toplote proizvedene med preklopnim ciklom, povezovanja gradnikov in prevladovanja kvantno mehanskih učinkov. Nanotehnologija je omogočila razvoj celice QCA (*ang. "quantum-dot cellular automata"*) kot nadomestka tranzistorja, ki bi izkoriščal kvantno mehanske efekte in odpravil zgoraj opisane probleme. Na osnovi te celice so razvili majoritetna vrata, s katerimi so realizirali logična AND in OR vrata, negator in sekvenco celic s sposobnostjo prenašanja podatkov v binarni obliki. Tovrstna celica je lahko uporabljena tudi kot osnovna spominska celica. Slabost opisane celice je, da lahko zaseda samo dve stanji, kar omogoča le binarni zapis in s tem binarno predstavitev sveta. Živimo pa v analognem oz. zveznem svetu, od katerega sprejemamo večinoma zvezne podatke in signale.

V diplomskem delu smo si zadali nalogo izdelave modela celice, s katero bi razširili funkcionalnost celice QCA tako, da bi zasedala zvezen prostor stanj in omogočala predstavitev in procesiranje nad poljubnimi realnimi podatki. Predpostavili smo, da realizacija takšne "zvezne celice" v nanometerski velikosti lahko izkorišča kvantne efekte in prednosti le teh. Na osnovi te predpostavke temelji model "zvezne kvantne celice" na dveh mobilnih elektronih, ki sta ujeta v ciklični potencialni kanal. Elektron ne moreta uiti iz potencialnega kanala, lahko pa se v njem prosto gibljeta. Realen podatek v smislu zaloge stanj je predstavljen z lego elektronov v celici. Ta je opisana z odklonom navidezne črte med elektronoma kot fizikalno veličino. Interakcija med celicami temelji na Coulombovi odbojni sili med elektroni celic. Model "zvezne kvantne celice" smo preizkusili s pomočjo simulacije. Osnovni objekt simulacije je elektron. Tega smo simulirali s pomočjo animata. S simulacijo interakcije med elektroni smo simulirali posamezno celico, interakcijo med dvema celicama in interakcijo sekvence celic. Zanimala nas je predvsem funkcionalnost celice in sekvence celic, zato se pri modeliranu in simulaciji nismo podajali v njuno fizikalno zasnovo. Če bi bila realizacija zvezne kvantne celice mogoča, predvidevamo, da bi jo uporabili kot osnovni

gradnik struktur sposobnih prenosa realnih podatkov, procesiranja nad zveznim prostorom stanj in pomnjenja realnih podatkov.

ABSTRACT

In the last years there has been increasing concern that the limits of architectural and technological approaches used to improve integrated circuit performance will soon be reached. The size of the basic element of today (the transistor) is around 90 nm. It is expected that by the year 2010 its will be on the order of 50 nm. Among the chief technological limitations responsible for slowing down technology even with elements smaller than 50 nm are the interconnection problem and the problem of power dissipation during switch cycle. While searching methods to overcome these limitations nanotechnology developed the quantum-dot cellular automata (QCA) cell. The QCA cell is used as a direct substitute of the transistor and with benefits from quantum effects overcomes the above limitations. A line of QCA cells allows propagation of information and thus realizes a binary wire. With just a slight change of orientation an inverter can be realized also. However the key construct built from QCA cells is the majority logic gate (i.e. A special assemblage of QCA cells), which can be reduced to an AND and OR gate by fixing one of its inputs. Not only this, the same QCA cell can also be used as a basic memory cell. But the QCA cell is of a binary nature and thus allows only a binary representation of the universe. Our interaction with the universe is mostly not discrete.

We set ourselves the task of making a model of a cell that would expand the functionality of QCA cell. The modeled cell can occupy a continuous space of states, so we named it a “continuous quantum cell”. We presume that the continuous quantum cell can represent true real values and as such makes computing with them possible. It could also be used as the basic element of structures capable of propagation, processing and memorizing of true real values. We have presumed that the realization of a continuous cell in nano scale can exploit quantum effects and their advantages. Based on this assumption the model of the cell is based on two electrons captured in cyclic potential ditch. The electrons can not leave the ditch, but they can freely move in it. A real value is represented with the positioning of the electrons within the cell. The position is described by the declination of the virtual line that runs through the centre of the cell from one electron to the other. Intercell coupling is based on Coulomb's repulsion force among electrons. The model was tested through simulation. The simulated entity was a single electron developed using the animat methodology. Through experiments we observed the behavior of a single cell, the interaction between two cells and the

interactions in a line of cells. The primary was not the physical realization, but the cells feasibility.

SLOVAR UPORABLJENIH POJMOV IN KRATIC

QCA (*ang. "quantum-dot cellular automata"*) – Struktura imenovana kvantni celularni avtomat je sestavljena iz kvantnih celic in izkazuje obnašanje analogno obnašanju celularnega avtomata.

VLSI (*ang. "very large scale integration"*) – Tehnologija zelo goste integracije omogoča od 5000 do 50000 osnovnih elementov na posameznem vezju.

ULSI (*ang. "ultra large scale integration"*) – Tehnologija izredno goste integracije omogoča več kot 100000 osnovnih elementov na posameznem vezju.

CMOS (*ang. "complementary metal oxide semiconductor"*) – Vrsta tehnologije za izdelavo integriranih vezij.

SCN (*ang. "symmetric charge neutralization"*) – Simetrična nevtralizacija naboja.

Gonilnik (*ang. "driver"*) – Celica strukture sestavljene iz kvantnih celic, ki omogoča interakcijo z okoljem. Pravimo ji tudi vhodna celica saj omogoča vpis podatka iz okolja.

Vhodna celica (*ang. "input cell"*) – Enako kot gonilnik.

Izhodna celica (*ang. "output cell"*) – Celica strukture sestavljene iz kvantnih celic, ki omogoča okolju branje stanja strukture.

Notranja celica (*ang. "internal cell"*) – Vsaka celica strukture, ki ni vhodna ali izhodna celica.

Prosta celica – Vsaka celica strukture, ki ni vhodna celica oz. gonilnik.

Robno-gnano procesiranje (*ang. "edge-driven computing"*) – Načelo dovoljuje interakcijo strukture kvantnih celic z okoljem le preko vhodnih in izhodnih celic.

Procesiranje s stabilnim stanjem (*ang. "computing with ground state"*) – Načelo upošteva le stabilna stanja strukture kvantnih celic, ne pa dinamike prehajanja med stanji.

Zvezna celica – Celica z množico stanj, ki je ekvivalentna končnemu a zveznemu intervalu.

Zvezna kvantna celica – Model zvezne celice, ki upošteva kvantne efekte.

Prosta elektrona – Elektrona v cikličnem potencialnem kanalu, katerih medsebojni ostri kot je odvisen le od Coulombovih odbojnih sil.

Vpeta elektrona – Elektrona v cikličnem potencialnem kanalu, ki vedno oklepata kot π radianov.

SLIKE

Slika 1: Grafični prikaz Moore-ovega zakona.....	2
Slika 2: Trije tipi nanostruktur.....	6
Slika 3: Lastne energije omejenih stanj (črtkane črte) v četverkotni enodimenzionalni ploskvi in valovne funkcije teh stanj (polne črte).....	6
Slika 4: Standardna celica QCA prikazana v dveh možnih stabilnih stanjih ali polarizacijah, črte med točkami kažejo možnost tuneliranja.....	8
Slika 5: Možne geometrije celic QCA.....	9
Slika 6: Interakcija med dvema nasprotno polariziranimi celicama QCA.....	10
Slika 7: Sosednji celici QCA uskladita polarizaciji.....	11
Slika 8: Prevajalna funkcija interakcije dveh celic QCA.....	11
Slika 9: Dimenzije kvantne celice in oddaljenost kvantnih točk med dvema celicama.....	12
Slika 10: Interakcija polja QCA in celice QCA z okoljem.....	14
Slika 11: Shema preslikave fizikalnega delovanja strukture v računsko logiko.....	15
Slika 12: Disipativni preklon (polna puščica) in možnost metastabilnega stanja (črtkana puščica).....	17
Slika 13: Adiabato preklapljanje strukture QCA.....	19
Slika 14: Stopnje adiabatnega cevovodnega cikla.....	20
Slika 15: Linija z arhitekturo adiabatnega cevovoda.....	21
Slika 16: Struktura QCA z arhitekturo adiabatnega cevovoda.....	22
Slika 17: Dve izvedbi linije QCA.....	23
Slika 18: Križanje linij QCA.....	24
Slika 19: Razdelitev signala oz. fan-out.....	24
Slika 20: Osnovna izvedba inverterja (a) in robustnejše izvedbe (b, c).....	25
Slika 21: Trivhodna majoritetna vrata in logični simbol.....	26
Slika 22: Pravilnostna tabela AND, OR in majoritetnih vrat.....	26
Slika 23: Logična OR in AND vrata.....	27
Slika 24: Osnovna spominska celica (a) in robustnejše izvedbe (b,c).....	28
Slika 25: Shema spominske celice.....	29
Slika 26: Izvedba adiabatne QCA spominske celice.....	29
Slika 27: Zvezna kvantna celica.....	31
Slika 28: Interakcija med prostimi elektroni.....	33
Slika 29: Idealno ravnovesje elektronov.....	33

Slika 30: Odklon celice.....	34
Slika 31: Interakcija gonilnika (levo) in proste celice (desno).....	35
Slika 32: Idealna prevajalna funkcija.....	35
Slika 33: Linija zveznih celic.....	36
Slika 34: Model celice v simulatorju	40
Slika 35: Grafični vmesnik simulatorja	42
Slika 36: Odvisnost kota γ med prostima elektronoma od razdalje med celicama.....	44
Slika 37: Idealna in dejanska prevajalna funkcija interakcije gonilnika in celice s prostimi elektroni	45
Slika 38: Začetna pozicija.....	46
Slika 39: Kot γ med prostima elektronoma celice	46
Slika 40: Idealna in dejanska prevajalna funkcija interakcije gonilnika in celice z vpetimi elektroni	47
Slika 41: Odstopanje dejanske krivulje od idealne krivulje	47
Slika 42: Trenutno ravnovesno stanje.....	48
Slika 43: Prehod v ravnovesno stanje	49
Slika 44: Odvisnost prevajalne funkcije od oddaljenosti med celicama	49
Slika 45: Linija.....	50
Slika 46: Prevajalna funkcija linij različnih dolžin.....	51

1. UVOD

Nanotehnologija je v zadnjih letih postala eno izmed nejobetavnejših področij v tehnološkem razvoju naravoslovnih in tehničnih ved. V bližnji prihodnosti obeta številna odkritja, ki bodo omogočila tehnološki napredek širokega spektra aplikacij. Začetki nanotehnologije segajo v leto 1970 [8], vendar so se resnejše raziskave pričele v 90-tih letih prejšnjega stoletja. Do širšega zanimanja za nanotehnologijo je prišlo leta 1996, ko se je ustanovil forum pod pokroviteljstvom WTEC-a (World Technology Evaluation Center). Ta je pričel s študijo o raziskavah in razvoju na področju nanotehnologije s ciljem ocenitve njihovega potenciala v tehnološkem napredku.

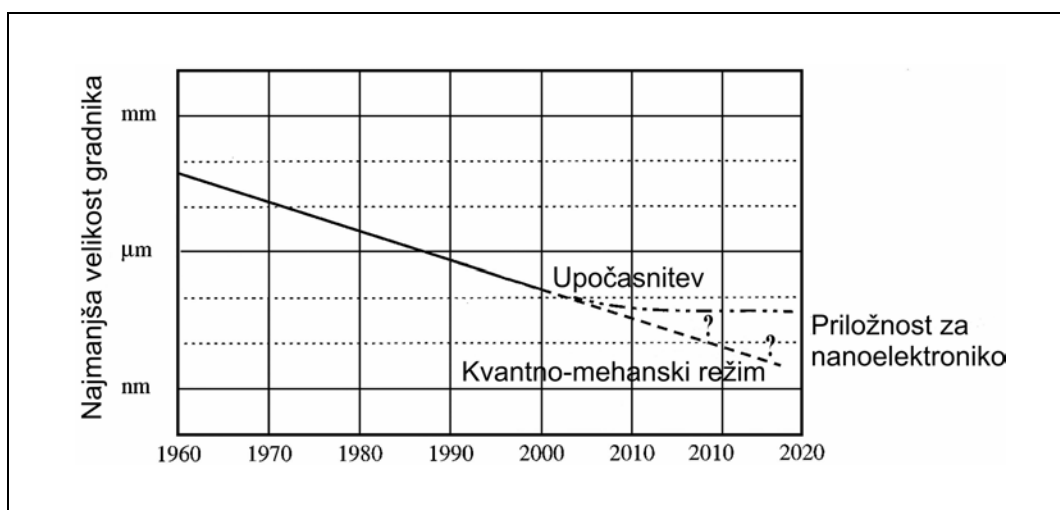
Nanotehnologija temelji na spoznanju, da delci manjši od 100 nanometrov ($100 \cdot 10^{-9} \text{m}$) določajo strukturam, katerih gradniki so, nove lastnosti in obnašanje. Te se razlikujejo od klasičnih fizikalnih lastnosti materialov. Do sprememb lastnosti in obnašanja pride, ker delci manjši od karakterističnih velikosti povezanih z določenim pojavom, razkrivajo novo kemijo in fiziko. To privede do obnašanja, ki je odvisno od velikosti delcev. Na primer, opaženo je bilo, da se električna struktura, prevodnost, reaktivnost, tališče in mehanske lastnosti spremenijo, ko velikost delcev postane manjša od kritične velikosti. Odvisnost obnašanja od velikosti delca omogoča kontrolo lastnosti delcev. V zaključku WTEC-ove študije je nanotehnologiji pripisan velik potencial razvoja in napredka v prihodnosti na različnih tehnoloških področjih, kot npr. proizvodnja trših in lažjih materialov, hitrejša razgradnja nano-obdelanih zdravil v človeškem telesu, povečanje kapacitete magnetnih medijev in pohitritev računalniškega procesiranja [8].

Ravno na področju pohitritve strojnega računalniškega procesiranja s pomočjo nanostruktur potekajo v zadnjih desetih letih številne raziskave. Sodobni računalniki so rezultat dveh idej: zapis informacije z binarnimi števili in predstavitev logične *1* in *0* kot *vključenega* oziroma *izključenega* stanja tokovnega stikala. Na začetku so bili uporabljeni elektromehanski releji, kasneje vakuumske triode, vse pa je na koncu nadomestil tranzistor. Predstavitev informacije z vklapljanjem in izklapljanjem tokovnih stikal je ena izmed najplodnejših idej v zgodovini tehnologije.

Ideja ima tudi nekaj resnih pomanjkljivosti, ki postajajo vedno bolj opazne z manjšanjem velikosti naprav. Manjše kot je stikalo, manjša je njegova sposobnost

čistega vklopa oz. izklopa. Zmanjša se tudi tok skozi stikalo, kar povzroča probleme pri povezovanju z ostalimi stikali. In končno, preklapljanje zahteva tok elektronov iz vira preko upornosti v zemljo, kar pomeni veliko izgubo oz. raztresanje energije [2].

Do današnjih dni tehnologija integriranih vezij tesno sledi slavnemu izreku direktorja Intela Gordona Moore-a iz leta 1965. Ta pravi, da se gostota tranzistorjev v čipu in njegova zmogljivost podvoji približno vsakih 18 mesecev [7]. Slika 1 prikazuje graf takoimenovanega Moore-ovega zakona. Iz njega je razvidno eksponentno zmanjševanje velikosti tranzistorja v zadnjih štirih desetletjih (polna črta) in možno nadaljevanje v prihodnosti (prekinjena črta).



Slika 1: Grafični prikaz Moore-ovega zakona

Neprestano zmanjševanje velikosti v mikroelektronski tehnologiji je pripeljalo do hitrejših naprav in gostejših polj vezij, kar se kaže v izboljšanju zmogljivosti čipov. Ne glede na to, kako dramatičen je bil tehnološki napredek, najmodernejši čipi še vedno slonijo na istih osnovah kot njihovi predhodniki izpred skoraj petdeset let. Zato se že dalj časa kažejo tehnološke in teoretične omejitve, ki zavirajo nadaljnje izboljšave. Te omejitve postanejo očitne, ko preidemo na nanometersko velikost. Pričakuje se, da se bo do leta 2010 doseglo velikosti reda 50 - 70 nm in s tem tudi mejo trenutne tehnologije [7].

Tehnološki omejitvi izdelave, odgovorni za upočasnitev napredka, sta problem povezovanja in problem disipacije energije. Pri veliki gostoti tranzistorjev, toplote proizvedene med preklopnim ciklom, ne moremo dovolj hitro odvesti. Lent [2] pravi, če bi se trenutne tranzistorje lahko zmanjšalo na velikost posamezne molekule, bi se lahko proizvedlo čipe z neverjetno gostoto, vendar bi se ti zaradi proizvedene toplote stopili v trenutku, ko bi jih priključili. Povezav ne moremo manjšati z enakim tempom kot manjšamo velikost tranzistorjev zaradi efektov upornosti in kapacitivnosti, kar predstavlja ozko grlo povezovanja. Potrebno bo uporabiti alternativne pristope, ki bodo pripeljali do novih postopkov litografije, s katerimi se bo zmanjšala odvisnost velikosti naprav od povezovanja, ali do novih vezij in sistemskih arhitektur, ki omogočajo večjo funkcionalnost samega tranzistorja [7].

Teoretične meje dosežemo z zmanjševanjem velikosti gradnikov, predvsem zaradi sprememb lastnosti pogojenih s fizikalnimi zakoni. Značilna sta pojava izgube kontrole vrat in pojav kvantno mehanskih efektov, ko naprave preidejo v nanometersko območje [7]. Trenutna CMOS (*ang. "complementary metal-oxide silicon"*) tehnologija temelji na gradnikih (tranzistorjih), ki so v bistvu napetostno kontrolirana tokovna stikala. V submikronskem področju zahtevana kontrola vrat ni več mogoča zaradi efekta kratkega kanala (*ang. "short channel effect"*) [7]. Delovanje gradnika se spremeni tudi zaradi kvantno mehanske narave elektronov, ki se začne kazati v submikronskem režimu. To privede do novih fizikalnih efektov.

Zaradi opisanih vzrokov se pričakuje, da bo konvencionalna silicijeva ULSI (*ang. "ultra large scale integration"*) tehnologija dosegla svoje meje s približevanjem nanometerskemu režimu. Pomanjšani tranzistorji, povezani v konvencionalni arhitekturi vezja, bodo nezadovoljivo delovali in sama izdelava bo naletela na neprehodne ovire [7]. Omejitve silicijevih vezij predstavljajo priložnost alternativnim tehnologijam, ki so prilagojene delovanju v nano režimu ter povezane v primerno arhitekturo.

Diplomsko delo podaja dosedanje ideje uporabe nanostruktur, predvsem kvantnih točk (*ang. "quantum dots"*), urejenih v lokalno povezana polja in uporabo le teh v procesiranju. Poleg tega pa predstavi tudi idejo zvezne kvantne celice in simulatorja delovanja le te.

2. KVANTNI CELULARNI AVTOMAT (QCA)

2.1. Splošna ideja

Arhitekturni in tehnološki pristopi s pomočjo katerih se je v zadnjih letih dosegalo vedno boljše performanse tokovnih naprav so skorajda dosegli svojo mejo. V zadnjih dvajsetih letih je prišlo do velikega napredka v elektroniki, predvsem v smeri manjšanja velikosti osnovnih gradnikov in s tem povečanja hitrosti integriranih vezij. Moore-ov zakon je zdržal dobrih 30 let, vendar mnogi strokovnjaki [1], [7], [8] menijo, da proces ne more vztrajati neomejeno. To nam kaže tudi graf na sliki 1. Trenutni gradniki dosegajo velikosti reda $0.09 \mu\text{m}$, do leta 2010 pa se pričakuje velikosti od $0.07 \mu\text{m}$ do $0.05 \mu\text{m}$ [1], [16].

Gradniki manjši od $0.05 \mu\text{m}$ so za trenutno tehnologijo problematični predvsem iz treh razlogov. Prvi, ki sem ga omenil že v uvodu, je visoka temperatura, ki se generira zaradi velike gostote gradnikov. Le ta naraste tako visoko, da dvigne delovno temperaturo gradnikov nad dovoljeno, kar zmanjša zmogljivost naprav zaradi šuma in elektro migracij v kovinskih povezavah. Povečanje kompleksnosti potrebnih povezav med gradniki v čipu je drugi razlog. Parazitska kapacitivnost povezav ravno tako vpliva na zmogljivost, predvsem na hitrost naprav. Tretji razlog pa so kvantno mehanski učinki, ki pričnejo prevladovati, s tem ko se zmanjšuje velikost gradnika. Prevlada teh učinkov vpliva na obnašanje naprav. V kvantnem režimu delovanja so potrebne nove izvedbe gradnikov, ki bi bodisi ublažile vplive kvantno mehanskih učinkov, bodisi jih izkoristile, kar bi bilo veliko bolje.

Predlagani so bili številni novi gradniki, ki bi nadomestili trenutno CMOS tokovno tehnologijo. Najbolj znani so tranzistor z enim samim elektronom (*ang. "single electron transistor"*), tranzistor z dvema elektronom (*ang. "double electron layer tunneling transistor"*) in kvantni celularni avtomat (*ang. "quantum-dot cellular avtomata, QCA"*).

V naslednjih poglavjih je opisan način procesiranja s kvantnimi točkami. Kvantni celularni avtomat ohranja idejo binarne predstavitve informacije. Binarna informacija ni klasično tokovno ali napetostno kodirana zaradi predhodno opisanih problemov v

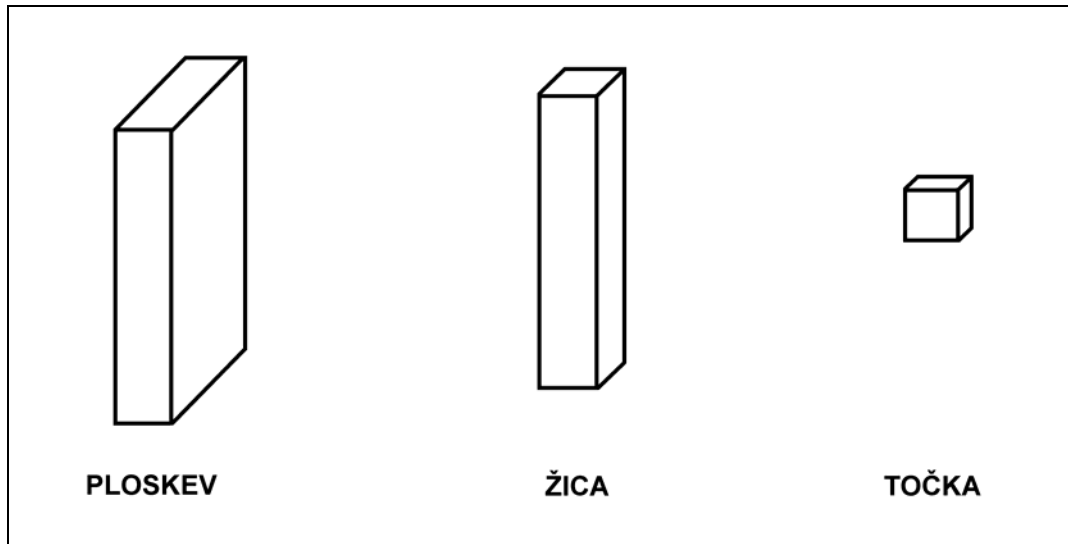
kvantnem režimu delovanja, pač pa je shranjena v konfiguraciji naboja posamezne kvantne celice. Osnova procesiranja in medsebojnega vpliva med celicami je Coulombova interakcija med elektroni. Kovinske povezave med celicami niso potrebne. S tem se izognemo problemom povezovanja. Posamezne celice ne potrebujejo napajanja ali dodatnih signalov in med njimi ne teče električni tok. V takem sistemu je disipacija energije skorajda nična, kar rešuje problem pregrevanja oz. celo taljenja čipa in omogoča normalno delovanje.

QCA se velikokrat napačno enači s kvantnim procesiranjem (*ang. "quantum computing"*). Medtem ko je kvantno procesiranje ena izmed alternativnih paradig procesiranja, je QCA dejansko le naprava. Kvantno procesiranje izkorišča dejstvo, da so stanja kvantno mehanskega sistema lahko superpozicije določenega števila različnih stanj. Vsaka operacija izvedena na enem izmed teh kompleksnih stanj se lahko učinkovito paralelno izvede v vseh stanjih, ki sestavljajo kompleksno stanje. To odpira možnosti veliko hitrejšega izvajanja določenih operacij, kot pa jih dopušča običajno procesiranje [9].

QCA lahko predstavlja osnovo novi generaciji digitalnih vezij, če ga bo tehnološko mogoče izdelati.

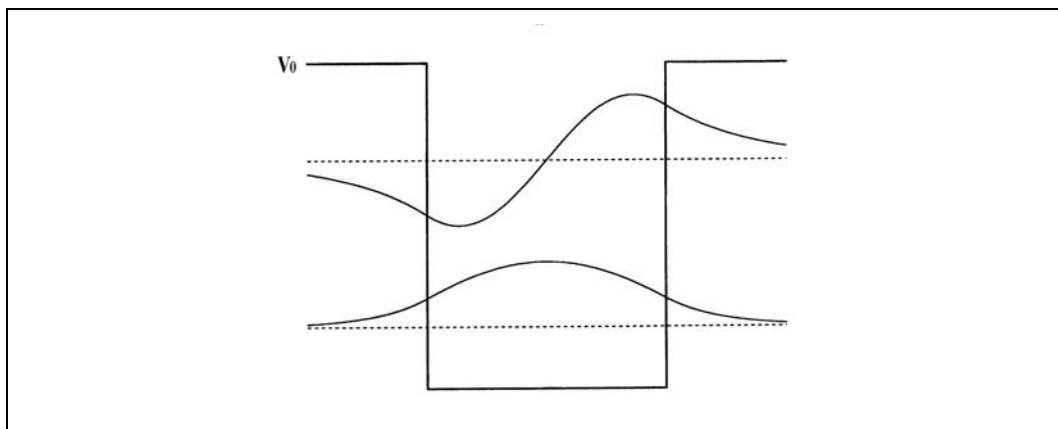
2.2. Kvantno zajetje

Osnova kvantne celice so kvantne točke oziroma zajetje elektronov v te točke. Fizika običajnih naprav temelji na modelu prostega elektrona, ki obravnava nosilce v materialu kot proste elektrone z zmanjšano efektivno maso. To se odraža tudi v lastnostih materiala [1]. Ko postanejo dimenzije naprav reda valovne dolžine elektrona, opisan model ni več dober, saj elektron lahko zaseda le diskretne vrednosti energije. Kvantnemu zajetju v eni dimenziji pravimo kvantna ploskev (*ang. "quantum well"*), le ena dimenzija tridimenzionalne nanostrukture je reda nanometra. Kvantnemu zajetju v dveh dimenzijah pravimo kvantna žica (*ang. "quantum wire"*), dve dimenziji tridimenzionalne nanostrukture sta reda nanometra. Z napredkom litografije je bilo doseženo tudi zajetje v treh dimenzijah, ki mu pravimo kvantna točka (*ang. "quantum dot"*). Slika 2 prikazuje vse tri tipe nanostruktur.



Slika 2: Trije tipi nanostruktur

Energetska stanja kvantnega vrelca so opisana z enačbo kvantne mehanike v [1], ki presega okvire diplomske naloge in ni navedena. Kvantna enačba ima dva tipa rešitev. Energija omejenih stanj je nižja od pregrade, energija razširjenih stanj pa višja. Valovna funkcija elektrona v potencialu četverkotne ploskve je sinusoidna v notranjosti ploskve in eksponentno pada izven nje. Valovna funkcija izven ploskve je majhna, vendar ni enaka nič v primeru končne višine pregrade. Rešitve omejenega stanja fizikalne enačbe so prikazane na sliki 3.



Slika 3: Lastne energije omejenih stanj (črtkane črte) v četverkotni enodimenzionalni ploskvi in valovne funkcije teh stanj (polne črte)

Med več kvantnimi ploskvami lahko pride tudi do povezovanja v primeru prekrivanja valovnih funkcij. Stabilno stanje para povezanih kvantnih ploskev je simetrična linearna kombinacija stabilnih stanj posameznih ploskev v primeru odsotnosti ostalih efektov. Obseg prekrivanja valovnih funkcij in s tem jakost tuneliranja med ploskvama je odvisna od višine in debeline pregrade med njima. Kvantna točka ustreza tridimenzionalni analogiji opisanega primera, saj je elektron omejen v vseh smereh [10].

2.3. Celularni avtomat

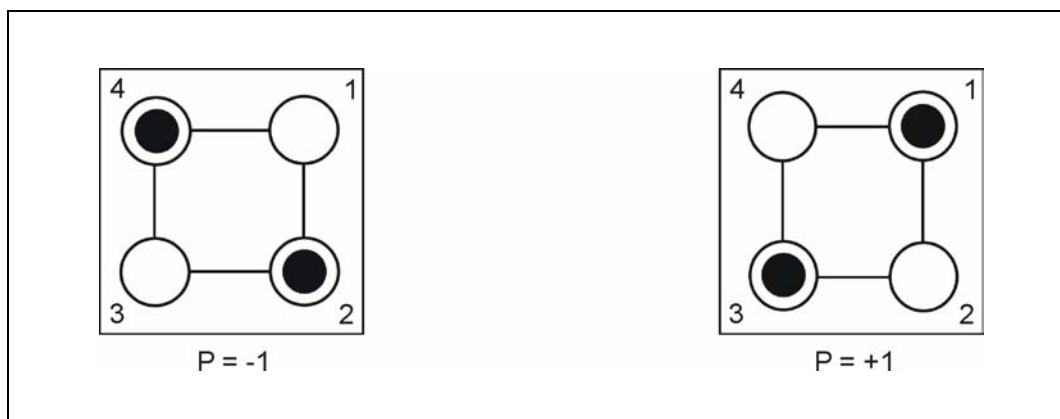
Celularni avtomat kot ga podaja Sipper [11] je diskretni dinamični sistem, katerega delovanje je odvisno od lokalnih relacij med celicami. Predstavljen je lahko kot polje identičnih celic s končnim številom možnih stanj. Časovna evolucija avtomata se izvaja v diskretnih časovnih korakih. Stanje opazovane celice v določenem časovnem trenutku je odvisno od stanja sosednjih celic v prejšnjem časovnem trenutku.

Kvantni celularni avtomat je poskus implementacije naprave, ki bo izkazala enako obnašanje kot celularni avtomat. Idejo QCA je prvi podal Lent [4], [6] s sodelavci na univerzi Notre Dame leta 1993. Zveza med kvantnim celularnim avtomatom, kot ga je podal Lent, in klasičnim celularnim avtomatom ni popolnoma neposredna. Celularni avtomat je določen z množico lokalnih pravil, ki določajo časovno evolucijo polja. Na kvantni celularni avtomat vplivajo tako lokalni kot tudi globalni efekti. Medtem ko čas celularnega avtomata teče v diskretnih korakih imenovanih generacije, časovna evolucija kvantnega celularnega avtomata poteka zvezno. Za izvajanje procesiranja nas pri kvantnem celularnem avtomatu v bistvu ne zanima časovna evolucija, pač pa le konfiguracija končnega stabilnega stanja povezana z določenim vhodnim stanjem. Celularni avtomati so ponavadi sestavljeni iz homogenih polj celic z enako oddaljenostjo med posameznimi celicami. Celice v QCA so lahko različno porazdeljene in oddaljenost med celicami ni nujno enaka. QCA je podan kot polje celic, ki čutijo medsebojni vpliv, njihovo obnašanje pa je, podobno kot pri celularnem avtomatu, določeno z interakcijo med sosednjimi celicami. Torej gre pri kvantnem celularnem avtomatu bolj za analogijo celularnemu avtomatu.

2.4. Celica QCA

Naprave QCA, ki jih je predlagal Lent s sodelavci, izkoriščajo pri svojem delovanju kvantne efekte, kar hkrati pomeni zmanjšanje problemov povezanih s pregrevanjem in povezavami. Običajna struktura QCA je sestavljena iz celic, ki so med seboj povezane v strukturo podobno mreži. Vsaka celica vsebuje omejeno število nabojev in vpliva na sosednjo celico s Coulombovimi efekti. Znotraj celic je naboj dovoljen le v določenih področjih. Med temi področji lahko tunelira. QCA deluje v režimu kjer Coulombovi efekti prevladujejo nad tuneliranjem. Z ustrezno razporeditvijo celic se lahko doseže obnašanje, ki posnema delovanje žice in običajnih logičnih vrat. Ker je interakcija med celicami odvisna le od Coulombovega efekta, so vse električne povezave izvedene le na robovih vezja, znotraj vezja povezave niso potrebne. S takoimenovanim “robnim procesiranjem” (ang. “*edge computing*”) se izognemo problemom povezovanja tesno združenih gradnikov in z njimi povezanih omejitev hitrosti.

Standardna celica QCA je sestavljena iz štirih kvantnih točk nameščenih v vogale kvadrata. Slika 4 prikazuje tako celico.



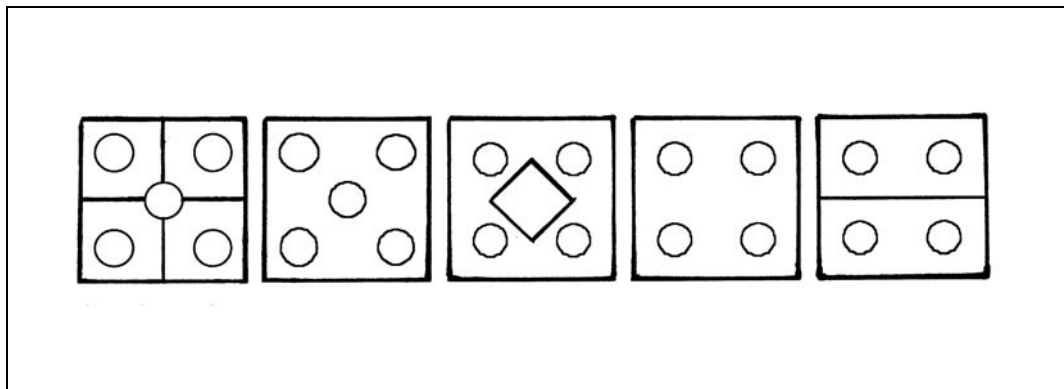
Slika 4: Standardna celica QCA prikazana v dveh možnih stabilnih stanjih ali polarizacijah, črte med točkami kažejo možnost tuneliranja

Celica vsebuje dva mobilna elektrona, ki lahko tunelirata med točkami. Tuneliranje elektronov izven celice ni mogoče, saj se predpostavlja, da je popolnoma zadušeno s potencialnimi pregradami med celicami. Zaradi Coulombove odbojne sile, se elektrona postavita v nasprotna vogala celice. V vsakem trenutku obstajata dve enako verjetni poti tuneliranja oziroma dve energijsko ekvivalentni razporeditvi elektronov, kar pomeni

možnost bistabilnega obnašanja, ki je v digitalni elektroniki tako zaželeno. Po dogovoru, stanje, ko elektrona zavzemata točki 1 in 3 ustreza binarni logični vrednosti 1 (true), stanje, ko sta zavzeti točki 2 in 4 pa ustreza binarni logični vrednosti 0 (false).

Za celico se predpostavlja v ozadju simetrično razporejen nemobilen pozitivni naboj. Celoten naboj celice je enak nič. Za zagotavljanje nevtralnosti naboja je v vsako kvantno točko postavljen naboj velikosti $e_0/2$. Vrednost e_0 je osnovni naboj elektrona in znaša $1,6022 \cdot 10^{-19}$ As. Ko je elektron v celoti lokaliziran v kvantni točki, je naboj te lokacije enak $-e_0/2$. V primeru, ko je verjetnost nahajanja elektrona v določeni kvantni točki enaka nič, je naboj te lokacije enak $e_0/2$. Zaradi simetrične nevtralizacije naboja (SCN) vsaka točka ravnine celice čuti isto absolutno elektrostatično silo iz celice, ne glede na logično stanje celice. Če je sila privlačna, se občuti enako odbojno silo ob spremembi stanja celice. To pomeni, da je odbojna sila celice enaka privlačni sili celice. Tougaw pravi, da ta lastnost zagotavlja procesno obnašanje celice [17].

Obstajajo tudi druge geometrijske oblike celic, ki imajo približno enake lastnosti kot geometrija prikazana na sliki 4. Nekatere so bile razvite z namenom robustnejšega delovanja. Druga z leve na sliki 5 pa je "originalna" standardna celica, ki jo je razvil Lent s sodelavci.



Slika 5: Možne geometrije celic QCA

V izolirani celici sta možni dve energijsko ekvivalentni razporeditvi mobilnih elektronov imenovani polarizacija celice $P = +1$ in $P = -1$. Polarizacija $P = +1$ označuje razporeditev elektronov v kvantni točki 1 in 3, polarizacija $P = -1$ pa

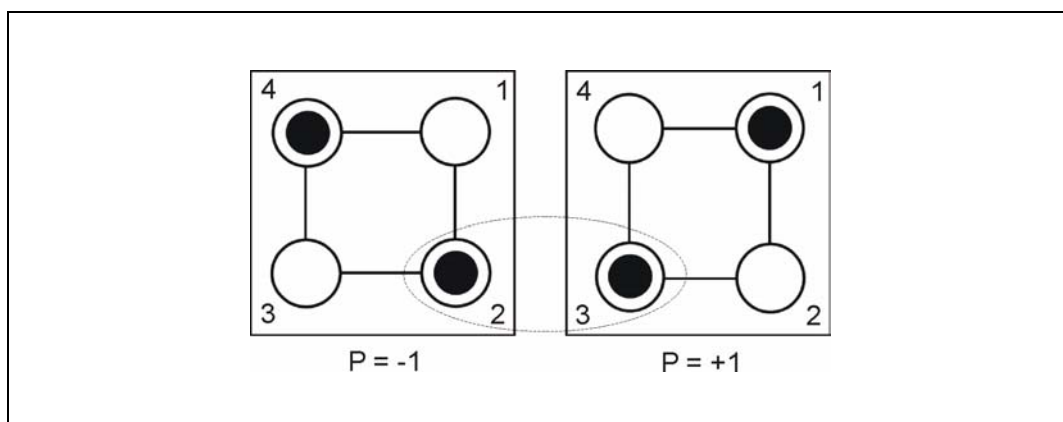
razporeditev elektronov v kvantni točki 2 in 4. Obe polarizaciji sta prikazani na sliki 4. Obe polarizaciji imenujemo tudi stabilna stanja celice.

Kot je bilo že prej omenjeno polarizacija $P = +1$ ustreza binarni vrednosti 1, polarizacija $P = -1$ pa binarni vrednosti 0. Polarizacija celice se izračuna s pomočjo formule

$$P = \frac{(\rho_1 + \rho_3) - (\rho_2 + \rho_4)}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4} \quad (1)$$

kjer je ρ_i gostota naboja v kvantni točki i obravnavane celice. Enačbe in opis izračuna gostote naboja niso navedeni, ker posegajo v fizikalen opis kvantne celice, kar presega okvir diplomskega dela. Enačbe kvantne mehanike so podane v [4], [6], [10] in [17]. Ker gostota naboja ni diskretna količina so možna tudi druga stanja poleg opisanih dveh. V izolirani celici imajo ta stanja sicer višjo energijo od zaželenih dveh, vendar niso nemogoča. Večji problem predstavljajo v sistemu večih celic.

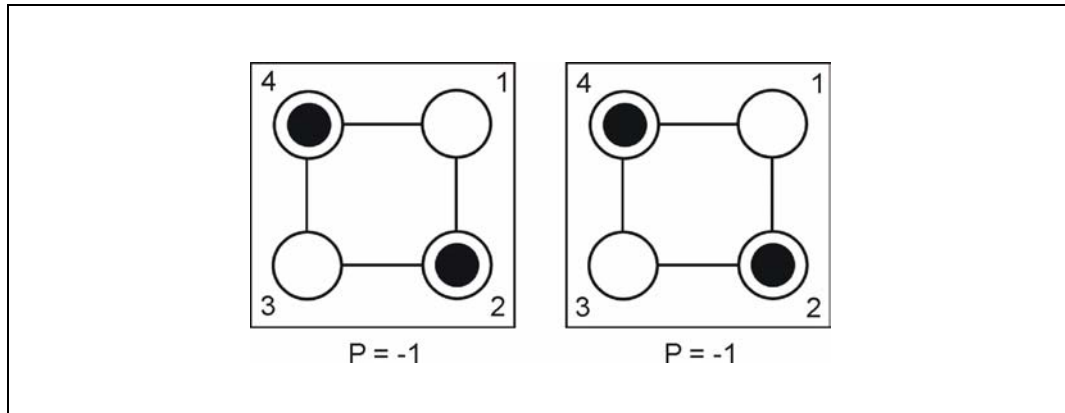
Polarizacijski stanji nista več energijsko enakovredni v tistem trenutku, ko se poleg celice pojavi vsaj še ena identična celica. Par celic v medsebojni interakciji prikazuje slika 6.



Slika 6: Interakcija med dvema nasprotno polariziranimi celicama QCA

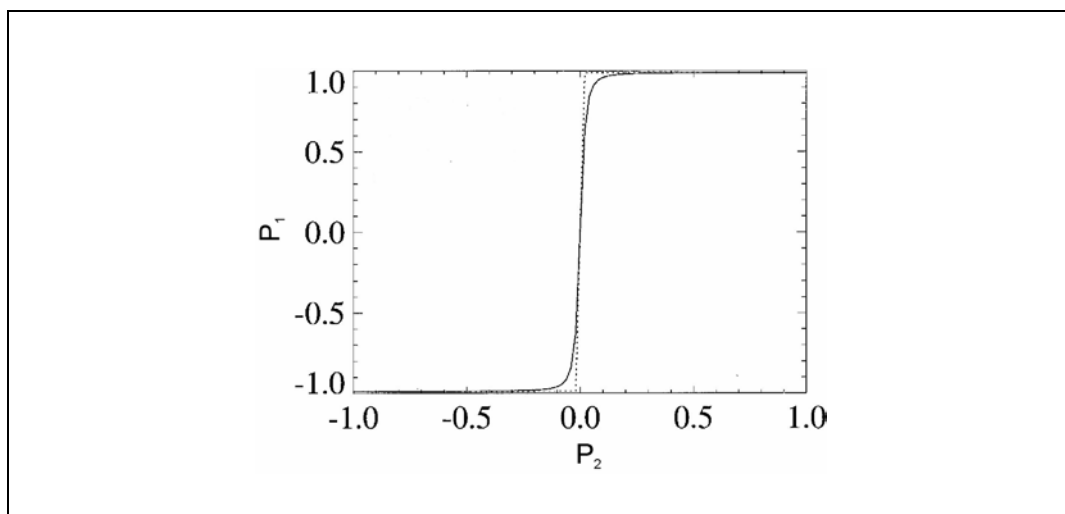
Elektroni v celicah, ki sta v bližini druga druge, vplivajo drug na drugega s Coulombovimi silami. Če ima leva celica na sliki 6 v času nespremenljivo polarizacijo $P = -1$, desna pa trenutno polarizacijo $P = +1$, se zaradi Coulombovih sil in tendence po energijsko čim nižjem stanju polarizacija desne celice spremeni na $P = -1$. Sosednji

celici z enakima polarizacijama prikazuje slika 7. Seveda je možna tudi obratna situacija. Če je polarizacija leve celice $P = +1$ v času nespremenljiva, se polarizacija desne celice prilagodi stanju z najnižjo energijo, kar pomeni polarizacijo $P = +1$.



Slika 7: Sosednji celici QCA uskladita polarizaciji

Tougaw in sodelavci [17] so izvedli izračune dogajanja v takem sistemu. Rezultat je graf polarizacije desne celice P_1 kot funkcija polarizacije sosednje leve celice P_2 prikazan na sliki 8. Graf prikazuje želeno nelinearnost, ki je potrebna za izvedbo robustnih, na šum neobčutljivih, naprav.



Slika 8: Prevaljalna funkcija interakcije dveh celic QCA

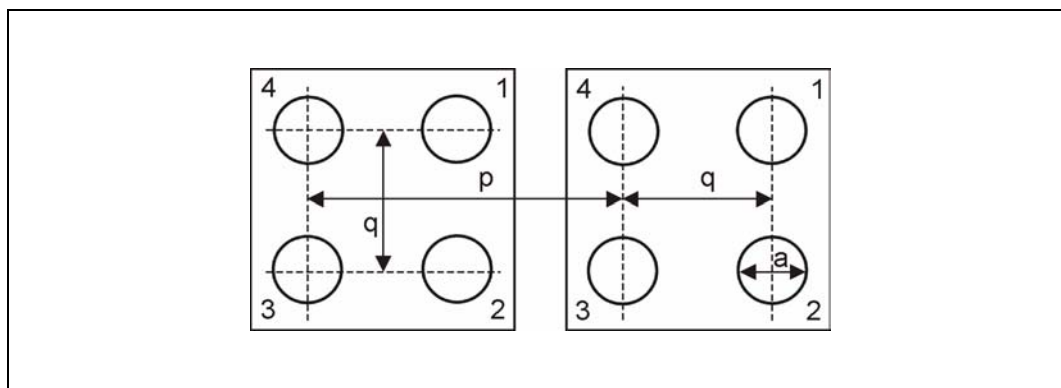
Kot je vidno na sliki 8, se polarizacija celice zelo hitro zasiči, kar vodi do dveh pomembnih ugotovitev:

- bipolarno zasičenje omogoča predstavitev bitne informacije s pomočjo polarizacije celice. Celica je skoraj vedno močno polarizirana $P \approx \pm I$. Le v primeru popolnoma simetričnega elektrostaticnega okolja zaradi drugih celic v bližini postane polarizacija opazovane celice $P = 0$,
- polarizacija ene celice sproži polarizacijo sosedne. Že rahla polarizacija ene celice povzroči skoraj popolno polarizacijo sosednje celice. Ta lastnost omogoča obnašanje podobno celularnim avtomatom. Hitro zasičenje prevajalne funkcije je analogno ojačanju potrebnem za ohranjanje nivojev digitalne logike med posameznimi stopnjami.

Podatki s katerimi so bile izvedene kalkulacije so prikazani v tabeli 1 in se ujemajo s sliko 9.

Parameter	Vrednost
Oddaljenost kvantnih točk v celici (<i>ang. "intracell dot spacing"</i>), q	20 nm
Oddaljenost kvantnih točk med dvema celicama (<i>ang. "intercell dot spacing"</i>), p	60nm
Višina pregrade (<i>ang. "barrier height"</i>)	0.15 eV
Velikost kvantne pike (<i>ang. "dot size"</i>), a	10 nm

Tabela 1: Lastnosti materiala uporabljene pri izračunih standardne celice



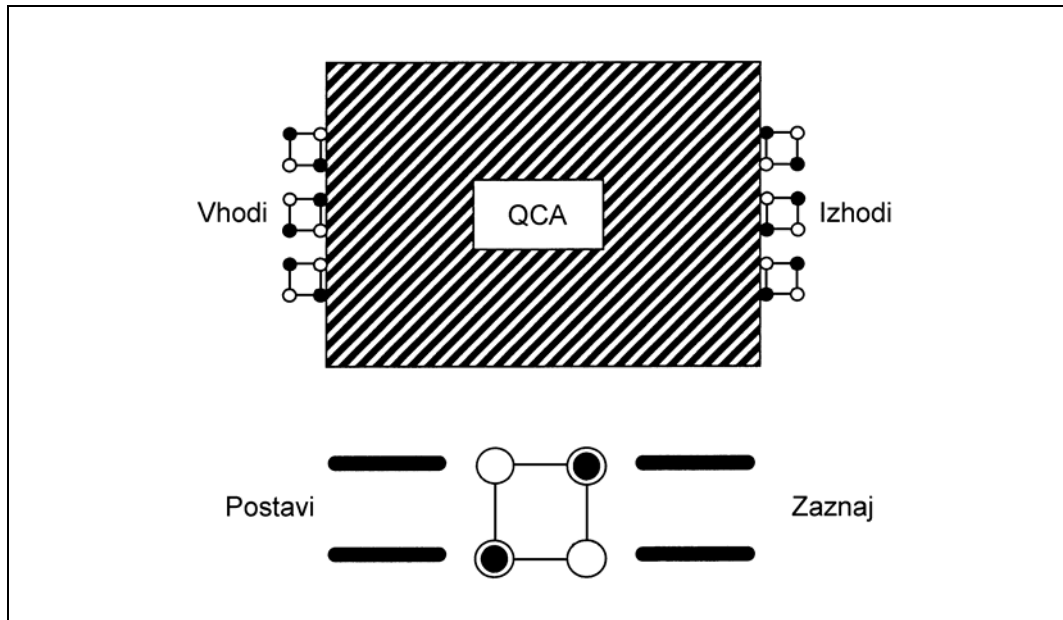
Slika 9: Dimenzije kvantne celice in oddaljenost kvantnih točk med dvema celicama

Torej so bistvene sestavine potrebne za bistabilno zasičeno obnašanje kvantne celice naslednje:

- kvantno zajetje,
- Coulombova interakcija med elektroni,
- kvantna mehanika majhnega števila elektronov,
- diskretnost električnega naboja.

2.5. Interakcija z okolico

Model robno-gnanega procesiranja (*ang. "edge-driven computation"*), opisan v razdelku 2.6, zahteva neinvazivno izvedbo vhodov in izhodov kvantnega celularnega avtomata. Prenos informacije v polje celic QCA zahteva prisilno elektrostatično nastavitve stanja oz. polarizacije prve celice v polju. Tej celici pravimo tudi vhodna celica ali gonilnik (*ang. "driver"*). To je izvedeno z nabitjem prevodnika v bližini prve celice. Ena stran prevodnika elektrone odbije, druga pa jih privlači. Podobno kot kondenzator prevodnik nabijemo tako, da ga priključimo na ustrezno napetost. Opisana tehnika se že uporablja v poizkusih s kvantnimi točkami v polprevodnikih. Prevodniku pravijo potopna elektroda (*ang. "plunger electrode"*). Branje stanja polja je veliko bolj zapleteno. Polarizacijo končne oz. izhodne celice je potrebno prebrati na način, ki ne vpliva na stanje oz. polarizacijo celice. Zavedati se je treba, da je stanje končne celice v polju QCA odvisno le od Coulombove interakcije s sosednjo celico, ta pa je preko vseh ostalih celic odvisna od polarizacije prve celice polja. Ker lokalni naboj proizvede elektrostatični potencial pomeni, da je za branje stanja celice potrebno izdelati neko vrsto miniaturnega elektrometra. Tak elektrometer so izdelali s pomočjo balističnih točkovnih priključkov. Naprava lahko neinvazivno izmeri stanje naboja posamezne kvantne točke. Seveda je možno večje število vhodnih in izhodnih celic. Opisana ideja interakcije z okolico je prikazana na sliki 10.

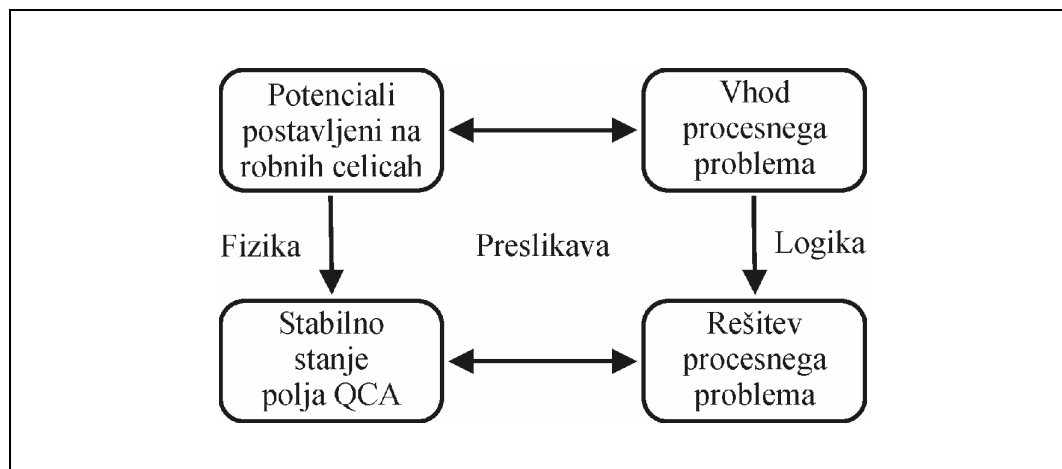


Slika 10: Interakcija polja QCA in celice QCA z okoljem

Bistvena razlika v primerjavi s klasičnimi vezji je v tem, da nimamo nikakršne kontrole nad notranjimi celicami vezja. Notranje celice vezja ne potrebujejo napajalnih ali signalnih povezav saj delujejo le na podlagi interakcije s sosedi.

2.6. Model procesiranja

Preslikavo iskanja poljubne računske rešitve v fizikalni problem iskanja stabilnega stanja celice se smatra za procesiranje QCA [1]. Ravno sposobnost preslikave fizikalnega stabilnega stanja strukture v logično stanje rešitve je bistvo QCA pristopa. V bistvu je stabilno stanje strukture rešitev problema vpisane v strukturo na vhodu. Preslikava je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Shema preslikave fizikalnega delovanja strukture v računsko logiko

Ko privedemo vhodne vrednosti v strukturo QCA, kot je opisano v prejšnjem razdelku, postavimo strukturo v vzbujeno stanje. Zatem se struktura sprosti v ustrezno stabilno stanje. Hitrost sproščanja je odvisna od lastnosti disipativnih procesov, ki se dogajajo v vezju. Ko je stabilno stanje doseženo, polarizacije izhodnih celic v strukturi predstavljajo rešitev danega problema.

Izvedbo procesiranja se lahko opiše s tremi koraki:

- vpis vhodnih bitov z nastavitvijo polarizacije celic vzdolž vhodnega roba,
- sprostitve vzbujene strukture v stabilno stanje, ki ustreza polarizaciji vhodnih celic,
- branje rezultatov procesiranja z zaznavanjem polarizacije celic vzdolž izhodnega roba.

Bistvena elementa, ki omogočata opisan način procesiranja in praktično definirata paradigmo procesiranja s kvantnim celularnim avtomatom sta procesiranje s stabilnim stanjem (*ang. "computing with ground state"*) in robno-gnano procesiranje (*ang. "edge-driven computing"*).

Prednost procesiranja s stabilnim stanjem je neobčutljivost procesiranja na podrobnosti disipativnega procesa, ki poveže elektrone v polju z okoljem in omogoča prehajanje med stanji. Ko se robno vhodno stanje spremeni preide polje v vzbujeno stanje in disipativni proces ga privede v stabilno stanje, ki ustreza vhodnemu stanju. To stanje se

ohranja dokler ne pride do nove spremembe vhodnega stanja. Celoten disipativen proces traja nek čas t_r , imenovan relaksacijski čas. Dinamika sistema in njegova časovana evolucija je zelo zapletena. Kljub temu pa je končno stabilno stanje neodvisno od dolžine relaksacijskega stanja in samih mehanizmov disipacije.

Robno-gnano procesiranje je praktična zahteva, zaradi katere je potrebna izvedba procesiranja s stabilnim stanjem. Ker povezave v notranjost polja niso dovoljene ni nikakršnega kontroliranega mehanizma, ki bi sistemu preprečeval stabilno stanje oz. bi omogočal manipulacijo celic. Ravno tako ni mehanizmov sinhronizacije in osveževanja. Ob spremembi vhoda bo sistem raztresal energijo in s tem našel novo ravnotežno stabilno stanje. Opisan princip je ravno nasproten principu navadnih vezij, kjer so naprave vedno v vzbujenem stanju. To pomeni veliko prednost glede neobčutljivosti na šum, vendar je za to potrebno plačati ustrezno ceno. Vsaka naprava v klasičnem vezju potrebuje svoje napajanje, kar pripelje do problema povezovanja in odda ob preklopu veliko energije v obliki toplote, kar pripelje do problema pregrevanja vezja. Zahteva po robnem-procesiranju izhaja ravno iz obeh problemov, predvsem iz problema povezovanja izjemno majhnih kvantnih celic s kovinskimi povezavami. Problem povezovanja celic v polju QCA z okoljem lahko preseže kompleksnost samega polja. Temu se izognemo z opisano robno interakcijo polja QCA z okoljem.

Bistvene značilnosti paradigme QCA oz. modela procesiranja s kvantnim celularnim avtomatom se lahko podajo v petih točkah:

- bistabilna celica vsebuje bitno informacijo v notranji konfiguraciji,
- fizikalno pogojena interakcija med sosednjimi celicami omogoča prenos stanja celice,
- vhodi v polje QCA so izvedeni s fizikalno prisilno nastavitvijo robnih vhodnih celic v ustrezno stanje,
- izhodi so neinvazivno prebrani z zaznavanjem stanja robnih izhodnih celic,
- procesiranje je mogoče s preslikavo med fizikalnim stabilnim stanjem polja in logično rešitvijo računskega problema.

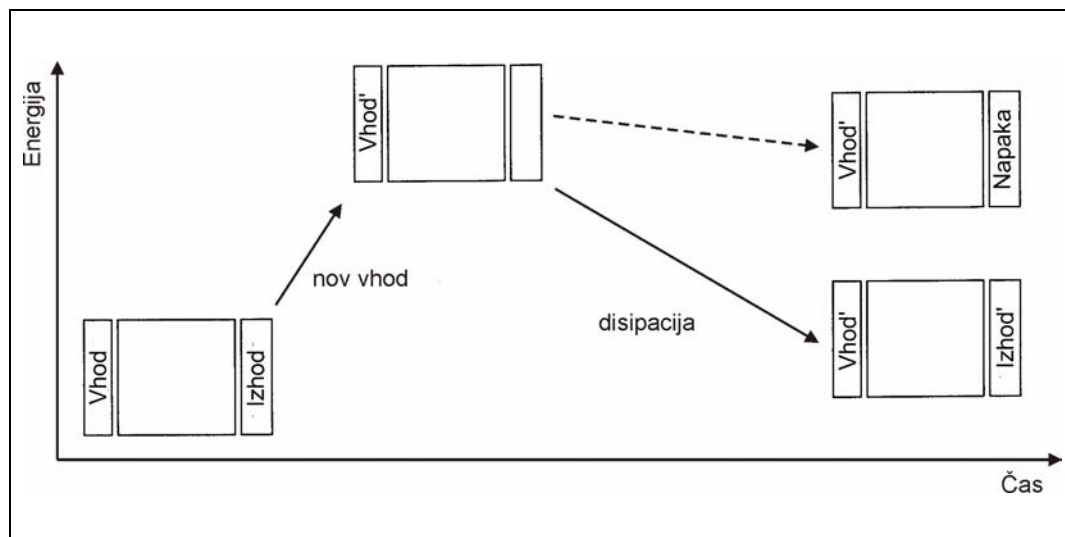
2.7. Preklapljanje QCA

Model procesiranja s stabilnim stanjem pravi, da podrobnosti evolucije sistema, ki jih je težko kontrolirati, niso bistvene za pravilno izvedbo procesiranja. Dinamika sistema pripomore k procesiranju le v smislu premikanja sistema iz enega stabilnega stanja v drugo. Kljub temu pa je ne moremo popolnoma zanemariti, saj je relevantana iz dveh razlogov. Analiza dinamike sistema je nujna za ugotavljanje preklonih hitrosti polja QCA. Drugi razlog pa je možna prisotnost metastabilnih stanj, ki lahko povzročijo precejšnje zakasnitve [4].

Lent [4] podaja dva načina preklapljanja polja iz enega stanja v drugo. Prvi način upošteva hitro preklapljanje celic in dopušča disipacijo energije v okolje med relaksacijo polja v novo stabilno stanje. Vhodi so fiksirani ves čas relaksacije. Drugi način vključuje postopno preklapljanje polja z enakomernim spreminjanjem vhodnih stanj in simultanim spreminjanjem medtočkovnih pregrad v celicah polja. Prvem načinu pravimo nenadno disipativno preklapljanje, drugemu pa adiabatno preklapljanje.

2.7.1. Disipativno preklapljanje

Če se vhodi polja QCA v trenutku spremenijo preide polje hipoma v neko kombinacijo vzbujenega stanja. Energija vzbujanja je posledica dela, ki je bilo opravljeno ob spremembi vhoda. Polje se nato sprosti v novo stabilno stanje z disipacijo energije v okolje. To je prikazano na sliki 12.



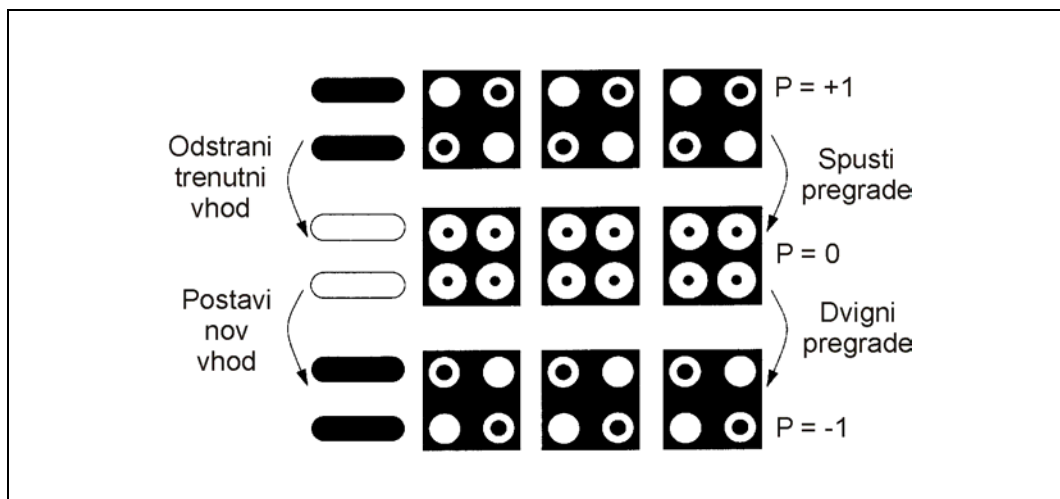
Slika 12: Disipativni preklon (polna puščica) in možnost metastabilnega stanja (črtkana puščica)

Opisana naravna tendenca sistema po zavzemanju stabilnega stanja se uporabi za izvajanje procesiranja. Kljub temu, da je dejanska dinamika zelo kompleksna, saj je povezava med sistemom in okoljem nepoznana in nenadzirljiva, nas to preveč ne skrbi zaradi principa procesiranja s stabilnim stanjem. Delovanje brez potrebe po zunanji kontroli je privlačna lastnost disipativnega preklapljanja oz. relaksacijskega procesiranja. Možnost običanja sistema v metastabilnem stanju kot ga kaže slika 12 in spremenljivost potrebnega časa za izvedbo procesiranja sta veliki pomanjkljivosti disipativnega pristopa.

2.7.2. Adiatno preklapljanje

Čeprav bi bilo disipativno preklapljanje najverjetneje učinkovito v številnih implementacijah se pojavlja skrb zaradi predhodno opisanih pomanjkljivosti. Relaksacija je popolnoma nekontroliran proces, kar lahko privede do neučinkovitosti v določenih sistemih. Prehitra relaksacija lahko pripelje sistem v stanje z lokalnim energetskim minimumom, metastabilno stanje, ki ni stabilno stanje. Sistem lahko obstane v metastabilnem stanju, kar povzroči precejšnje zakasnitve.

Rešitev problema ponuja Lent s sodelavci [4] s pristopom adiatnega preklapljanja. Na ta način je sistem vedno zadržan v trenutnem stabilnem stanju, ki se adiatno spreminja iz začetnega stanja v željeno končno stanje med procesiranjem. To je doseženo s spuščanjem in dviganjem potencialnih pregrad med kvantnimi točkami v posamezni celici. Celotno dinamiko vodijo urini signali. Spreminjanje potencialnih pregrad dovoli ali prepreči spremembo polarizacije celice. Prisotnost ure omogoča sinhronizirane operacije kar vodi do cevovodnih arhitektur.



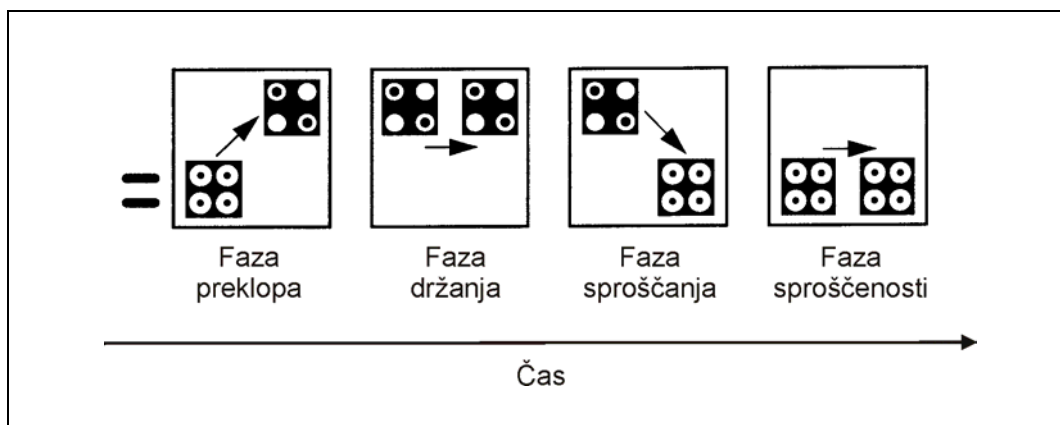
Slika 13: Adiatno preklapljanje strukture QCA

Kot prikazuje slika 13 se celoten proces prične v stabilnem stanju sistema, ki je posledica prejšnjega vhoda. V prvi fazi se pričnejo zniževati medtočkovne pregrade, hkrati se postopoma odstranjuje prejšnji vhod. Nižanje medtočkovnih pregrad zmanjša zajetje elektronov v posameznih kvantnih točkah. Odstranjevanje prejšnjega vhoda zmanjša zunanji robni vpliv, odgovoren za prejšnje stanje sistema. Cilj prve faze je zmanjšanje polarizacije celice. Na koncu prve faze preklopa celica ne izkazuje skoraj nikakršne polarizacije, je skoraj popolnoma nevtralna. Valovni funkciji obeh elektronov sta razširjeni po celotni celici. Druga faza vključuje dvigovanje medtočkovnih pregrad in postopno pojavitve novega vhoda. Dvignjene medtočkovne pregrade povzročijo ponovno zajetje elektronov v posamezne kvantne točke in polarizacijo celice, ki zasede novo stabilno stanje glede na dan vhod.

Za spremembo medtočkovnih pregrad med adiatnim preklopnim ciklom delo ni bilo potrebno. Posamezne celice ne potrebujejo dodatnega urinega signala, pač pa je dovolj prisotnost dodatnega urinega potenciala preko celotnega polja.

2.8. Adiatbatna cevovodna arhitektura

Idejo adiatbatnega preklapljanja je Lent [4] razvil še nekoliko naprej. Pri adiatbatnem preklapljanju se predpostavlja sočasno spreminjanje potencialnih pregrad v celicah celotnega polja. Pri cevovodni arhitekturi se polje razdeli na več delov oz. podsistemov. V vsakem podsistemu se neodvisno spreminja potencialne pregrade celic vključenih v ta podsistem. Vse celice v posameznem podsistemu imajo ista potencialna vrata za kontrolo potencialnih medtočkovnih pregrad. S tem se lahko porazdeli računski problem in izkoristi prednosti večfazne ure in cevovoda. Na ta način lahko en podsistem izvede neko procesiranje in zatem zamrzne svoje stanje z dvigom medtočkovnih pregrad. Izhod tega podsistema predstavlja vhod v sosednji podsistem. Med fazo procesiranja v prvem podsistemu je sosednji podsistem v nepolariziranem stanju in ne more vplivati na procesiranje. Slika 14 prikazuje štiri stopnje adiatbatnega cevovodnega cikla. Prikazan je časovni potek štirih faz v enem podsistemu.



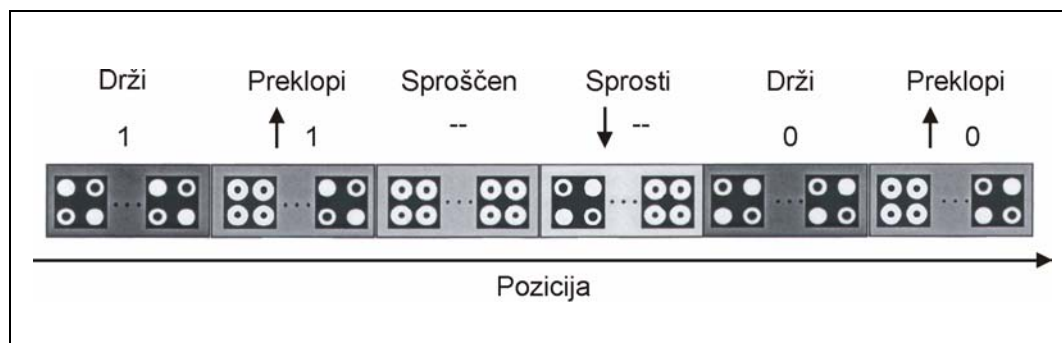
Slika 14: Stopnje adiatbatnega cevovodnega cikla

Vsak od kvadratov na sliki predstavlja trenutno stanje podsistema sestavljenega iz večjega števila celic. Leva celica v kvadratu predstavlja stanje na začetku urine faze, desna celica pa stanje na koncu urine faze.

Na začetku prve faze, imenovane faza preklopa (*ang. "switch phase"*), so celice nepolarizirane, saj so potencialne pregrade spuščene. Med fazo se pričnejo pregrade dvigovati in celice se polarizirajo glede na stanje gonilnika. V fazi preklopa pride do dejanske izvedbe procesiranja. Na koncu so medtočkovne potencialne pregrade popolnoma dvignjene in celice popolnoma polarizirane. V drugi fazi, imenovani faza

držanja (*ang. "hold phase"*), so pregrade ves čas popolnoma dvignjene. Izhodi podsistema so uporabljeni kot vhodi v sosednji podsistem. V naslednji fazi, imenovani faza sproščanja (*ang. "release phase"*), se pričnejo pregrade spuščati. Celice se sprostijo v nepolarizirano stanje. V zadnji fazi, fazi sproščenosti (*ang. "relaxed phase"*), pregrade ostanejo spuščene, kar ohranja celice v nepolariziranem stanju. Fazi sproščenosti znova sledi faza preklopa.

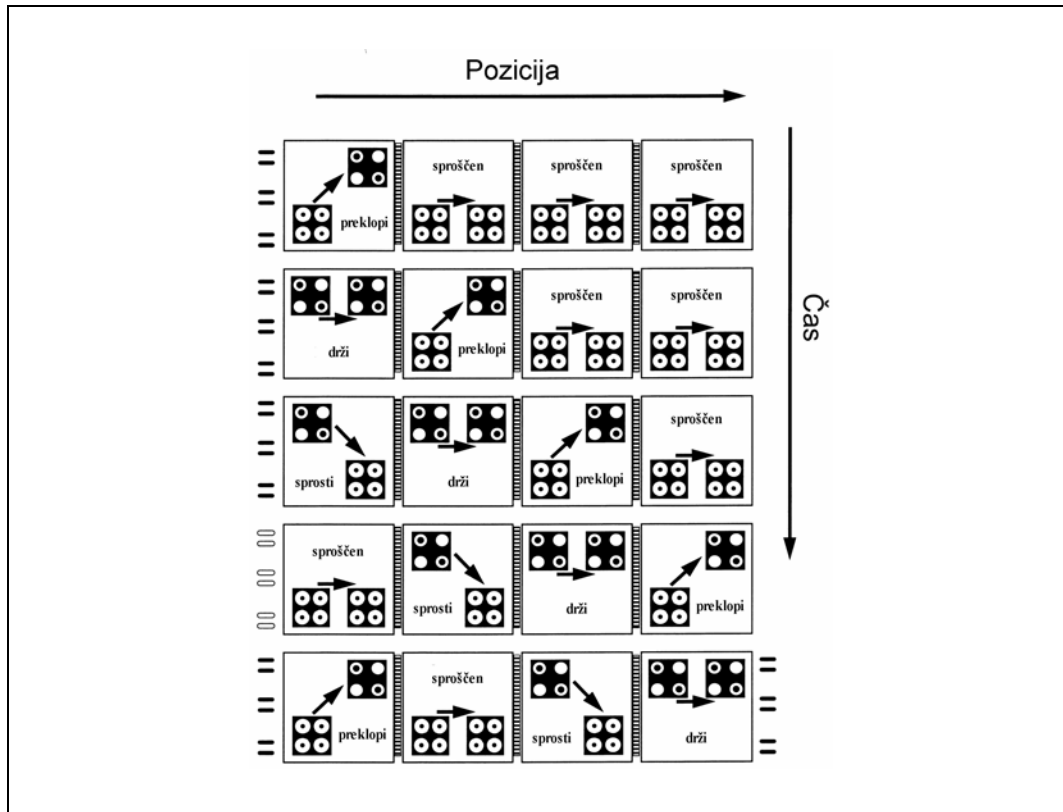
Interakcija posameznih faz med različnimi podsistemi je prikazana na primeru linije na sliki 15. Linija ima arhitekturo adiabatnega cevovoda.



Slika 15: Linija z arhitekturo adiabatnega cevovoda

Linija je sestavljena iz šestih podsistemov ali stopenj. Vsak podsistem ima svojo adiabatno uro. Ugotovljeno je bilo, da se lahko katerikoli sistem z adiabatno cevovodno arhitekturo izvede s štirimi urinimi signali, med katerimi je 90 stopinjski fazni zamik. Zato imata zadnja dva podsistema linije na sliki 15 ista dva urina signala kot prva dva podsistema. Slika prikazuje preklopni dogodek v drugi in šesti stopnji linije. V drugi stopnji linije gre za preklop na logično 1, v šesti stopnji pa za preklop na logično 0. Na sliki 15 opazimo, da cevovodno izvedena linija lahko prenaša več kot en bit informacije naenkrat.

Splošna shema adiabatnega cevovodnega sistema sestavljenega iz več podsistemov je predstavljena na sliki 16.



Slika 16: Struktura QCA z arhitekturo adiabatnega cevovoda

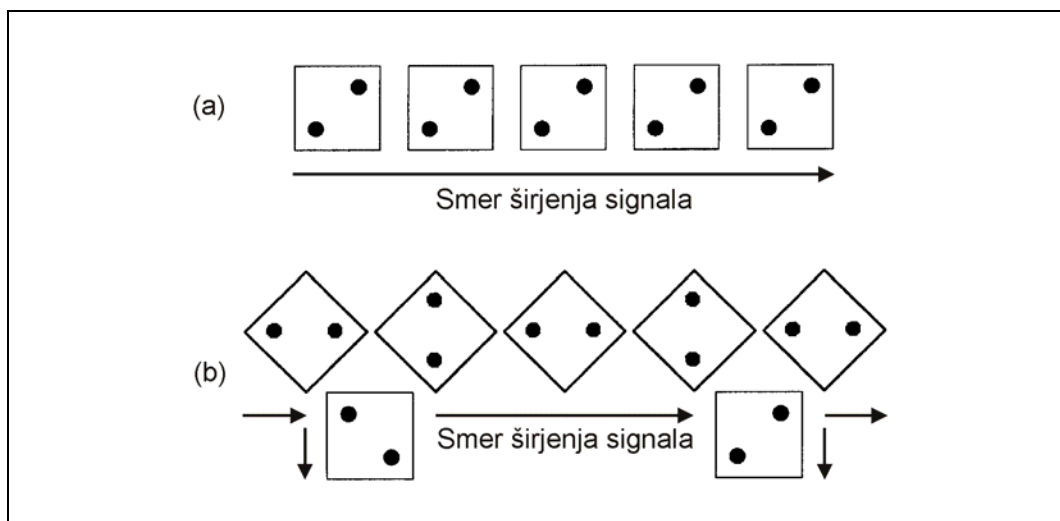
Različne časovne faze so prikazane vertikalno, medtem ko so posamezni podsistemi, ki si sledijo, prikazani horizontalno. V prvi fazi so vse celice razen prve nepolarizirane. V prvi celici se izvaja faza preklopa. Celica se polarizira glede na stanje vhoda. V naslednjem koraku prva celica preide v fazo držanja, sosednja celica pa je v fazi preklopa. Druga celica se polarizira glede na stanje prve. V tretji fazi se prva celica lahko sprosti, saj je oddala informacijo. Druga celica je v fazi držanja, medtem, ko tretja prevzema njeno polarizacijo. V četrti fazi je prva celica nepolarizirana, druga se sprošča, tretja drži polarizacijo, četrta pa izvaja prekop. V peti fazi se celoten proces začne ponavljati. Istočasno ko prva celica izvaja prekop in s tem vpisuje novo informacijo je četrta celica v fazi držanja, kar omogoča branje stanja te celice. Če izhode zadnjega podsistema povežemo z vhodi prvega podsistema, zgradimo stroj s končnim številom stanj. To nam v pricipu kaže, da je stroj sposoben splošnega procesiranja.

2.9. Strukture QCA

Celica QCA je bila razvita z namenom nadomestitve tranzistorja, kot osnove današnjih integriranih vezij, ter rešitve problemov pregrevanja in povezovanja. Cilj razvoja pomeni zgraditev struktur, ki so sposobne prenašati podatke, izvajati logične funkcije nad njimi in jih pomniti, hkrati pa ustrezati obema načeloma paradigme QCA, procesiranju s stabilnim stanjem in robno-gnanemu procesiranju. Te strukture so osnova kompleksnejših naprav kot so na primer mikroprocesorji.

2.9.1. Linija QCA

Osnovna struktura za prenos signalov je linija. Linija QCA temelji na interakciji dveh sosednjih celic QCA. Linijo lahko realiziramo na dva načina, ki sta prikazana na sliki 17.



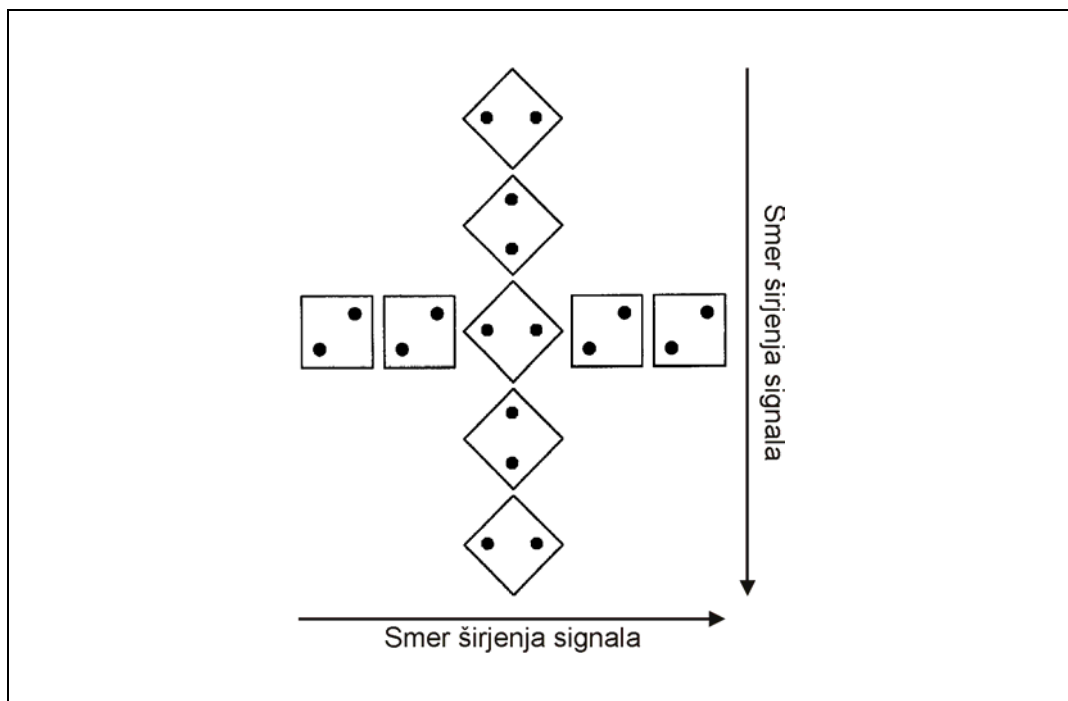
Slika 17: Dve izvedbi linije QCA

Izvedba na sliki 17a je klasična izvedba, kjer vse celice prevzamejo polarizacijo prve celice. Učinkovitost žice je neobčutljiva na manjše razlike v celicah, saj se vsaka celica zelo hitro zasiči v ustrezno polarizacijo že ob manjši polarizaciji svoje sosede. To je neposredna posledica prevajalne funkcije interakcije med dvema celicama prikazane na sliki 8.

Predpostavka o simetrični nevtralnosti naboja (SCN) opisani v poglavju 2.4 nas pripelje do izvedbe prikazane na sliki 17b. Celice so poravnane po diagonali. Posledica tega je

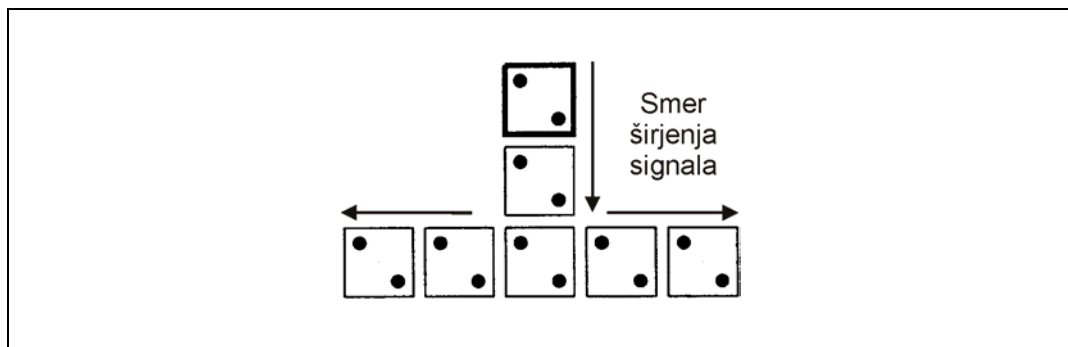
alternirajoča polarizacija vzdolž linije. To omogoča dostop do dejanskega in invertiranega signala v istem trenutku.

Linija QCA omogoča križanje dveh linij v isti ravnini (slika 18) pri čemer je ena orientirana normalno, druga diagonalno. Čeprav ima normalna linija šibek člen v točki križanja, saj sta celici dvakrat bolj oddaljeni kot druge, izračuni zagotavljajo pravilno delovanje [4]. Signali lahko potujejo sočasno po obeh linijah ne da bi vplivali drug na drugega. To predstavlja veliko prednost pred klasičnimi kovinskimi povezavami in omogoča večjo gostoto povezav na isti ravnini.



Slika 18: Križanje linij QCA

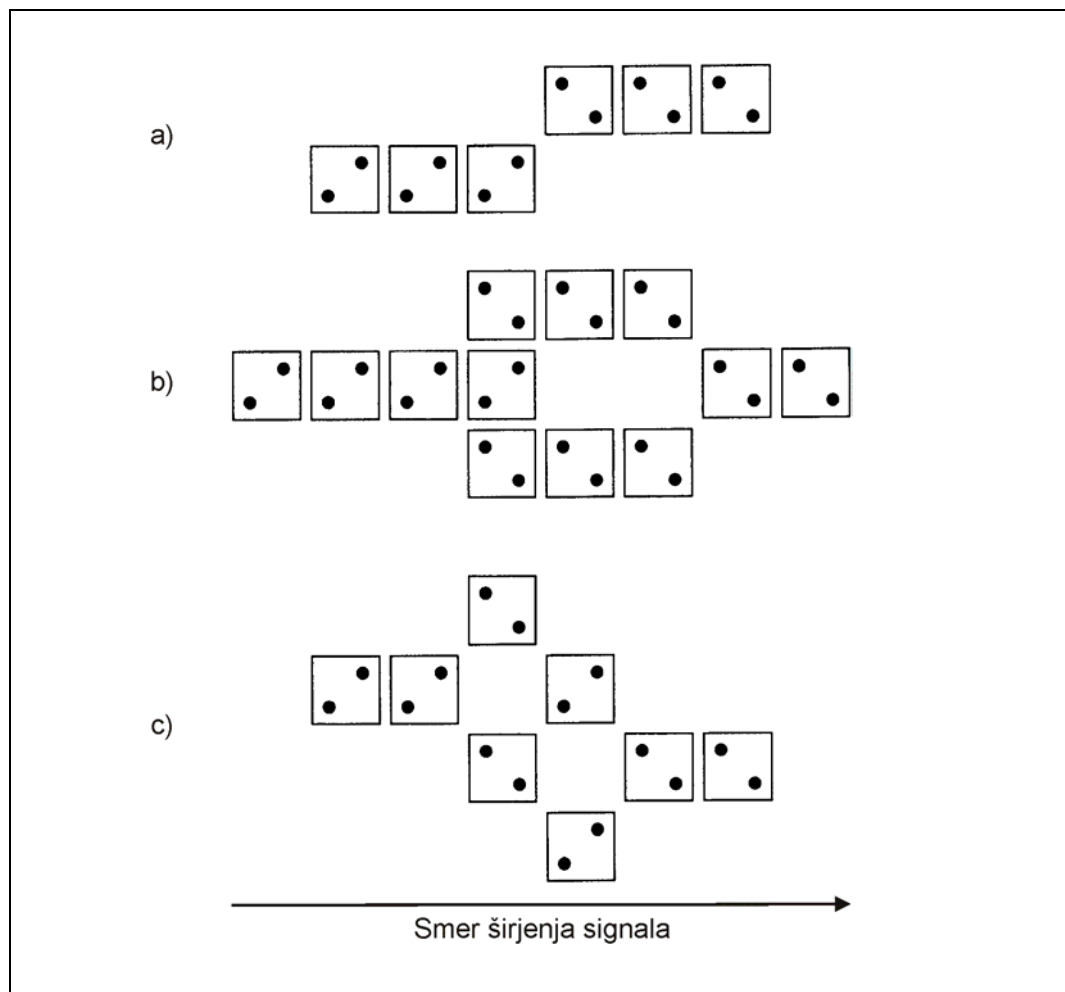
Možna je tudi razdelitev signala (*ang. "fan-out"*) prikazana na sliki 19.



Slika 19: Razdelitev signala oz. fan-out

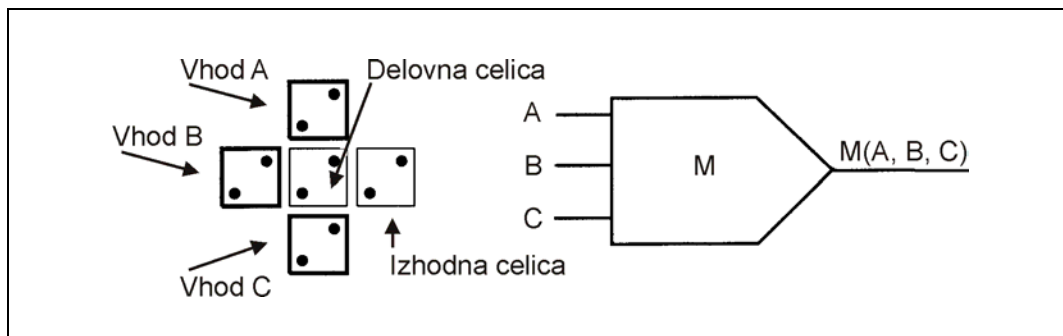
2.9.2. Logična vrata

QCA celice omogočajo izvedbo polnega nabora logičnih funkcij (NOT, AND, OR). Ob predpostavki simetrične nevtralnosti naboja je negator direktna posledica nasprotne polarizacije celice v primeru diagonalne poravnave dveh celic. Osnovna in robustnejše izvedbe, v smislu izogibanja metastabilnim stanjem, so prikazane na sliki 20.



Slika 20: Osnovna izvedba inverterja (a) in robustnejše izvedbe (b, c)

Osnova AND in OR logičnih funkcij so trivhodna majoritetna vrata prikazana na sliki 21.



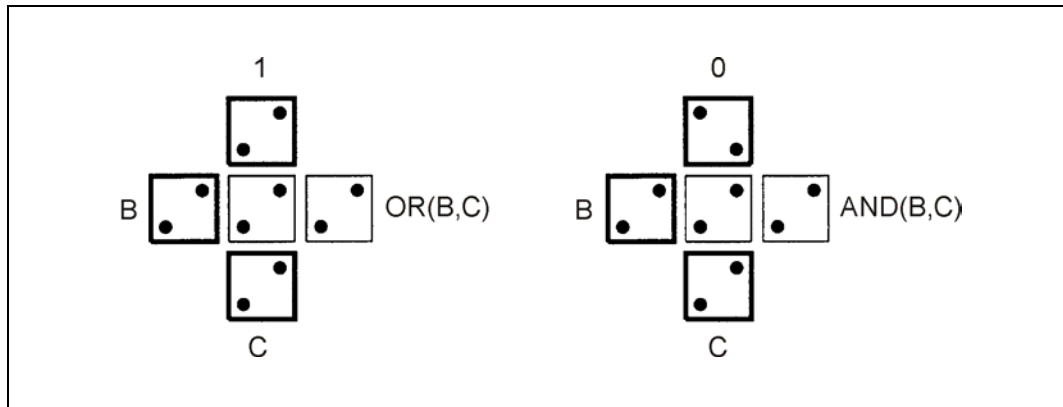
Slika 21: Trivhodna majoritetna vrata in logični simbol

Centralna celica, imenovana tudi delovna celica (*ang. "device cell"*), ima tri vhodne celice, označene A , B in C ter izhodno celico. Delovna celica ima najnižjo energijo, ko se prilagodi majoritetni polarizaciji treh vhodov. Izhodna celica služi kot gonilnik vhodnim celicam drugih naprav. Pravilnostna tabela je prikazana na sliki 22.

A	B	C	f	
0	0	0	0	} AND
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	1	} OR
1	0	0	0	
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

Slika 22: Pravilnostna tabela AND, OR in majoritetnih vrat

Če se uporabi enega od vhodov kot kontrolni vhod se lahko skonstruira AND in OR vrata. Če je kontrolni vhod npr. A enak logični 1, se majoritetna vrata obnašajo kot logična OR vrata. V primeru logične vrednosti 0 na kontrolnem vhodu A majoritetna vrata izkazujejo lastnost AND logičnih vrat. Shema vrat je prikazana na sliki 23, pravilnostna tabela pa na sliki 22.



Slika 23: Logična OR in AND vrata

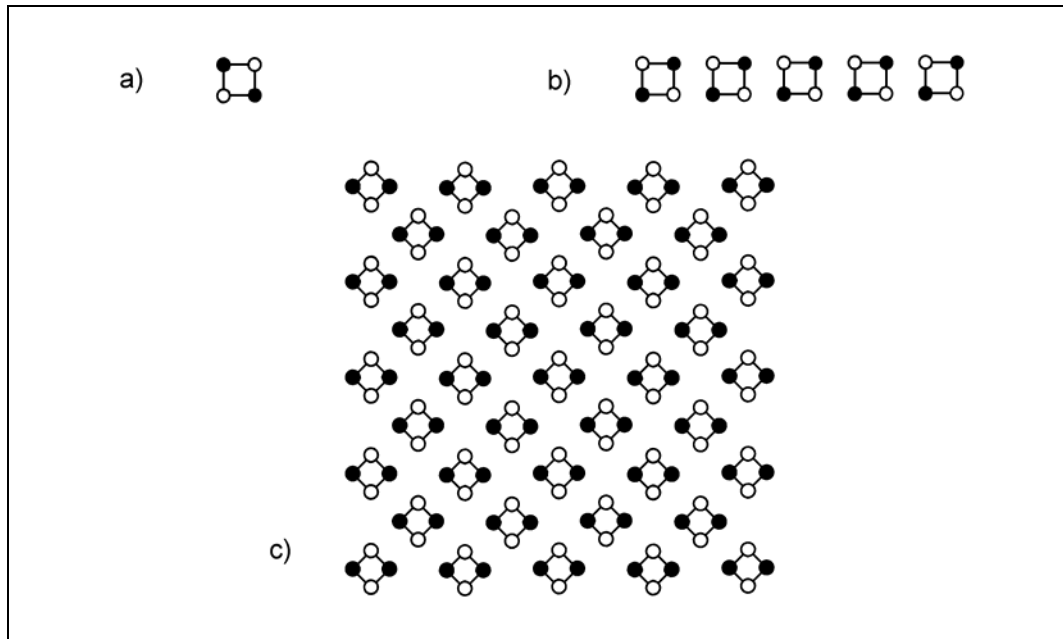
Odvisnost obnašanja majoritetne celice od kontrolnega vhoda predstavlja veliko moč procesiranja, saj se lahko vezje v realnem času prilagaja rezultatom predhodnega procesiranja.

2.9.3. Kompleksne strukture

Lent, Tougaw in sodelavci so modelirali številne kompleksnejše strukture kot so XOR vrata in polni seštevalnik [4]. Niemier in Kogge [15], [16] sta šla še nekoliko dlje in izdelala enostaven mikroprocesor funkcijsko popolnoma ekvivalenten svoji CMOS izvedenki.

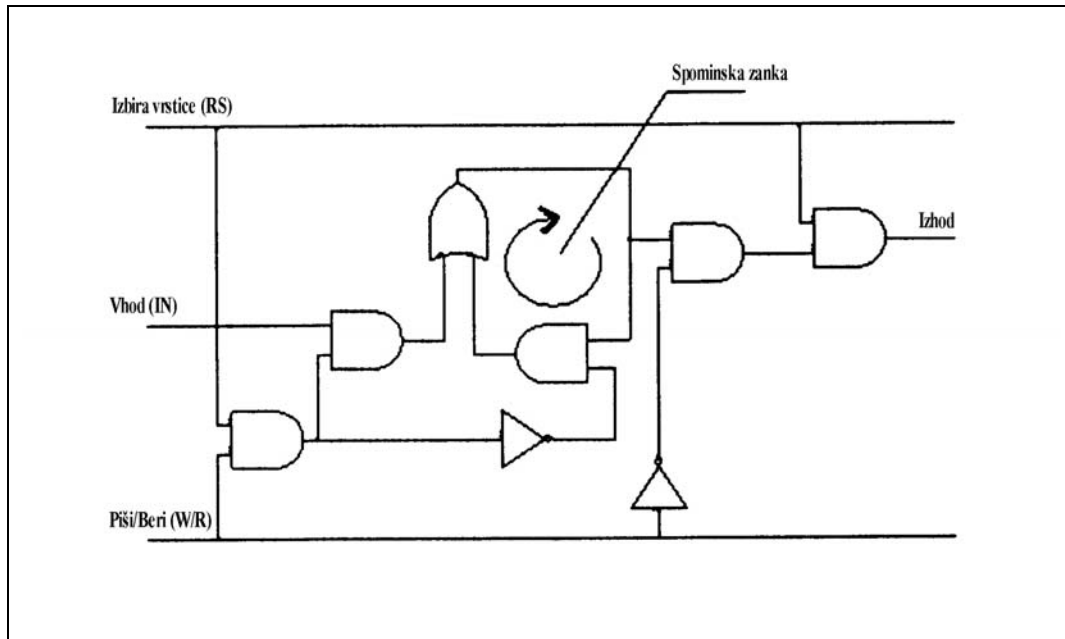
2.9.4. Spomin

Posamezna kvantna celica lahko igra vlogo spominske celice. Ko je enkrat polarizirana, lahko v principu ostane v tem stanju neskončno dolgo časa. Problem predstavljajo le spremembe okolja, zato so bile izdelane robustnejše izvedenke spominske celice prikazane na sliki 24, kjer je na slikah b in c robustnost dosežana z multiplikacijo stanja.

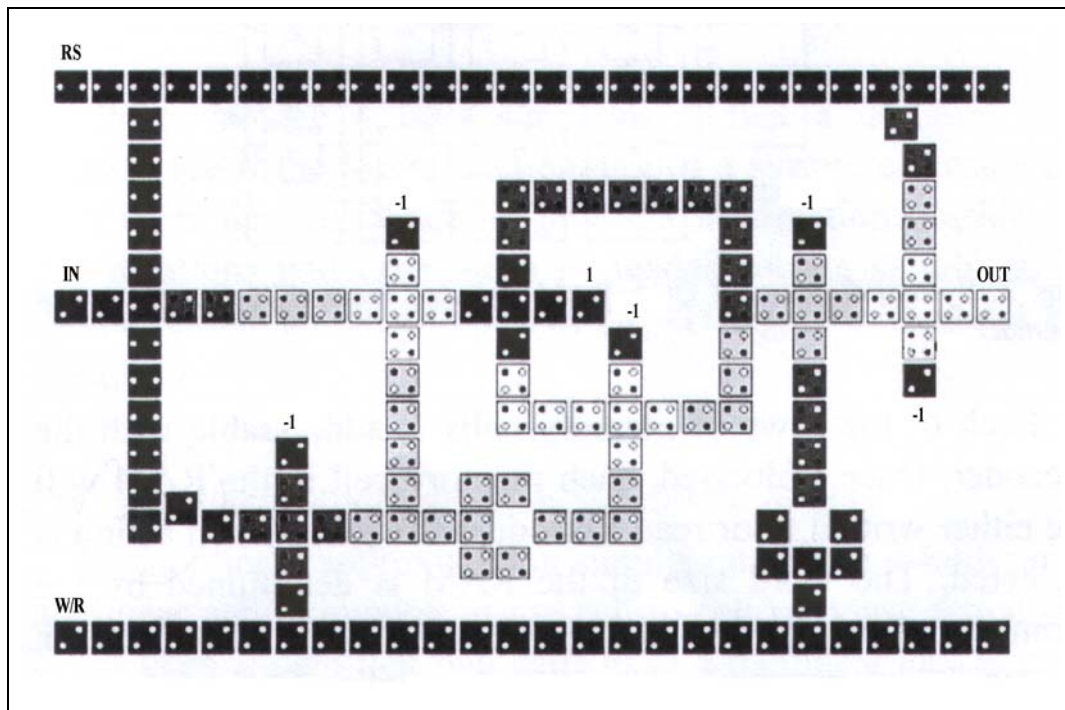


Slika 24: Osnovna spominska celica (a) in robustnejše izvedbe (b,c)

Izdelane so bile tudi kompleksnejše izvedbe dinamičnih RAM sistemov. V primeru sistema z arhitekturo adiabatnega cevovoda je spomin realiziran kot zanka, ki neprestano obnavlja shranjeno informacijo [3]. To je potrebno zaradi nenehnega dinamičnega adiabatnega spreminjanja sistema opisanega v poglavju 2.8. Shema celice je prikazana na sliki 25, njena izvedba pa na sliki 26. Različne sivine prikazujejo, katere celice imajo skupno adiabatno uro.



Slika 25: Shema spominske celice



Slika 26: Izvedba adiabatne QCA spominske celice

3. ZVEZNA KVANTNA CELICA

3.1. Splošna ideja

Celica QCA, predstavljena v prejšnjem poglavju, je bila zgrajena kot neposreden nadomestek osnovnega gradnika današnjih vezij, tranzistorja. Z njo so snovalci skušali premostiti težave, ki se pojavljajo z zmanjševanjem tranzistorja na nanometersko velikost in izkoristiti kvantne efekte, ki prevladujejo v nanometerskem režimu. Celica QCA naj bi postala nov gradnik digitalnih vezij.

Slabost dane celice je, da lahko zaseda samo dve stanji, kar omogoča le binarni (približni) zapis. Problemov predstavitve realnih podatkov s tem ne rešuje. Živimo pa v analognem oz. zveznem svetu, od katerega sprejemamo večinoma zvezne, dvomljive in nejasne podatke in signale. Predpostavljamo, da lahko celica, v nadaljnjem tekstu "zvezna celica", razširi funkcionalnost diskretne QCA celice tako, da omogoča predstavitev poljubnega realnega podatka.

Realen podatek v smislu zaloge stanj je predstavljen z lego elektronov v celici. Ta je opisana z odklonom navidezne črte med elektronoma kot fizikalno veličino. Ker gre za "zvezno celico" je med dvema različnima odklonoma možno neskončno število odklonov. Torej zvezna celica lahko predstavlja avtomat z množico stanj, ki je ekvivalentna končnemu a zveznemu intervalu. Predvidevamo, da bi struktura, katere osnovni gradnik bi bila zvezna celica, izvajala transformacijo enega prostora odklonov oz. leg v nov prostor odklonov. Če bi bila realizacija take celice mogoča, predvidevamo, da bi jo lahko uporabili kot osnovni gradnik zvezne linije in drugih struktur sposobnih procesiranja nad zveznim prostorom stanj in pomnjenja realnih podatkov. Zavedamo pa se, da vsako fizikalno veličino lahko merimo le s končno natančnostjo, zato je predstavitev realnega podatka zvezne celice odvisna od trenutne tehnologije.

Predpostavljamo, da realizacija celice z zveznim prostorom možnih stanj v nanometerski velikosti lahko izkorišča kvantne efekte in prednosti, ki jih ti prinašajo. Če zanemarimo vpliv okolja, predvidevamo, da kvantna interakcija celic povezanih v sekvenco omogoča brezizguben (v smislu porabe energije) prenos zveznega signala,

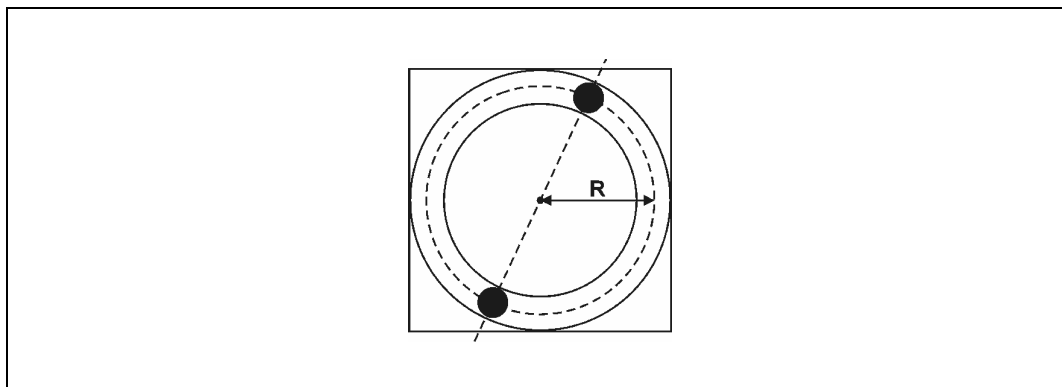
sama celica pa omogoča pomnjenje poljubne zvezne vrednosti podatka neskončno dolgo. Zvezno celico, ki izkorišča kvantne efekte v nadaljevanju imenujemo “zvezna kvantna celica”.

Idejo zvezne kvantne celice smo poskušali realizirati z modelom opisanim v naslednjem poglavju, hkrati pa tudi preveriti funkcionalnost golega prenosa podatkov skozi daljše sekvence celic.

3.2. Model celice

Na začetku naj omenim, da nas je zanimala ideja delovanja celice in njena funkcionalnost, ne pa sama fizikalna zasnova celice. Fizika je v model vključena le toliko, da omogoča zamišljeno delovanje celice. Če bi se ideja pokazala kot funkcionalna, bi razmišljali o njeni fizikalni implementaciji. V tem poglavju je opisan model zvezne celice in pričakovana interakcija para zveznih celic.

Celica prikazana na sliki 27 izkorišča za svoje delovanje kvantne efekte. Predpostavljeno je, da celica vsebuje dva mobilna elektrona, ki sta ujeta v nek potencialni kanal krožne oblike. Realizacija z dvema elektronoma je neposredna posledica želje po izboljšanju funkcionalnosti QCA celice. Le-ta je realizirana s pomočjo dveh mobilnih elektronov, kot je opisano v poglavju 2. Krožna oblika kanala omogoča prosto gibanje elektronov v obsegu 2π radianov, hkrati pa se ohranja konstantna oddaljenost elektronov od središča celice. Elektrona ne moreta uiti iz potencialnega kanala, lahko pa se v njem prosto gibljeta.



Slika 27: Zvezna kvantna celica

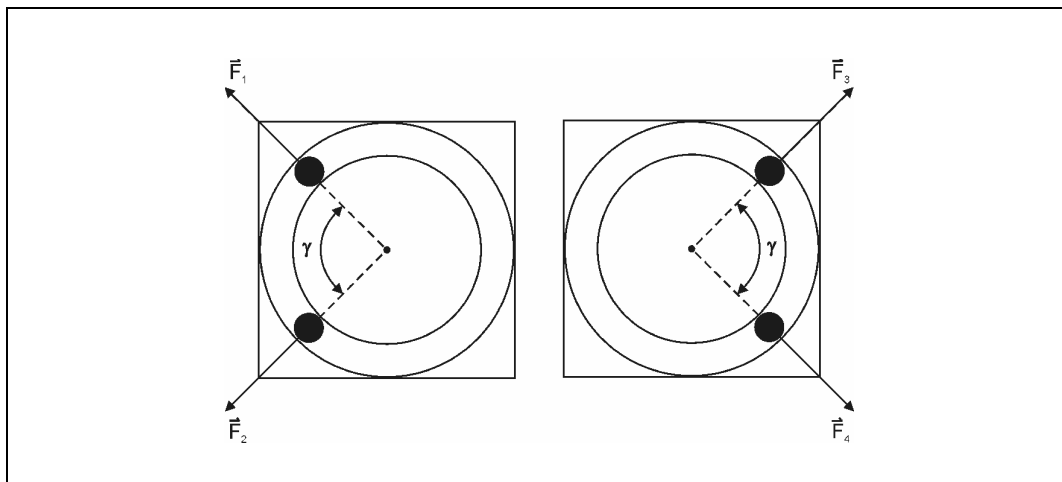
Interakcija med elektronoma v celici temelji na Coulombovi odbojni sili, zaradi katere se elektrona postavita na nasprotni strani premice, ki poteka skozi središče celice. Tako je ostri kot med elektronoma vedno π radianov. Pri tem lahko elektrona zavzameta katerikoli nasprotujoči si poziciji v potencialnem kanalu. Oddaljenost elektronov od središča je vnaprej določena z velikostjo oz. radijem R potencialnega kanala in se ne spreminja. Širina kanala ni določena, saj posamezen elektron lahko obravnavamo kot točkasto telo, ki nosi osnovni naboj e_0 . Coulombova sila med elektronoma, ki nastane zaradi naboja je podana z enačbo

$$F = \frac{e_1 \cdot e_2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} . \quad (2)$$

Vrednosti e_1 in e_2 sta naboja obeh elektronov in sta enaka e_0 , r je oddaljenost med elektronoma in $1/4\pi\epsilon_0$ je sorazmernostna konstanta, pri čemer je ϵ_0 influenčna konstanta. Dani formuli pravimo tudi Coulombov zakon. Za nas je bistvena lastnost Coulombovega zakona, da velikost odbojne sile s katero delujeta elektrona drug na drugega pada s kvadratom razdalje.

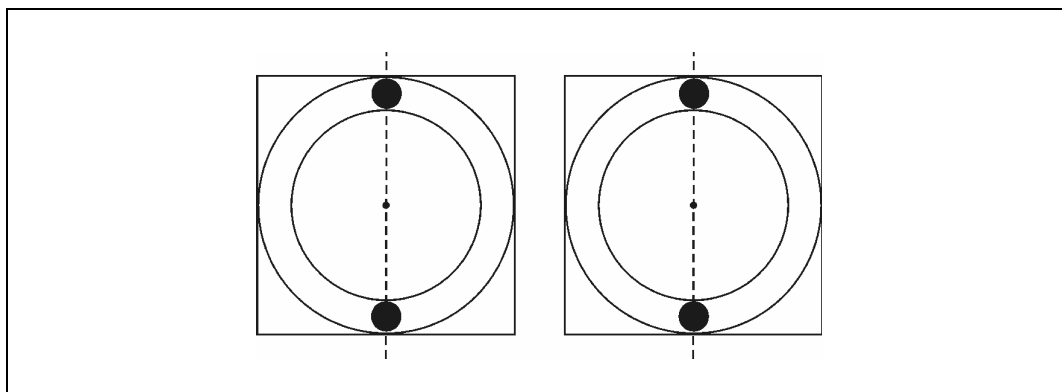
Za posamezno celico smo predpostavili, da nanjo oz. elektrone v njej lahko vpliva le druga zvezna kvantna celica ne pa okolje. Zaradi poenostavitve obravnave smo interakcijo z okoljem in s tem vpliv termodinamičnih efektov popolnoma zanemarili, kar pa ne pomeni da ne obstajajo in vplivajo na samo celico.

Prikazana postavitvev elektronov na sliki 27 se spremeni v trenutku, ko postavimo poleg celice v isti ravnini vsaj še eno identično celico. Sosednji elektroni vplivajo drug na drugega s Coulombovimi silami, kar poruši ravnovesje med elektronoma v posamezni celici. Elektroni se premaknejo na nove pozicije in dosežejo novo ravnovesje, kjer kaže rezultanta sil F_i z izhodiščem v elektronu i v nasprotni smeri središča. Ostri kot med elektronoma γ je odvisem od razdalje, kot je prikazano na sliki 36. Interakcija med elektroni in smeri resultant sil so prikazani na sliki 28.



Slika 28: Interakcija med prostimi elektroni

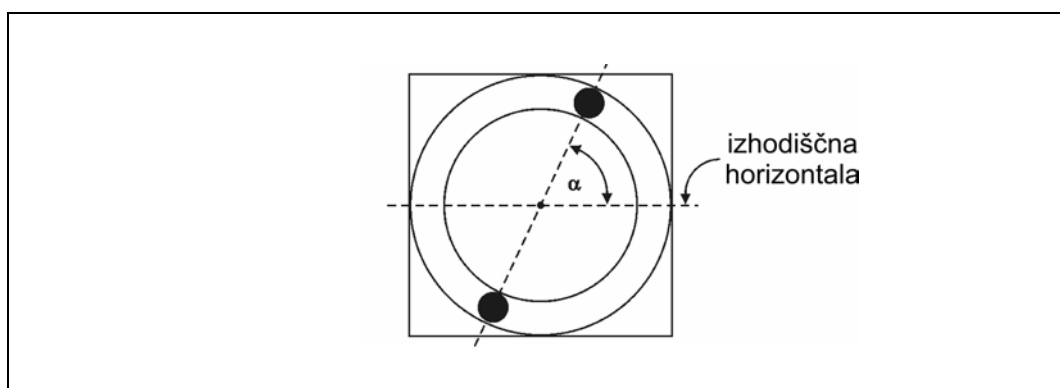
Idealno ravnovesje elektronov, ki bi nam omogočalo linearen prenos informacije iz ene celice na drugo, v primeru interakcije dveh celic je prikazano na sliki 29. Kot γ med elektronoma je π radianov.



Slika 29: Idealno ravnovesje elektronov

Dano ravnovesje oz. njegov dober približek je možen le, če je vpliv sile med elektronoma v celici veliko večji kot pa vpliv sile elektronov sosednje celice. V tem primeru bosta elektrona ostala na premici oz. se le minimalno odklonila. Opisano obnašanje temelji na Coulombovem zakonu. Moč sile med elektronoma v celici na oddaljenosti $2R$ bo za vsaj n^2 večja od moči rezultante sil elektronov sosednje celice oddaljene za $n \cdot 2R$ dolžin med središčema. Zadovoljive rezultate smo dobili šele pri oddaljenosti $n = 15$, vendar je to vodilo do problemov prenosa informacije opisanih v poglavju 5.

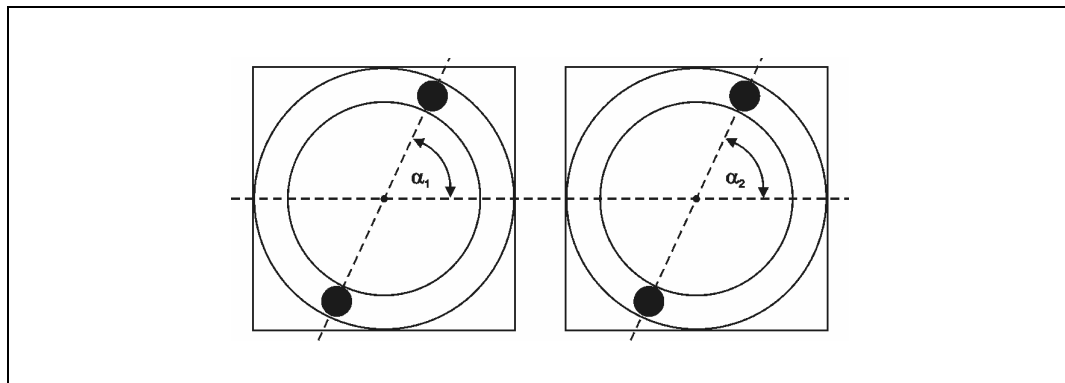
Posledica neželjenega odklona je predpostavka, da elektrona v celici nista popolnoma prosta, temveč vedno zavzemata nasprotujoči si poziciji v potencialnem kanalu in oklepata iztegnjeni kot π radianov. V nadaljevanju ju označujemo kot *vpeta* elektrona. Ker sta sedaj elektrona vedno na nasprotnih straneh glede na središče celice lahko te tri točke povežemo s premico, kot je prikazano na sliki 30. Recimo kotu α premice v nasprotni smeri urinega kazalca glede na izhodiščno horizontalo odklon celice. Ta nam pove pozicijo elektronov na $k\pi$ radianov natančno, zaradi njune simetrije glede na središče, kjer je k neko racionalno število.



Slika 30: Odklon celice

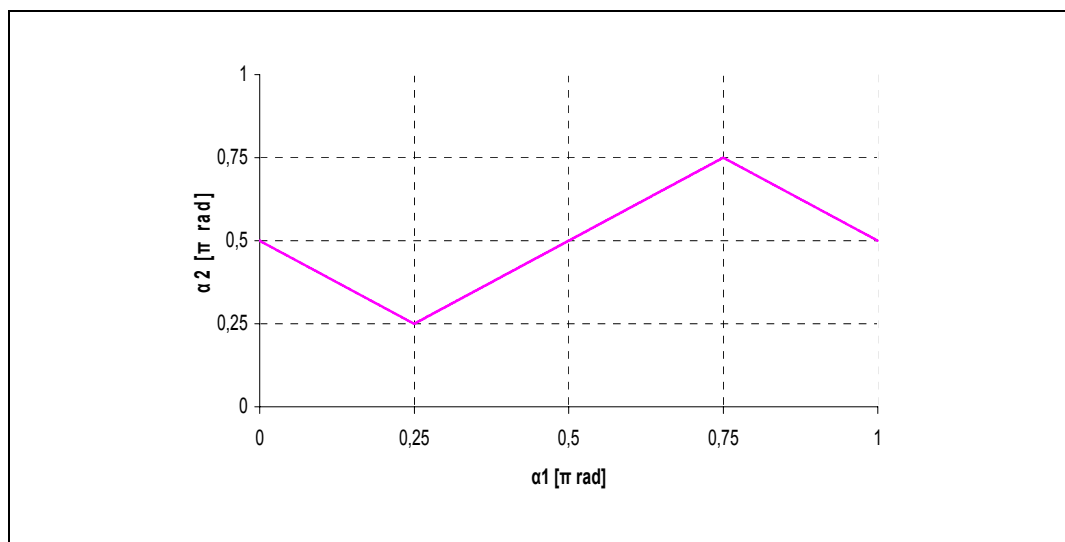
Izvedba brezizgubnega prenosa podatkov oz. signalov po strukturi sestavljeni iz zveznih kvantnih celic zahteva neinvazivno izvedbo vhodov in izhodov, kot je bilo že opisano v poglavju 2.5. Torej gre za upoštevanje načela robno-gnanega procesiranja. Nismo se ukvarjali s samo izvedbo vhoda in izhoda ampak smo predvidevali, da je njuna izvedba mogoča. Vhodna celica strukture je celica v katero vpišemo podatek. Izhodna celica strukture pa omogoča branje odklona celice. Ostalim celicam strukture pravimo notranje celice. Za prvo celico imenovano tudi gonilnik je značilna postavitev elektronov na nasprotujočih si straneh potencialnega kanala, tako da oklepata iztegnjeni kot π radianov. Celici je mogoče določiti poljuben odklon v smeri urinega kazalca in obratni smeri. Podatek se vpiše v prvo celico tako, da vrednost podatka povzroči ustrezen odklon celice. Torej gre za preslikavo vrednosti podatka v kot α , ki ga določa premica, opisana v prejšnjem odstavku, glede na horizontalno izhodišče. Odklon izhodne celice je odvisen od odklona ostalih celic v strukturi. Celicam, ki niso gonilniki pravimo proste celice. Torej med proste celice spadajo tako notranje, kot tudi izhodne celice.

Recimo, da je leva celica gonilnik in vpliva na pozicijo elektronov v desni celici. Elektrona v desni celici sta *vpeta*. Interakcija med celicama je prikazana na sliki 31.



Slika 31: Interakcija gonilnika (levo) in proste celice (desno)

Idealna prevajalna funkcija interakcije teh dveh celic je prikazana na sliki 32. Graf podaja odvisnost odklona α_2 desne celice od odklona α_1 leve celice, gonilnika, če ga povečujemo v nasprotni smeri urinega kazalca od kota 0 do kota π radianov od izhodiščne horizontale.



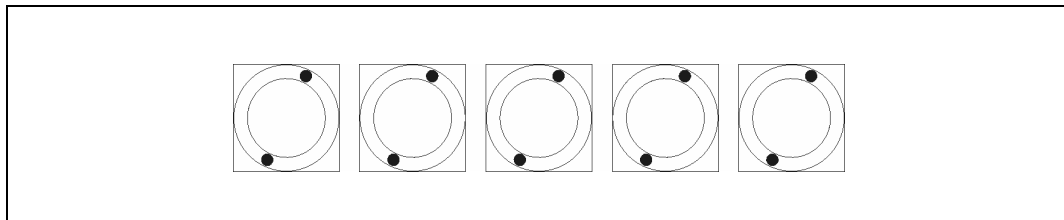
Slika 32: Idealna prevajalna funkcija

Coulombova interakcija med celicama naj bi omogočala linearno zvezno preslikavo odklona ene celice na odklon druge. Ta naj bi bila mogoča na področju med $0,25\pi$ in $0,75\pi$ radianov, kot je razvidno tudi iz grafa prevajalne funkcije na sliki 32. Idealne

razmere, katerih posledica bi bila opisana prevajalna funkcija, predvidevajo dinamično večanje vpliva elektrona, ki je bližnji prosti celici oz. se ji približuje in manjšanje vpliva elektrona, ki se oddaljuje od proste celice. V skrajnih točkah $0,25\pi$ in $0,75\pi$ radianov naj bi bilo razmerje med velikostjo sile bližnjega elektrona in daljnega elektrona tako veliko, da bi bila velikost sile daljnega elektrona zanemarljivo majhna. Ker vemo, da je zaradi enakega naboja obeh elektronov in Coulombovega zakona z geometrijo podanega modela zvezne celice to nemogoče, nas je zanimalo koliko se dejanska prevajalna funkcija približa idealni.

3.3. Model linije

Idealna prevajalna funkcija oz. njen dober približek nam omogoča izvedbo ravninske sekvence zveznih kvantnih celic prikazano na sliki 33, kar pomeni razporeditev zveznih kvantnih celic le po ravnini. Po strokovni literaturi [6] tovrstno strukturo, ki le zrcali stanje vhodne celice na izhodno imenujemo *linija*.



Slika 33: Linija zveznih celic

Taka *linija* naj bi bila sposobna prenosa zveznega signala. *Linija* ustreza načelu robnognanega procesiranja, kar pomeni da ni neposredne interakcije med okoljem in notranjimi celicami v *liniji*. Tako ni nikakršne kontrole nad notranjimi celicami. Celotna interakcija okolja z *linijo* poteka preko vhodne in izhodne celice. Vpis podatka v vhodno celico povzroči njen odklon in s tem spremembo ravnovesja v *liniji*. Zatem *linija* sama poišče novo ravnovesje. Rezultat tega procesa je viden na izhodni celici, ki jo lahko beremo. V primeru idealne prenosne funkcije, bi bil odklon izhodne celice enak odklonu vhodne celice. Zaradi neidealnosti prenosne funkcije interakcije dveh celic nas je zanimala maksimalna dolžina *linije*, ki še omogoča sprejemljiv prenos zveznega signala.

4. SIMULACIJA INTERAKCIJE ZVEZNIH KVANTNIH CELIC

Zahtevnost analitičnih izračunov dinamike interakcije med elektroni dveh ali več celic nas je vodila k izdelavi simulatorja. Osnovni objekt simulacije je elektron. Ta je opisan s pravili. Interakcijo elektronov opazujemo skozi čas. Tak pristop je značilen za metodo bottom-up, ki se uporablja za modeliranje umetnega življenja [18]. Par elektronov omejenih s potjo gibanja po krožnici sestavlja zvezno kvantno celico. S simulacijo interakcije med elektroni zveznih celic simuliramo delovanje linije.

4.1. Model elektrona v simulatorju

Premik elektrona po potencialnem kanalu je zvezen. Modeliranje premika z iskanjem novega ravnovesnega stanja predstavlja problem. Z izračunavanjem rezultante sil v točno določenih točkah, ki opisujejo potencialni kanal, diskretiziramo opis zveznega premika. Tega si ne želimo, saj število točk določa natančnost izračuna nove pozicije. Seveda lahko natančnost povečujemo z večanjem števila točk, vendar se s tem povečuje količina izračunov, hkrati pa še vedno ne vemo ali smo dejansko dosegli pravo ravnovesno stanje.

Tako smo ubrali nekoliko drugačno pot modeliranja elektrona, kjer zveznega premika ne diskretiziramo. Uporabili smo pristop umetnega življenja (*ang. "artificial life"*) [13], kjer načrtujemo s pomočjo velikega števila osnovnih enot, katerih lokalne interakcije temeljijo na preprostih pravilih in opazovanju nastanka globalnega obnašanja, ki v sistem glede na osnovna pravila ni bilo predhodno vključeno [18]. Osnovno enoto, v našem primeru elektron, smo modelirali s pomočjo animata [13]. Čeprav se animat uporablja večinoma za modeliranje živih bitij, ga lahko uporabimo tudi za modeliranje neživega sveta, saj je njegova dinamika prav tako odvisna od trenutnega stanja sveta. Modeliranje elektrona z animatom omogoča, da se ob spremembi pozicije enega ali več elektronov skozi simulacijo novo ravnovesno stanje razvije samo od sebe.

Animat je razširjen Moorov avtomat (formalni opis je v [13]). Podan je z osmerčkom $\langle X, Q, Y, \delta, \gamma, P, S, B \rangle$. X, Q in Y predstavljajo množice vhodnih črk, notranjih stanj in izhodnih črk avtomata. Vhodna črka je trenutno stanje okolja. Le tega predstavljajo

elektroni oz. njihove pozicije, kar pomeni, da je vhodna črka množica pozicij vseh elektronov. Množica notranjih stanj je definirana s pozicijo elektrona v času t . Izhodna abeceda je enaka množici notranjih stanj. Funkcija δ je razširjena funkcija prehajanja stanj in je sestavljena iz treh funkcij:

- funkcije zaznavanja P , ki izbere le tiste elektrone, ki vplivajo na obravnavani elektron,
- funkcije nagona S , ki izračuna rezultanto sil, ki delujejo na obravnavani elektron in posledično smer premika elektrona,
- funkcije obnašanja B , ki izračuna novo pozicijo obravnavanega elektrona.

Funkcija γ je izhodna funkcija, ki le preslika trenutno stanje na izhod.

Realizacija funkcije P izmed vseh elektronov v okolju izbere le tiste, za katere vemo, da vplivajo na obravnavani elektron.

Funkcija S izračuna rezultanto sil, ki delujejo na elektron. Pri izračunu upošteva le tiste elektrone, ki jih je funkcija P izbrala. Najprej izračuna smer sile s katero deluje elektron i na obravnavani elektron. Smer izračuna po izrazu (3) kot vektor \vec{F}_i , ki kaže v smeri od pozicije elektrona i do obravnavanega elektrona.

$$\vec{F}_i = \vec{p} - \vec{p}_i \quad (3)$$

Za vsak vektor i se izračuna njegovo dolžino $|\vec{F}_i|$ po izrazu (4), ki predstavlja dejansko oddaljenost r med elektronoma uporabljeno v formuli (2).

$$|\vec{F}_i| = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (4)$$

Preden lahko izračunamo velikost sile po Coulombovem zakonu moramo vektor \vec{F}_i normirati po enačbi (5), kar nam da vektor \vec{F}_{Ni} . Ta podaja smer sile, s katero deluje elektron i na obravnavani elektron.

$$\vec{F}_{Ni} = \frac{\vec{F}_i}{|\vec{F}_i|} \quad (5)$$

Izračun dejanske sile, s katero elektron i vpliva na obravnavani elektron je podan v enačbi (6). Enačba upošteva Coulombov zakon (2).

$$\vec{F}_{Di} = \vec{F}_{Ni} \cdot \frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot |\vec{F}_i|^2} \quad (6)$$

Na obravnavani elektron torej deluje sila, ki jo izračunamo po izrazu (7) kot vsoto vseh sil \vec{F}_{Di} .

$$\vec{F}_r = \sum_i \vec{F}_{Di} \quad (7)$$

Funkcija B izračuna novo pozicijo obravnavanega elektrona glede na rezultanto sil \vec{F}_r izračunano s funkcijo S . Pri tem upošteva drugi Newtonov zakon in izračuna pospešek elektrona, ki ga povzročijo sile, ki delujejo na obravnavani elektron. V enačbi pospeška (8) je upoštevana masa elektrona $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_r}{m_e} \quad (8)$$

Zaradi pospeška dobi elektron po času dt hitrost $\vec{v}(t+1)$. Privzeli smo, da je $\vec{v}(t)$ vedno enaka 0.

$$\vec{v}(t+1) = \vec{v}(t) + \vec{a}(t) \cdot dt \quad (9)$$

Sledi izračun (10) nove pozicije $\vec{p}(t+1)$, ki jo elektron doseže pri dani hitrosti $\vec{v}(t)$. V izračunu je upoštevana trenutna pozicija elektrona $\vec{p}(t)$.

$$\vec{p}(t+1) = \vec{p}(t) + \vec{v}(t) \cdot dt \quad (10)$$

Nova pozicija $\vec{p}(t+1)$ je pozicija, kjer bi bil elektron, če bi se prosto gibal. Nadaljnje enačbe upoštevajo omejitve gibanja elektrona po krožnici. Zato poiščemo presečišče premice (ki gre skozi izhodišče krožnice in pozicijo elektrona $\vec{p}(t+1)$) ter krožnice z radijem R . Torej z enačbo (11) poiščemo kotni premik τ , ki bi ga glede na središče krožnice C opravil elektron, če bi se prosto gibal.

$$\tau = \arctan \frac{y_{\vec{p}(t+1)} - y_c}{x_{\vec{p}(t+1)} - x_c} \quad (11)$$

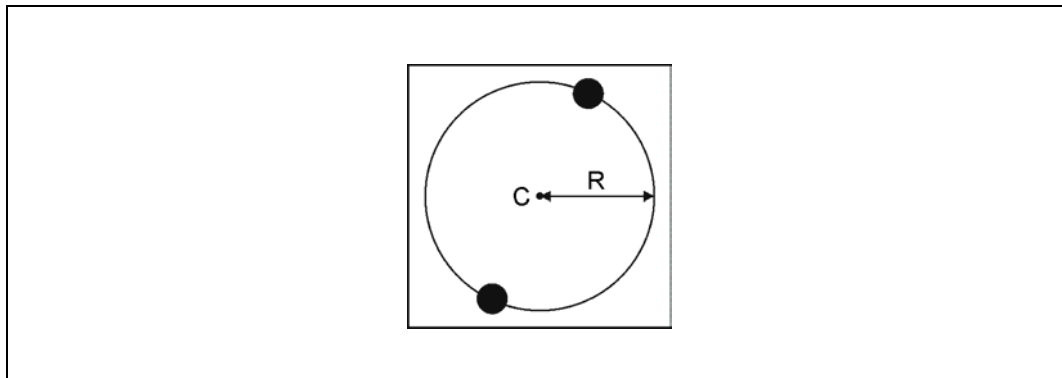
Privzamemo, da bi elektron, ki potuje po krožnici z radijem R , opravil enak kotni premik. Tako izračunamo (12) novo dejansko pozicijo \vec{p}_d elektrona v potencialnem kanalu celice s središčem C .

$$\vec{p}_d(t+1) = (R \cdot \cos \tau + x_c, R \cdot \sin \tau + y_c) \quad (12)$$

Funkcija prehajanja stanj posameznega elektrona se izvede paralelno glede na funkcije prehajanja stanj ostalih elektronov v okolju.

4.2. Model celice v simulatorju

Model celice temelji na dveh prostih elektronih opisanih v poglavju 4.1, katerih gibanje je omejeno na gibanje po krožnici. Krožnica z radijem R modelira potencialni kanal opisan v poglavju 3.2. Model celice določa tudi pozicijo središča te krožnice C . Omejevanje gibanja elektronov po krožnici je vpeto že v formule (11), (12).



Slika 34: Model celice v simulatorju

Obnašanje elektronov celice je določeno s tipom celice. Pri modelu vhodne celice ali gonilnika je rezultat funkcije P modela elektrona prazna množica. To uresničuje predpostavko, da preostali elektroni ne vplivajo na elektrona gonilnika. Vpliv v nasprotni smeri pa seveda obstaja. Začetna pozicija elektronov in s tem odklon vhodne celice se določi na začetku simulacije. V primeru modeliranja zveznega kroženja ali nihanja elektronov vhodne celice je rezultat funkcije S modela elektrona sila \vec{F}_r , s konstantno velikostjo in smerjo, ki povzroči željeni odklon celice v koraku simulacije.

Če celica modelira notranjo ali izhodno celico, lahko izbiramo med modeliranjem *prostih* elektronov v potencialnem kanalu ali pa *vpetih* elektronov. Izbira se odraža v enačbah funkcije S modela elektrona. Enačbe *prostih* elektronov ostajajo enake enačbam (3)-(7). Pri modelu celice z *vpetima* elektronoma pa enačbi (7) sledi še enačba (13). Označimo rezultanto sil, ki deluje na obravnavano celico z \vec{F}_1 (v enačbi (7) je označena z \vec{F}_r) in rezultanto sil, ki deluje na elektron, s katerim je obravnavani elektron *vpet*, z \vec{F}_2 . Tedaj je rezultanta sil \vec{F}_r , ki deluje na obravnavan elektron podana z enačbo (13). Rezultanto sil \vec{F}_r uporabimo v enačbi (8).

$$\vec{F}_r = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 \quad (13)$$

Elektrona notranje in izhodne celice se odzivata na spremembe pozicije elektronov, ki jih izbere funkcija P . Ker simuliramo bodisi eno zvezno kvantno celico, bodisi le krajšo *linijo* sestavljeno iz zveznih kvantnih celic realizacija funkcije P zajame vse elektrone, ki so trenutno v okolju oz. katerih obnašanje trenutno simuliramo.

4.3. Model linije v simulatorju

Dve ali več enako orientiranih celic planarno postavljenih v ravni vrsti predstavlja model *linije*. Celice so med seboj enako oddaljene. Oddaljenost med središči dveh celic *linije* bomo označili z d . Opisana je s spodnjo enačbo.

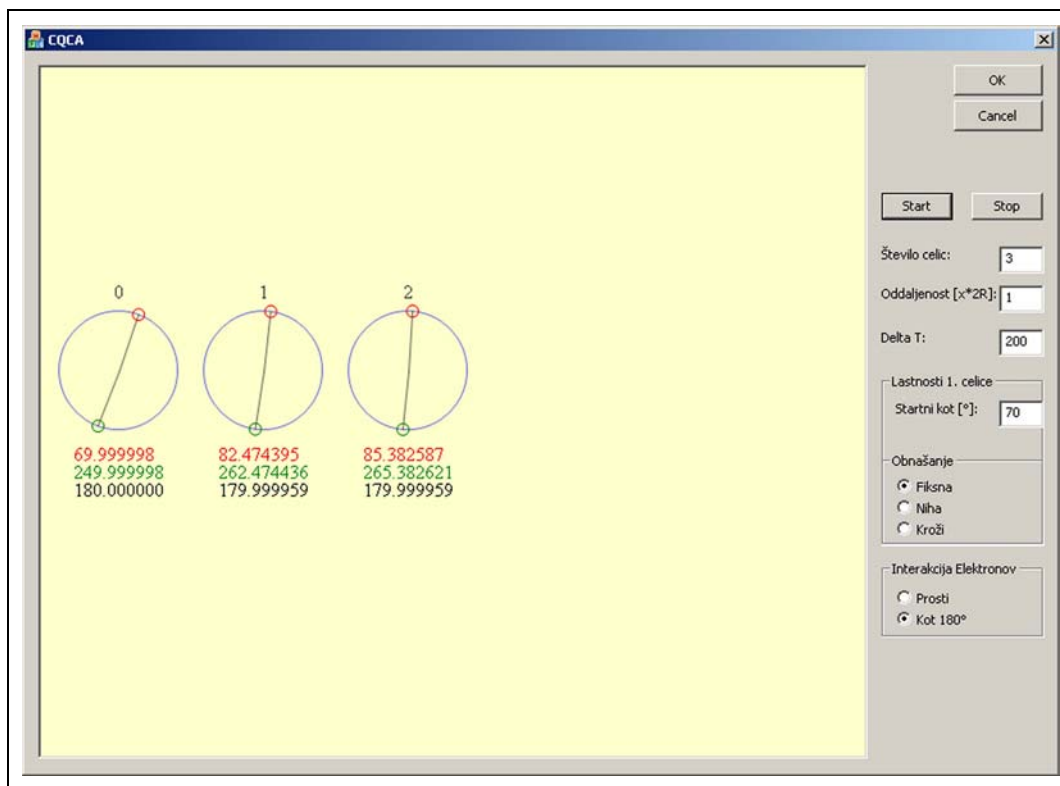
$$d = n \cdot 2R \quad n \in \mathbb{R}, n \geq 1 \quad (14)$$

Celotno obnašanje *linije* je odvisno od interakcije med celicami oz. natančneje od interakcije med prostimi elektroni ujetimi v potencialne kanale v celicah. Prva celica na levi strani je gonilnik, ostale celice se le odzivajo na spremembe pozicije elektronov gonilnika. Torej informacija potuje od leve proti desni. Zadnja celica *linije* je izhodna celica in nam omogoča branje trenutnega stanja *linije*. Ob spremembi odklona gonilnika sistem sam najde novo ravnovesno stanje. Preberemo pa lahko ravnovesno stanje le na izhodni celici.

4.4. Simulator

Za izgradnjo simulatorja smo uporabili okolje MS Visual C++.NET 2003 in MS Windows XP. Simulator je kot večnitna aplikacija v celoti zgrajen modularno. Bistvena modula sta `CElektron` in `CCelica`, ki implemetirata opisane modele elektrona in celice. Celotno obnašanje sistema je zajeto v metodah podanih modulov. Simulator trenutno podpira le simulacijo posamezne celice in *linije* do dolžine petih celic, vendar je nadgradnja zaradi modularne zasnove izjemno enostavna. Prikaz celic uporablja grafično knjižnico MS GDI+ in je popolnoma ločen od metod računanja simulacije, zato ga lahko poljubno spremenimo, ne da bi vplivali na metode modulov.

Grafični vmesnik, prikazan na sliki 35, omogoča nastavitve parametrov simulacije in prikaz obnašanja celic oz. *linije*.



Slika 35: Grafični vmesnik simulatorja

Nastavimo lahko število celic, oddaljenost med posameznimi celicami, ki ustreza parametru n enačbe (14). Čas ΔT ustreza parametru dt enačb (9) in (10). Parameter *Startni kot* omogoča nastavitve odklona α vhodne celice. Vrednost je podana v kotnih stopinjah. Sledi izbira obnašanja vhodne celice, ta lahko ohranja nastavljen odklon, lahko niha med $\pi/4$ in $3\pi/4$ ali pa kroži. Zadnja izbira določa interakcijo med elektronoma v celici. Ta sta lahko popolnoma *prosta* ali pa *vpeta* (oklepata kot 180° oz. π radianov) v potencialnem kanalu. Gumba *Start* in *Stop* zaženet oz. ustavita simulacijo.

Okno na levi strani prikazuje zvezne kvantne celice, ki jih trenutno simuliramo. Celica je predstavljena z modrim krogom, ki predstavlja potencialni kanal ter rdečim in zelenim krogcem, ki predstavljata elektrona. Elektrona sta po lastnostih povsem enakovredna, različno sta označena le zaradi lažjega opazovanja njunega obnašanja. Nad celico je podana identifikacijska oznaka. Pod celico je podan kot rdeče označenega elektrona, zatem kot zeleno označenega elektrona in kot, ki ga elektrona oklepata. Vsi

koti so podani v kotnih stopinjah. Kot posameznega elektrona se meri v isti smeri kot kot α na sliki 30. Kot med elektronoma je kot γ prikazan na sliki 28.

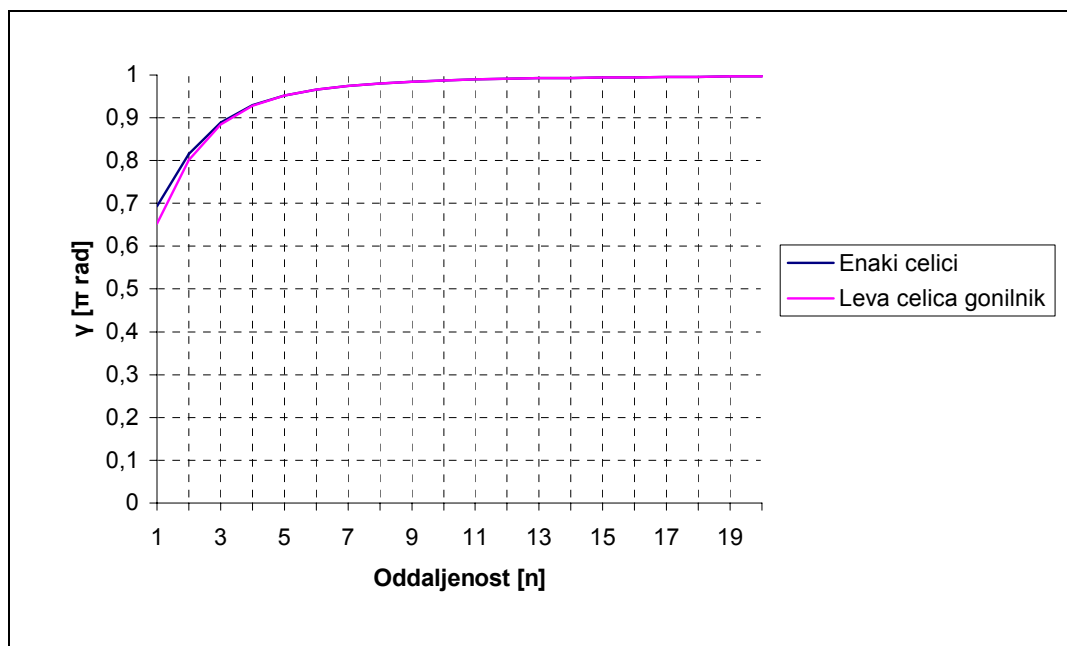
5. REZULTATI SIMULACIJE

Pred simulacijo interakcije dveh celic in interakcije celic v *liniji* smo izvedli simulacijo obnašanja ene celice z namenom potrditve predpostavke, da se elektrona v celici pod vplivom Coulombovih odbojnih sil postavita na nasprotni poziciji glede na središče celice. Elektrona smo postavili na poljubni mesti na krožnici. Rezultat je potrdil našo predpostavko, saj sta se elektrona ne glede na začetno pozicijo vedno premaknila na nasprotnojuči si poziciji glede na središče celice. Ena od situacij je prikazana na sliki 34.

5.1. Interakcija dveh celic

Simulirali smo interakcijo dveh celic z namenom opazovanja odklona posameznega elektrona in kota med elektronoma. Dve celici predstavljata tudi najkrajšo *linijo*.

Graf na sliki 36 prikazuje odvisnost kota γ med *prostima* elektronoma (slika 28) od razdalje med celicama.

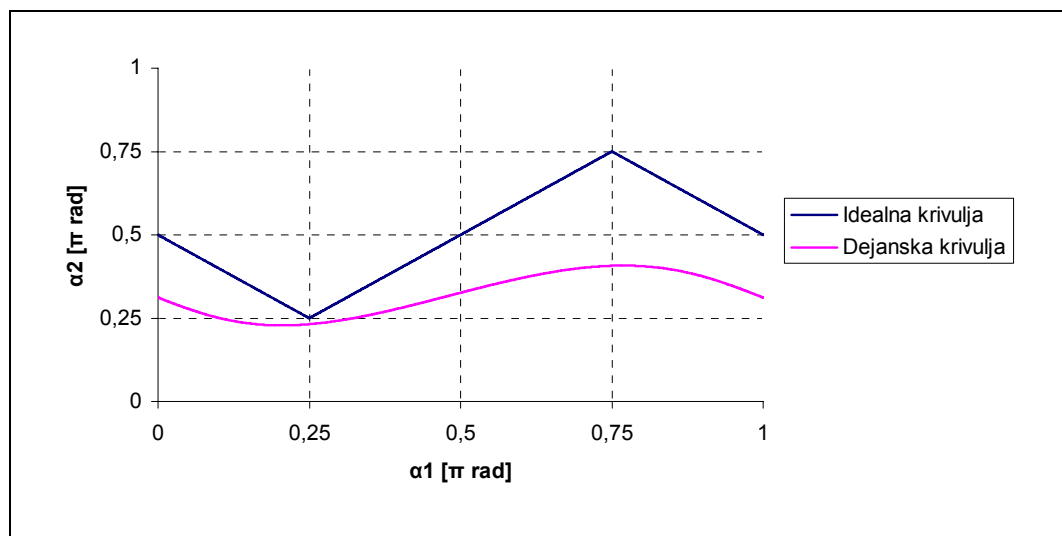


Slika 36: Odvisnost kota γ med prostima elektronoma od razdalje med celicama

Kot med elektronoma γ se povečuje z večanjem razdalje d med celicama. Razdaljo opisuje enačba (14). Modra krivulja prikazuje kot γ v primeru *prostih* elektronov v obeh celicah. Roza krivulja pa prikazuje kot γ v primeru, ko je leva celica gonilnik, desna pa

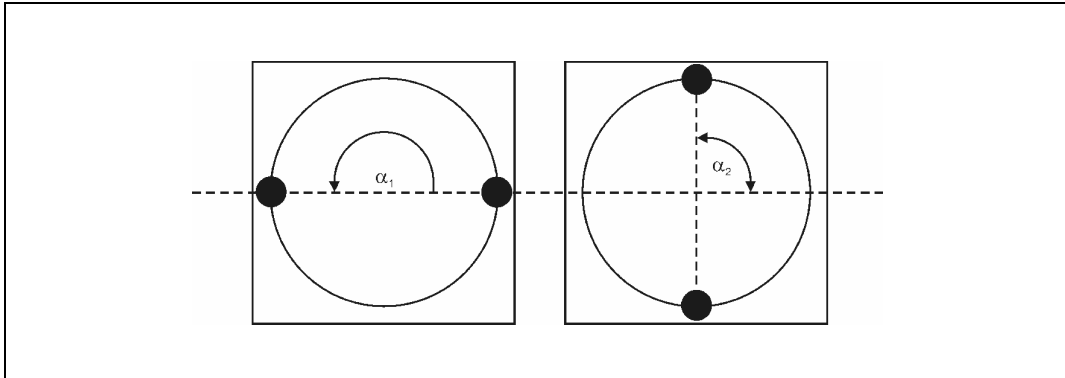
ima *proste* elektrone. Vidimo, da elektroni pri oddaljenosti $n = 15$ oklepajo kot blizu π radianov. Na žalost je pri tej oddaljenosti preslikava odklona ene celice na odklon druge daleč od idealne, zato smo uvedli model *vpetih* elektronov.

Slika 37 prikazuje odklon α_2 celice s *prostimi* elektroni v odvisnosti od odklona gonilnika α_1 .



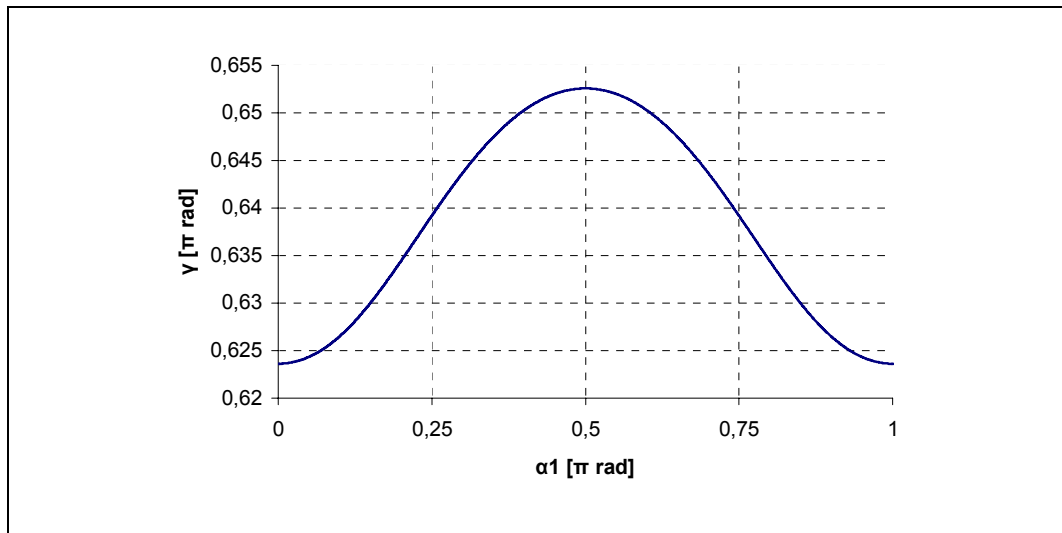
Slika 37: Idealna in dejanska prevajalna funkcija interakcije gonilnika in celice s prostimi elektroni

Med simulacijo smo odklon gonilnika spreminjali od 0 do π radianov. Začetni odklon gonilnika in pozicije *prostih* elektronov v desni celici so prikazani na sliki 38. Na začetku simulacije elektrona najdeta svojo ravnovesno lego, v kateri bi ostala nespremenjena v primeru mirovanja gonilnika. Zatem smo pričeli beležiti odklon gornjega elektrona. Vidimo, da se v primerjavi z idealno krivuljo večina odklona izgubi. Elektron giba med $\alpha_2 = 0,228\pi$ radianov in $\alpha_2 = 0,407\pi$ radianov. To nam daje celoten razpon $0,179\pi$ radianov, kar je daleč od razpona $0,5\pi$ radianov pri idealni krivulji. Krivulja odklona spodnjega elektrona je enaka opisani krivulji gornjega elektrona.

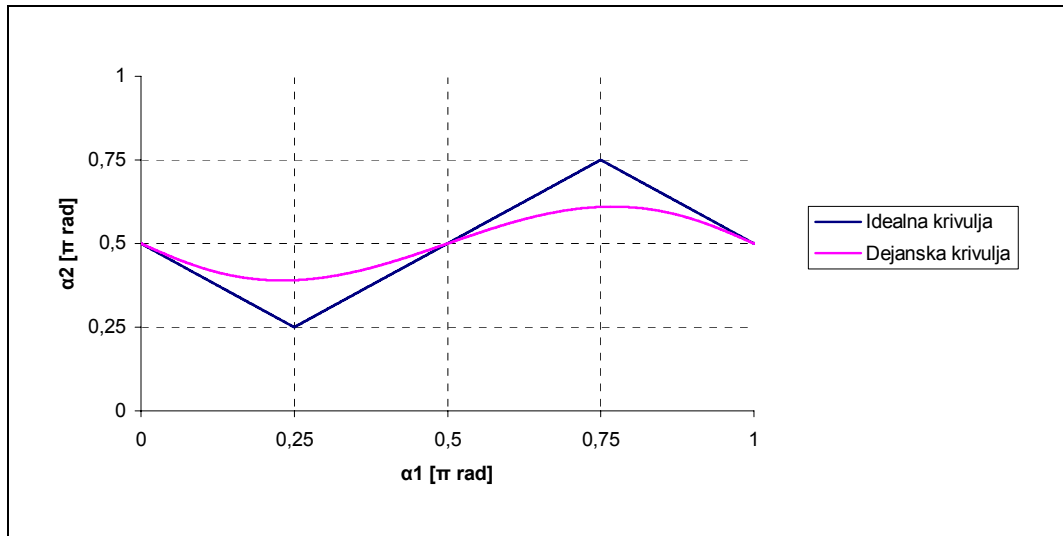


Slika 38: Začetna pozicija

Ista simulacija je tudi pokazala, da se kot γ med *prostima* elektronoma spreminja s spremembo odklona α_1 gonilnika. Kot γ se povečuje s približevanjem odklona gonilnika $\alpha_1 = 0,5\pi$ radianov, tu doseže maksimum, zatem pa se zmanjšuje z oddaljevanje od $0,5\pi$ radianov. Rezultat je prikazan na sliki 39.

Slika 39: Kot γ med prostima elektronoma celice

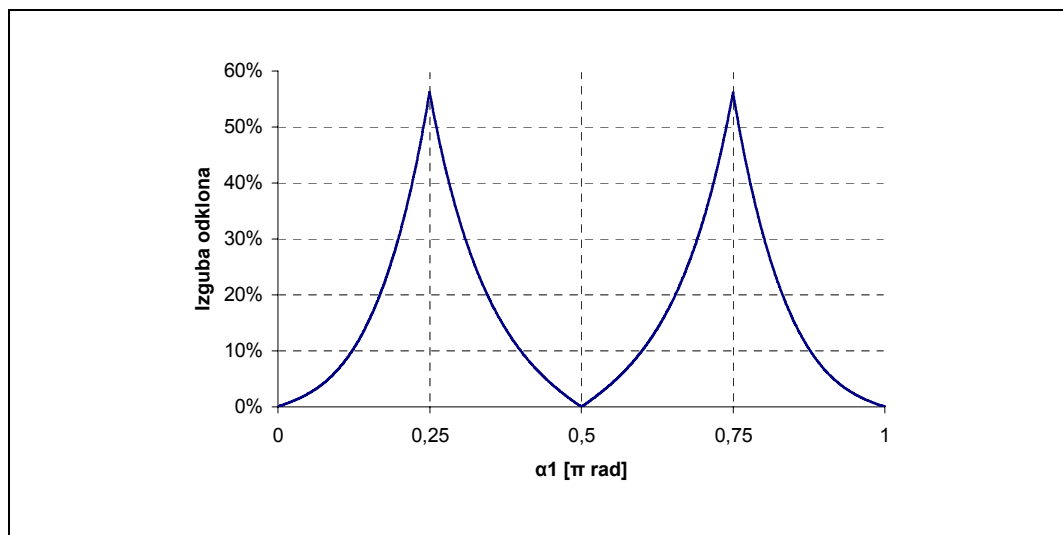
Prevajalno funkcijo dveh celic z *vpetima* elektronoma prikazuje slika 40. Začetna postavitev celic je prikazana na sliki 38. Graf podaja odvisnost odklona α_2 proste celice od odklona α_1 gonilnika.



Slika 40: Idealna in dejanska prevajalna funkcija interakcije gonilnika in celice z vpetimi elektroni

Odklon α_1 gonilnika smo spreminjali od 0 do π radianov. Vidimo, da je odklon α_2 zvezen, vendar zelo slab približek željene linearne preslikave odklona α_1 med $0,25\pi$ in $0,75\pi$ radianov. Odklon α_2 prehaja med vrednostima $0,389\pi$ radianov pri $\alpha_1 = 0,230\pi$ radianov in $0,61\pi$ radianov pri $\alpha_1 = 0,769\pi$ radianov. Odklon α_1 se popolnoma preslika le pri 0, $0,5\pi$ in π radianov. Posledica nelinearne preslikave je izguba informacije, ki se še slabša z večanjem števila celic v *liniji*.

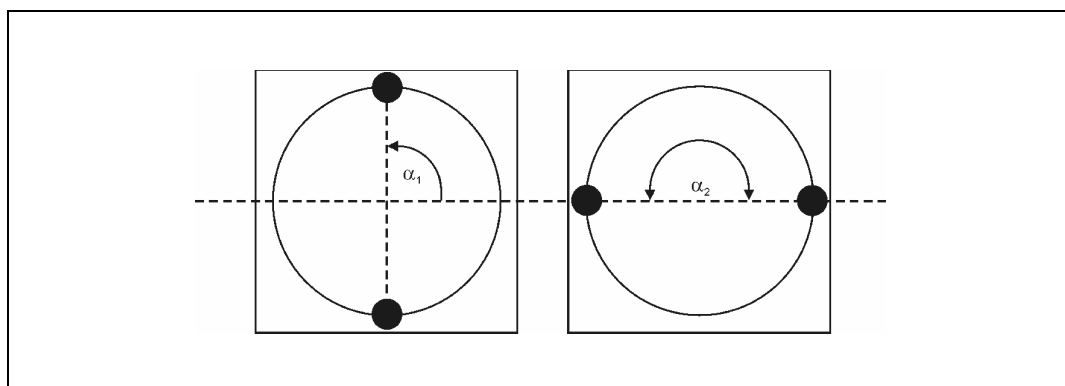
Kot je vidno na sliki 40 odstopanje med odklonoma α_1 in α_2 narašča s približevanjem skrajnim točkam linearne preslikave. Odstopanje v odstotkih je prikazano na sliki 41.



Slika 41: Odstopanje dejanske krivulje od idealne krivulje

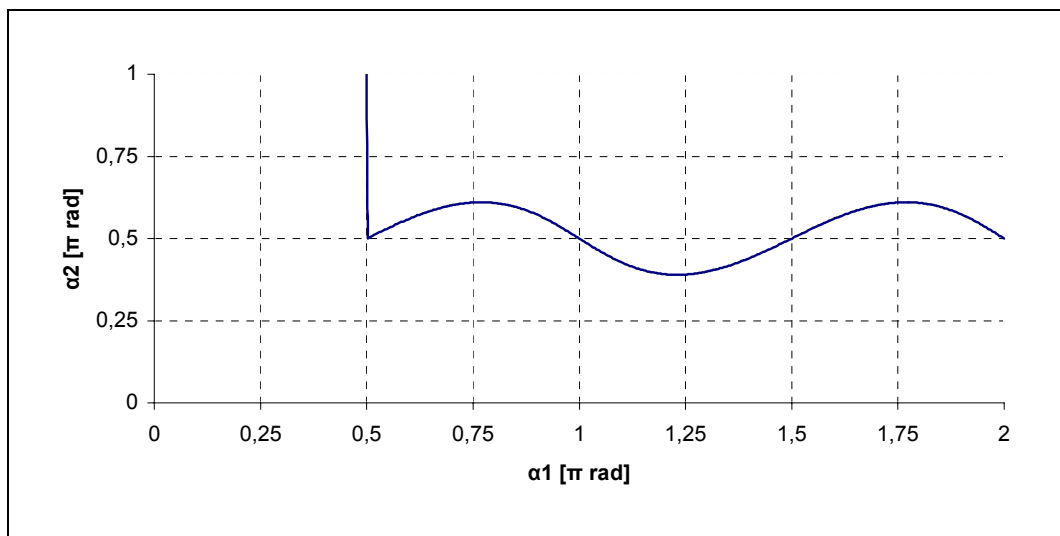
Izguba v skrajnih točkah linerane preslikave je 54,7%, medtem ko je izguba pri odklonih 0 , $0,5\pi$ in π radianov 0%. Odstopanje izkazuje eksponentno naravo, ki je posledica Coulombovega zakona.

Čeprav smo začetne odklone celic vedno nastavili pred začetkom simulacije, smo s simulacijami ugotovili, da to v bistvu pri celicah z *vpetimi* elektroni ni potrebno. To je prikazano tudi s simulacijo, kjer smo začetne odklone celic nastavili kot je prikazano na sliki 42.



Slika 42: Trenutno ravnovesno stanje

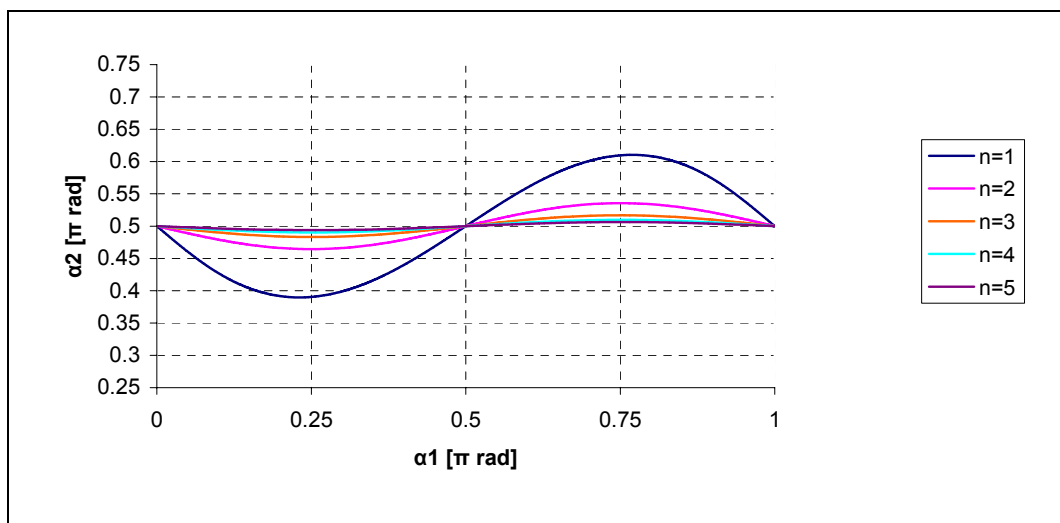
Prosta celica je ohranjala odklon α_2 , če se odklon $\alpha_1 = 0,5\pi$ radianov gonilnika ni spremenil. V trenutku, ko se je odklon gonilnika spremenil, je prosta celica najprej prešla v novo ravnovesno stanje, zatem pa sledila odklonu α_1 gonilnika. Odklon α_1 gonilnika smo spreminjali od $0,5\pi$ do 2π radianov. Na sliki 42 je graf prevajalne funkcije opisanega dogodka.



Slika 43: Prehod v ravnovesno stanje

Simulacije so pokazale, da se celica ne glede na trenutni odklon vedno postavi v novo ravnovesno stanje in prične slediti odklonu gonilnika. Opisan dogodek je neodvisen od začetnih odklonov gonilnika in proste celice. Pri celici s *prostima* elektronoma ravnovesno stanje ni enolično določeno, zato smo morali pred začetkom simulacije vedno nastavljati začetne pozicije elektronov.

Z zadnjim poizkusom smo hoteli ugotoviti odvisnost prevajalne funkcije interakcije dveh celic z *vpetima* elektronoma od oddaljenosti d med celicama. Oddaljenost je določena z enačbo (14). Rezultat poskusa je prikazan na sliki 44.



Slika 44: Odvisnost prevajalne funkcije od oddaljenosti med celicama

Na začetku vsake simulacije smo nastavili začetni odklon gonilnika in proste celice kot je prikazano na sliki 38. Nastavili smo tudi oddaljenost celice d , tako da smo glede na enačbo (14) spremenili n . Odklon α_1 gonilnika smo spreminjali od 0 do π radianov. Vidimo, da se z oddaljenostjo odklon α_2 sosednje celice manjša. Pri oddaljenosti $n = 6$ ga skorajda ni več.

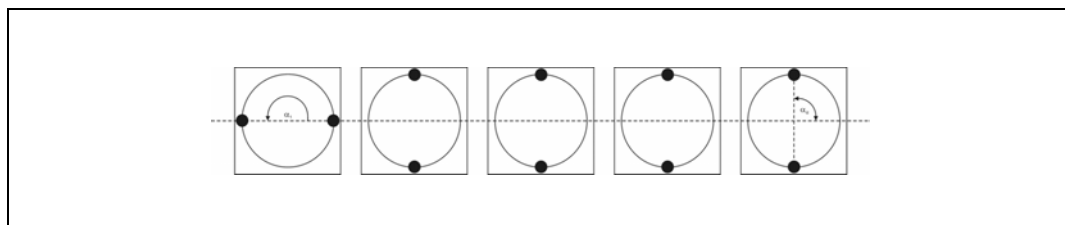
Ugotovili smo, da prevajalna funkcija ni odvisna od radija R krožnice, zato njegova vrednost ni nikoli navedena. Prevajalna funkcija ravno tako ni odvisna od konstantnega dela k Coulombovega zakona v enačbi (15), ki je le drug zapis enačbe (2).

$$F = \frac{k}{r^2} \quad (15)$$

Odklon proste celice oz. prevajalna funkcija je odvisna le od oddaljenosti med celicama.

5.2. Interakcija celic v liniji

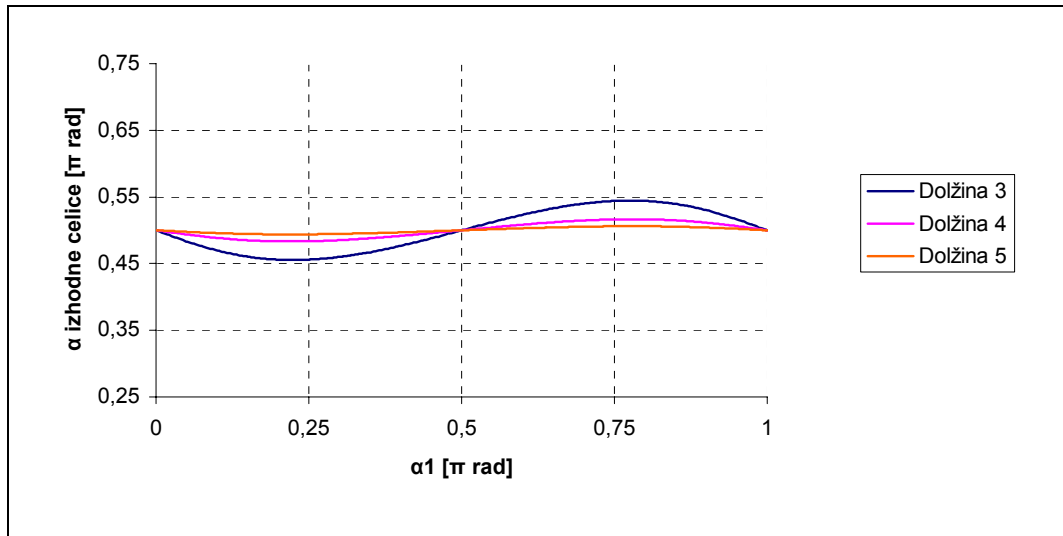
Simulirali smo *linijo* prikazano na sliki 45.



Slika 45: Linija

Linijo so sestavljale celice z *vpetimi* elektroni. Simulirane *linije* so bile sestavljene iz treh, štirih in petih celic. Oddaljenost med središči celic je bila vedno $d = 2R$. leva celica *linije* je predstavljal vhodno celico oz. gonilnik *linije*, desna celica pa izhodno celico. Odziv *linije* na odklon gonilnika smo beležili le na izhodni celici.

Graf na sliki 46 prikazuje odziv *linije* na odklon α_1 gonilnika. Prikazane so prevajalne funkcije *linije* treh, štirih in petih celic.



Slika 46: Prevajalna funkcija linij različnih dolžin

Začetni odkloni celic so prikazani na sliki 45. Odklon α_1 gonilnika smo spreminjali od 0 do π radianov. Vidimo, da se odklon izhodne celice manjša z večanjem dolžine *linije* oz. večanjem števila celic, ki sestavljajo *linijo*. To je neposredna posledica dejanske prevajalne funkcije interakcije dveh celic, prikazane na sliki 40. Prikazana prevajalna funkcija *linije* nam onemogoča brezizguben prenos informacije po *liniji*.

6. ZAKLJUČEK

Lent [6] pravi, da bo tehnologija QCA pomenila revolucionarni preskok v elektronski tehnologiji, podobno kot tranzistor v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Ta preskok bo možen le z rešitvijo trenutnih tehnoloških problemov, ki se pojavljajo pri realizaciji celice QCA. V zaključku bi podali nekatere tehnološke prednosti, ki jih ponuja tehnologija QCA.

Kvantni celularni avtomat rešuje problem povezovanja gradnikov v vezjih. Eden izmed večjih problemov mikroelektronike je nelinearno manjšanje kovinskih povezav glede na manjšanje gradnikov. Struktura QCA rešuje ta problem tako, da za svoje delovanje ne potrebuje povezav med posameznimi celicami. Povezovanje je nadomestila Coulombova interakcija med celicami. Robno-gnano procesiranje ne potrebuje prenosa informacije ali energije iz okolja v notranje celice strukture. Procesiranje s stabilnim stanjem izniči potrebo po urinih in osveževalnih signalih. Zadnji trditvi nekoliko nasprotuje le adiabatno preklapljanje, saj za svoje delovanje potrebuje urin signal za kontrolo potencialnih pregrad med kvantnimi točkami v posamezni kvantni celici.

QCA omogoča izdelavo procesnih elementov zelo velike gostote (*ang. "ultra-high density computing elements"*). Bistveno tehnološko prednost pomeni izboljšana funkcionalna gostota procesnih elementov. Pri 10 nm tehnologiji bo dimenzija posamezne celice 50 x 50 nm, kar pomeni 10^{10} celic/cm² [6]. Kot je bilo opisano v poglavju 2.9.2 logična vrata sestavlja 5 celic, kar pomeni izjemno veliko funkcionalno gostoto vezij. Niemier [16] je primerjal QCA izvedbo 4 bitnega ALU vezja z akumulatorjem in njegov CMOS ekvivalent. Ugotovil je, da je izvedba QCA približno 10-krat gostejša od 0,07 μm CMOS izvedbe. V primeru 10-kratnega zmanjšanja celice QCA, kar pomeni velikost celice 5 x 5 nm, bi bilo ALU vezje 1019-krat gostejše od 0,07 μm CMOS izvedbe.

Disipacija energije je v QCA strukturah izjemno majhna, čeprav gre za veliko gostoto celic QCA. Problem rešuje preslikava informacije v stabilno oz. osnovno stanje fizikalnega sistema. Lent [6] pravi, da je energetski vložek v polje QCA energija potrebna za postavitve posamezne vhodne celice. Le ta znaša približno 1meV na vhodno celico. Vložena energija se razširi v okolje v času relaksacije sistema, kar traja

nekaj *pikosekund*. To predstavlja disipacijo moči v rangu 10^{-10} W na vhodni bit, kar je precej manj kot pri današnjih vezjih.

Posledica majhne disipacije energije in hitrega relaksacijskega časa je možnost izjemno hitrega procesiranja. Niemier [15] trdi, da je fizikalna gornja meja v rangu THz.

Visoka gostota osnovnih gradnikov bi omogočala izdelavo pomnilnih struktur velike kapacitete. Branje in pisanje v te strukture bi potekalo izjemno hitro. Trenutno se znanstveniki ukvarjajo s problemom naslavljanja celic in problemom vpliva okolja na informacijo v celici.

Problem termodinamike in vpliva okolja ni bil izpostavljen v diplomski nalogi, saj se nismo hoteli podajati v fizikalne probleme realizacije, vendar je ta tako velik, da se poizkusi s strukturami QCA trenutno izvajajo pri temperaturi blizu absolutne ničle [17].

Večina realiziranih struktur je neposreden nadomestek običajnih struktur realiziranih v CMOS tehnologiji. Po drugi strani pa se številni znanstveniki, npr. Cole [1] in Niemier [15], [16] sprašujejo ali so mogoče nove strukture, ki bi boljše izkoristile prednosti celice QCA. Tako je Niemier [15] predlagal sistolična polja kot idealno arhitekturo za realizacijo s QCA celicami.

Idejo o izkoristku kvantnih efektov v nanostrukturah smo z vpeljavo pojma zvezne kvantne celice peljali še nekoliko naprej. Zakaj bi izdelali neposreden nadomestek tranzistorja, ki omogoča le dve stanji na posamezno celico, če je možna struktura z več ali celo neskončno stanji na celico? Če bi bila taka celica mogoča, predvidevamo, da bi bila sposobna prenašanja in hranjenja poljubnega realnega podatka.

Osnova za naš model celice je bila razširitev funkcionalnosti celice QCA. Model temelji na dveh elektronih ujetih v ciklični potencialni kanal. V kanalu se elektrona lahko prosto gibljeta, vendar ga ne moreta zapustiti. Že prve simulacije so nam pokazale, če se hočemo približati idealni linerani preslikavi odklona ene celice na odklon druge (slika 32), moramo *vpeti* elektrona posamezne celice tako, da vedno oklepata kot π radianov. Sama postavitev zveznih kvantnih celic v *linijo* je izhajala iz postavitve celic QCA v

ravni vrsti (linija QCA, kot jo je realiziral Lent). Rezultati simulacij so pokazali, da dana planarna postavitev zveznih kvantnih celic v *linijo* ne obeta željene idealne preslikave med vhodno in izhodno celico *linije*.

Kljub neuspešni realizaciji *linije* smo prišli do pomembnih ugotovitev:

- prevajalna funkcija interakcije med dvema elektronoma ali interakcije elektronov v *liniji* ni odvisna od radija R potencialnega kanala,
- ista prevajalna funkcija tudi ni odvisna od konstantnega dela Coulombovega zakona (15), temveč le od oddaljenosti med celicami,
- celica z *vpetimi* elektroni se, ne glede na trenutni odklon, vedno postavi v novo ravnovesno stanje in prične slediti odklonu gonilnika. Dogodek je neodvisen od začetnih odklonov gonilnika in proste celice. To pomeni, da celicam ni potrebno predhodno nastaviti odklona, da bi *linija* pravilno delovala.

V diplomski nalogi je bila opravljena simulacija le ene geometrije postavitve celic. Verjamemo, da obstaja postavitev, ki omogoča linearno preslikavo odklona ene celice na odklon druge. Pojavile so se ideje postavitve celic v 3D prostor. Če bi hoteli simulirati nove postavitve, bi bilo potrebno popraviti le P , S in B funkcije modela elektrona, tako da upošteva 3D prostor. Nadaljnje delo predstavlja tudi fizikalna obravnava zvezne celice in izvedba interakcije celice z okoljem.

Kot vidimo je problemov, ki čakajo na rešitve veliko, saj je nanotehnologija v računalništvu razmeroma mlada veda. Če se bodo rešili tehnološki problemi, lahko nove strukture res predstavljajo revolucijo računalniškega dožemanja sveta.

7. LITERATURA IN VIRI

- [1] T. Cole, John C. Luth, *Quantum-dot cellular automata*, Progress in Quantum Electronics, 25, 165 -189, Elsevier Science Ltd., 2001
- [2] Craig S.Lent, *Bypassing the Transistor Paradigm*, Science, 288, 1597-1599, 2000
- [3] Konrad Walus, Timothy J. Dysart, Graham A. Jullien, Arief R. Budiman, *QCADesigner: A Rapid Design and Simulation Tool for Quantum-Dot Cellular Automata*, IEEE Transactions on Nanotechnology, 3(1), 26-31, 2004
- [4] Craig S. Lent, P. Douglas Tougaw, *A Device Architecture for Computing with Quantum Dots*, Proceedings of the IEEE, 85(4), 541-557, 1997
- [5] John C. Luth, Brandon Dixon, *A characterization of important algorithms for quantum-dot cellular automata*, Journal of Information Sciences, 113, 193-204, Elsevier Science Ltd., 1999
- [6] Craig S, Lent, P. Douglas Tougaw, Wolfgang Porod, Gary H. Bernstein, *Quantum Cellular Automata*, Nanotechnology, 4(1), 49-57, 1993
- [7] Wolfgang Porod, *Quantum-dot Devices and Quantum-dot Cellular Automata*, J. Franklin Ins., 334B(5/6), 1147-1175, Elsevier Science Ltd., 1997
- [8] Charles P. Poole Jr., Frank J. Owens, *Introduction to Nanotechnology*, 1-8, 226-256, John Wiley & Sons Inc., 2003, ISBN 0-471-07935-9
- [9] Gennady P. Berman, Gary D. Doolen, Ronnie Manieri, Vladimir I. Tsifrinovich, *Introduction to Quantum Computers*, World Scientific, 1998, ISBN 981-02-3490-2
- [10] Susumu Adachi, Yoshimasa Isawa, *Cell design and dynamics of quantum cellular automata*, Solid-State Electronics, 42(7/8), 1361-1366, 1998
- [11] Moshe Sipper, *Evolution of Parallel Cellular Machines*, Springer, 1997, ISBN 3-540-62613-1
- [12] Nikolaj I. Koškin, Mihail G. Širkevič, *Priročnik elementarne fizike*, Tehniška založba Slovenije, 1990, ISBN 86-365-0065-6
- [13] Iztok Lebar Bajec, *Magistrska naloga, Računalniški model letenja ptic v jati*, 27-33, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, 2002
- [14] Craig S. Lent, P. Douglas Tougaw, Wolfgang Porod, *Quantum Cellular Automata: The Physics of Computing with Arrays of Quantum Dot Molecules*, Proceedings Workshop on Physics and Computation PhysComp '94, 5-13, 1994

- [15] Michael T. Niemier, Peter M. Kogge, *Architectural Issues and Possibilities in Quantum Cellular Automata (QCA)*, University of Notre Dame, www.nd.edu/~qcahome/reprints/Niemier3.pdf
- [16] Michael T. Niemier, Peter M. Kogge, *Logic in Wire: Using Quantum Dots to Implement Really Dense Processing Logic*, Proceeding of the Third Petaflops Workshop associated with Frontiers of Massively Parallel Processing, Annapolis, Md, 1999
- [17] P. Douglas Tougaw, Craig S. Lent, *Dynamic Behavior of Quantum Cellular Automata*, Journal of Applied Physics, 80(8), 4722-4736, 1996
- [18] C. Emmenche, *The garden in the machine: The emerging science of artificial life*, Princeton Scientific Library, 1994

8. ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so kakorkoli pomagali pri nastajanju diplomskega dela: mentorju doc. dr. Mihi Mrazu za strokovno vodenje in koristne nasvete, prof. dr. Nikolaju Zimicu za konstruktivne napotke, zaposlenim v Laboratoriju za računalniške strukture in sisteme, še posebej mag. Iztoku Lebar-Bajcu in mag. Damjanu Oseliju za nesebično pomoč ter prijateljema Tomažu Oraču in Vladimirju Kocjančiču.

Zahvalil bi se tudi staršema za finančno in moralno podporo v času študija.

Nenazadnje hvala tudi tebi Alenka za pomoč, potrpljenje in podporo.

9. IZJAVA

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Mihe Mraza. Sodelavce, ki so mi pri diplomskem delu pomagali, sem v celoti navedel v zahvali.