

Optične in nanotehnologije
2. seminarska naloga

Testiranje delovanja struktur realiziranih s
trojiškimi kvantnimi celičnimi avtomati



Avtorji: Darko Božič, Ivan Krajačič, Anže Cesar in Dejan Sakelšak
Mentor: Primož Pečar

Ljubljana, Januar 2011

Kazalo

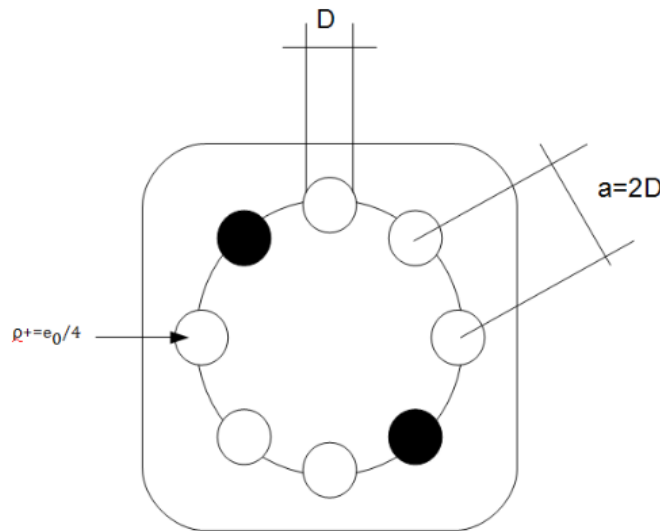
1	Uvod.....	2
2	Maksimalna dolžina linije	3
3	Obnašanje kotne linije.....	4
4	Obnašanje fan-out linije	5
5	Majoritetna vrata	7
5.1	Majoritetna vrata "križ"	8
5.2	Majoritetna vrata "X"	10
6	Obnašanje karakterističnih funkcij.....	12
7	Ciklična negacija	19
8	Zaključek.....	21
9	Viri.....	22

1 Uvod

Cilj seminarske naloge je preveriti delovanje tipičnih tQCA struktur na podlagi nove geometrije celice, ker so se dosedanje rešitve izkazale za delujoče vendar imajo določene omejitve.

Osnovna tQCA celica je sestavljena iz osmih kvantnih pik, velikost vsake kvantne pike je $D=10\text{nm}$. Oddaljenost med dvema sosednjima kvantnima pikama je $a = 2D$.

Posamezne pike so postavljene v krogu z radijem $R = \frac{D}{\sin(\frac{\pi}{8})}$ vsaka pika ima naboj $\rho^+ = e_0/4$, kjer e_0 predstavlja osnovni naboj.



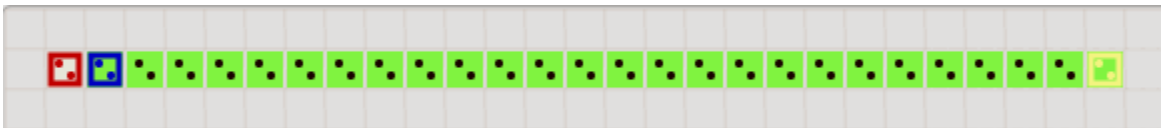
Slika 1.1: Osnovna podoba tQCA celice

Predlagana nova geometrija celice, ki smo jo testirali, ohranja razmerje med količino naboja in oddaljenosti med dvema sosednjima kvantnima pikama. Tako smo imeli simulacijske parametre tQCA celice nastavljeni na $a=13.333\text{nm}$ in $R=17.4208\text{nm}$. To pomeni, da smo kvantne pike približali še bolj skupaj proti središču celice, kot pri osnovni tQCA celici.

Sedaj je bil naš cilj poiskati najbolj ugodno oddaljenost med celicami, kjer bi osnovne strukture delovale čimbolj pravilno in zanesljivo. Testi, ki smo jih izvajali, so potekali na oddaljenostih med 72nm in 160nm v določenih primerih tudi do 200nm .

2 Maksimalna dolžina linije

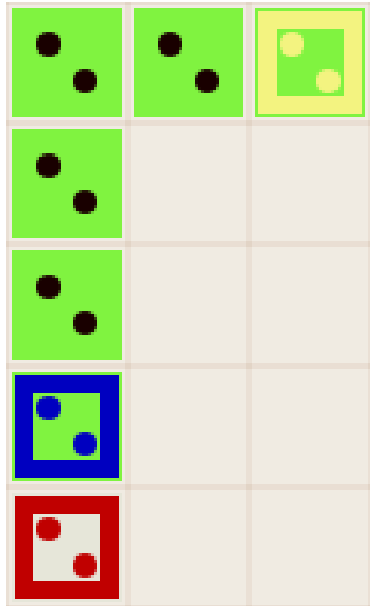
Testirali smo na kateri oddaljenosti med dvema celicama linija deluje in njeno največjo dolžino, ki jo zmore gnati ena vhodna celica ali gonilnik. Ugotovili smo, da so primerne oddaljenosti med 104nm in 111nm. Maksimalna ugotovljena dolžina linije, ki jo je pri 109nm oddaljenosti med sosednjima celicama še gnal gonilnik je 25 celic. Pod to štejemo interne celice in izhodno celico. Z upoštevanjem izsledkov testov drugih struktur, predpostavljamo, da je najugodnejša horizontalna oddaljenostjo med dvema celicama 109nm.



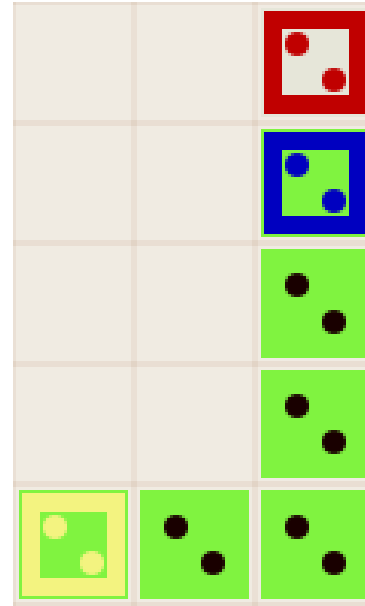
Slika 2.1: Linija maksimalne dolžine 25 celic, ki jih poganja ena vhodna celica

3 Obnašanje kotne linije

Pri izvedbi kotne linije je bilo potrebno ugotoviti ali je možno kotno linijo izvesti v isti urini fazi. Po več testih, pri razdaljah od 72nm pa do 120nm se je izkazalo, da je možno izvesti kotno linijo v eni urini fazi pri minimalni razdalji 107nm. Velikost kotne linije je 3x3 celice, kar prikazujeta sliki 3.1 in 3.2.



Slika 3.1: Kotna linija velikosti 3x3, desni kot. Opazujemo samo notranje celice in izhodno celico (zeleno in rumeno barva)



Slika 3.2: Kotna linija velikosti 3x3, levi kot. Opazujemo samo notranje celice in izhodno celico (zeleno in rumeno barva).

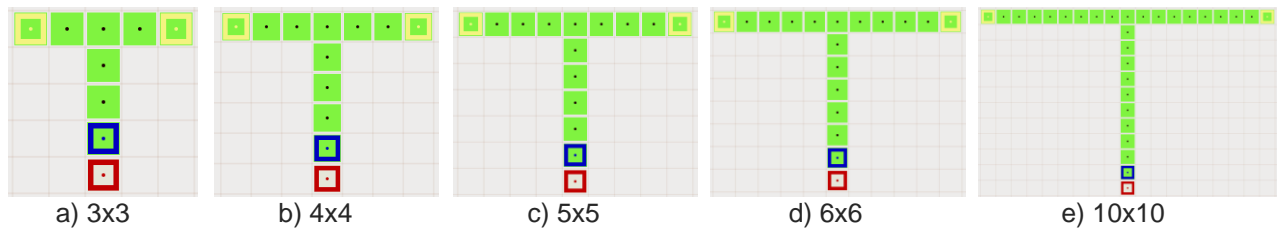
Če se je število celic povečalo na vertikalni ali na horizontalni povezavi, linija ni delovala pravilno, ne glede na to kako smo obrnili kotno linijo.

Sprememba dolžine vertikalne povezave je povzročila težave s prenosom stanja B. Povečanje števila celic na horizontalni povezavi je povzročilo težave s prenosom stanja A. Stanji C in D sta se vedno pravilno prenesli po liniji ne glede na podaljšanja linije.

Uporaba več urinih faz pripomore k stabilnosti delovanja kotne linije tudi pri veliko manjših oddaljenostih med celicami, kar omogoča možnost daljših linij.

4 Obnašanje fan-out linije

Simulacija fan-out linije je bila opravljena v isti in z dvema urinima fazama pri odmikih od 72nm do 160nm. Pri rešitvi z isto urino fazo, je bila najdaljša možna linija, ki je še pravilno delovala, 8x8 celic. Težava pri tej velikosti je, da deluje samo pri zelo velikih oddaljenostih med celicami, pa še ta interval delovanja (145nm-150nm) je zelo ozek - 6nm. Dobljene podatke je možno videti v tabeli 4.1. Izkaže se, da je najzanesljivejša maksimalna velikost fan-out linije 5x5, ki ima interval delovanja zelo širok in je v intervalu delovanja večine ostalih logičnih struktur.

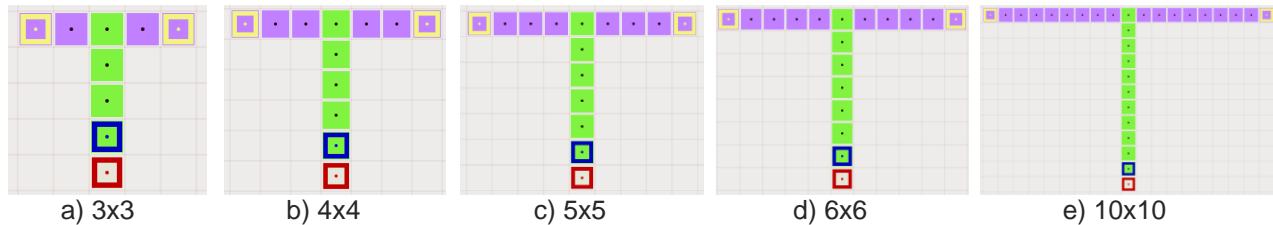


Slika 4.1: Fan-out linije v isti urini fazi uporabljene v testih.

Velikost	Interval delovanja [nm]	Št. urinih faz
3x3	87-160	1
4x4	87-150	1
5x5	88-150	1
6x6	129-150	1
8x8	145-150	1
9x9	145-150 (invertirana C in D)	1
10x10	-	1

Tabela 4.1: Rezultati testov fan-out linije v isti urini fazi

Fan-out linije z dvema urinima fazama se izkažejo za stabilnejše, saj še pri velikosti 15x15 stabilno delujejo na dokaj širokem intervalu. Težava več urinih faz je v zakasnitvi signala po liniji. Tabela 4.2 vsebuje rezultate testiranja vseh 9 kombinacij.



Slika 4.2: Fan-out linija v dveh urinih fazah uporabljene v testih

Pri oddaljenostih, ki presegajo zgornjo mejo intervala delovanja, za vsako kombinacijo in pri oddaljenostih manjših od spodnje meje intervala delovanja se določene izhodne vrednosti spremenijo v C ali D, oziroma ostanejo nedefinirane, torej N. Interval delovanja za test velikosti 20x20, pa je nekako sumljiv, saj glede na prejšnje izide ne ustreza vzorcu, poleg tega, pa je interval preozek, da bi bil vreden zaupanja.

Velikost	Interval delovanja [nm]	Št. urinih faz
3x3	72-146	2
4x4	72-148	2
5x5	80-150	2
6x6	81-150	2
10x10	82-150	2
12x12	105-150	2
15x15	105-150	2
20x20	106-109	2
30x30	-	2

Tabela 4.2: Rezultati testov fan-out linije v dveh urinih fazah

5 Majoritetna vrata

Preverili smo delovanje majoritetnih vrat "križ" in "X". To smo storili na dva načina:

- gonilniki niso sestavni del majoritetnih vrat, kar prikazuje slika 5.1,
- gonilniki so sestavni del majoritetnih vrat, kar prikazuje slika 5.2.

Preverili smo tudi delovanje za različne kombinacije urinih faz, kot je to prikazano in razloženo v nadaljevanju. Testirali smo na razdaljah med 60nm in 160nm.

SX_1X_2	Y	SX_1X_2	Y	SX_1X_2	Y	SX_1X_2	Y
AAA	A	BAA	A	CAA	A	DAA	A
AAC	A	BAC	C	CAC	C	DAC	A
AAD	A	BAD	D	CAD	A	DAD	D
AAB	A	BAB	B	CAB	C	DAB	D
ACA	A	BCA	C	CCA	C	DCA	A
ACC	C	BCC	C	CCC	C	DCC	C
ACD	A	BCD	B	CCD	C	DCD	D
ACB	C	BCB	B	CCB	C	DCB	B
ADA	A	BDA	D	CDA	A	DDA	D
ADC	A	BDC	B	CDC	C	DDC	D
ADD	D	BDD	D	CDD	D	DDD	D
ADB	D	BDB	B	CDB	B	DDB	D
ABA	A	BBA	B	CBA	C	DBA	D
ABC	C	BBC	B	CBC	C	DBC	B
ABD	D	BBD	B	CBD	B	DBD	D
ABB	B	BBB	B	CBB	B	DBB	B

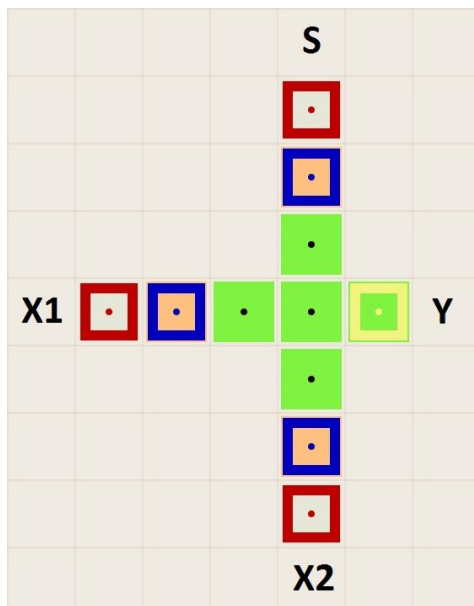
Tabela 5.1: Pravilnostna tabela majoritetnih vrat

V tabeli 5.1 rdeče pobarvana izhodna stanja predstavljajo napačno stanje izhodne celice, to se zgodi samo takrat ko se na obeh vhodih istočasno pojavita stanji C in D. Ker pa stanje D po pravilu ni dovoljeno, kot veljavno vhodno stanje, lahko kombinacije v katerih nastopa stanje D zanemarimo.

5.1 Majoritetna vrata “križ”

Test je vseboval:

- vse celice v isti urini fazi z dodatno celico in gonilniki v lastni urini fazi, kot prikazuje slika 5.1. Simulacija je pokazala, da vrata ne delujejo pravilno.
- vse celice v isti urini fazi, gonilniki so vhodi v majoritetna vrata, kot prikazuje slika 5.2. Izkazalo se je, da vrata delujejo če na izhodu dodamo še eno celico pri oddaljenostih med celicami 118nm - 160nm. Če ne uporabimo dodatne celice na izhodu se stanji C in D zamenjata.

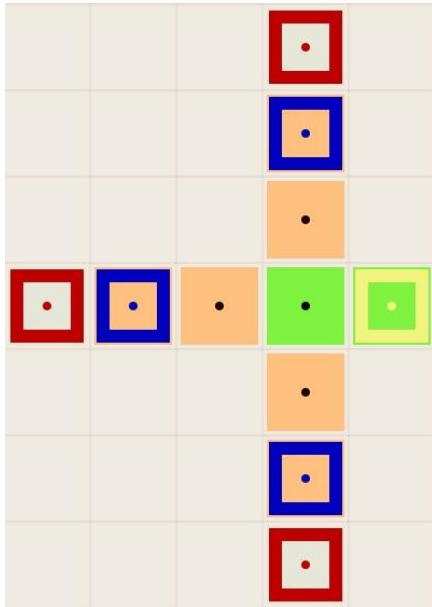


Slika 5.1: Vse celice v isti urini fazi, gonilniki v lastni urini fazi

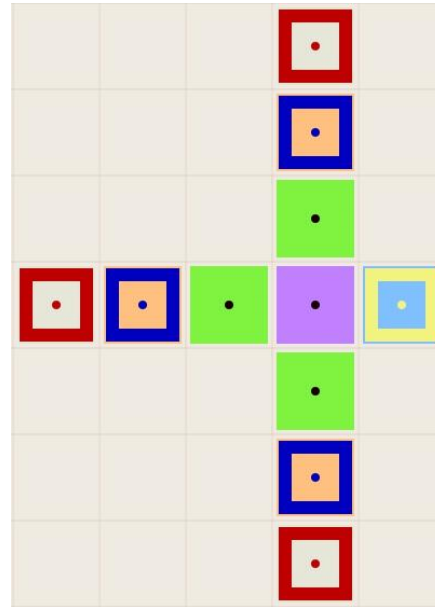


Slika 5.2: Vse celice v isti urini fazi, gonilniki so vhodi v majoritetna vrata

- gonilniki in vhodi v majoritetna vrata so v isti urini fazi, kot prikazuje slika 5.3. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 94nm - 160nm.
- srednja in izhodna celica v lastni urini fazi, gonilniki v lastni urini fazi, kot prikazuje slika 5.4. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 70nm - 160nm.

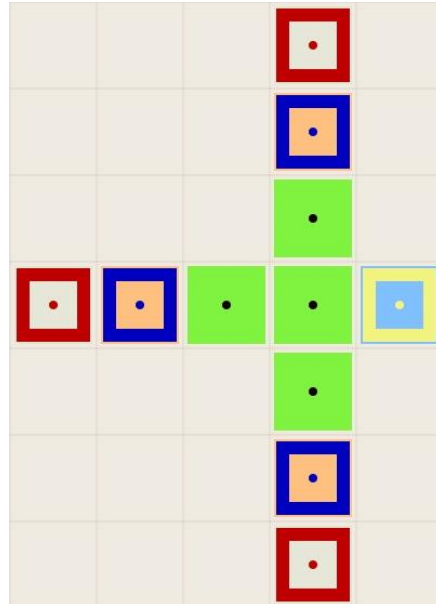


Slika 5.3: Gonilniki in vhodi v isti urini fazi



Slika 5.4: Srednja in izhodna celica v lastni urini fazi, gonilniki v lastni urini fazi

- izhodna celica in gonilniki v lastni urini fazi, kot prikazuje slika 5.5. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 112nm - 160nm.

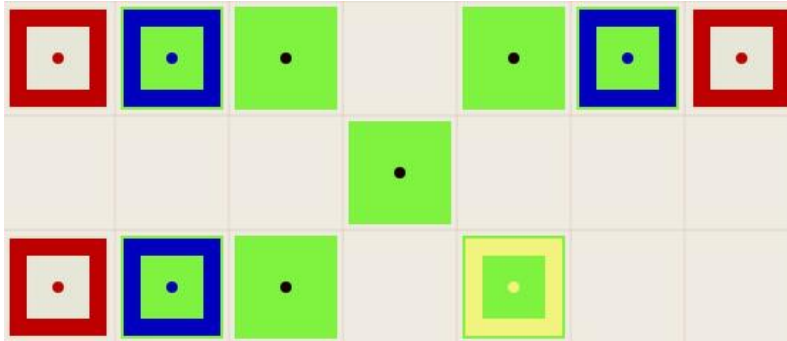


Slika 5.5: Izhodna celica ter gonilniki v lastni urini fazi

5.2 Majoritetna vrata "X"

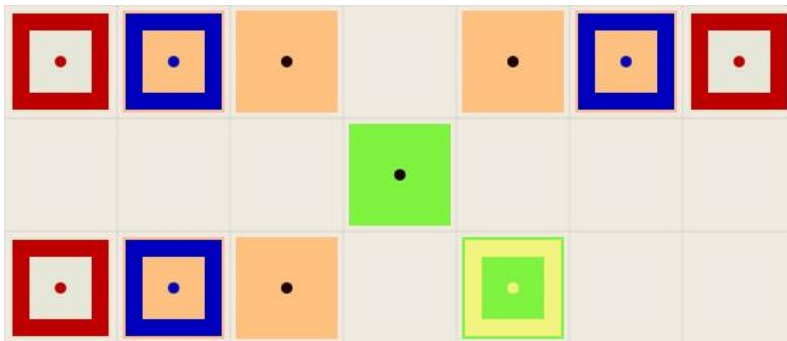
Test je vseboval:

- vse celice so v isti urini fazi, kot prikazuje slika 5.6. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 139nm - 160nm.



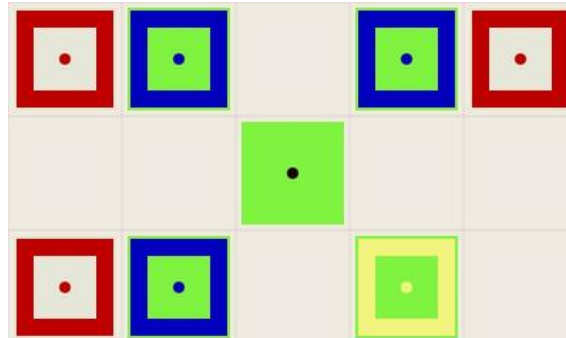
Slika 5.6: Vse celice v isti urini fazi

- gonilniki in vhodi v majoritetna vrata so v isti urini fazi, kot prikazuje slika 5.7. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 140nm - 160nm.



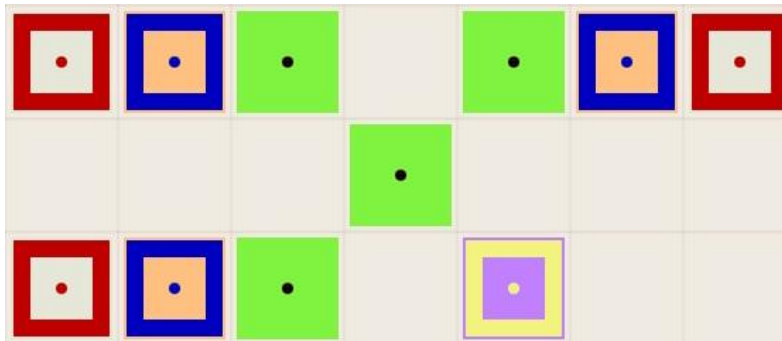
Slika 5.7: Gonilniki in vhodi v isti urini fazi

- vse celice so v isti urini fazi, gonilniki so vhodi v majoritetna vrata, kot prikazuje slika 5.8. Izkazalo se je, da delujejo če na izhodu dodamo še eno celico, drugače se med seboj zamenjata stanji C in D, pri oddaljenostih med 65nm - 160nm.



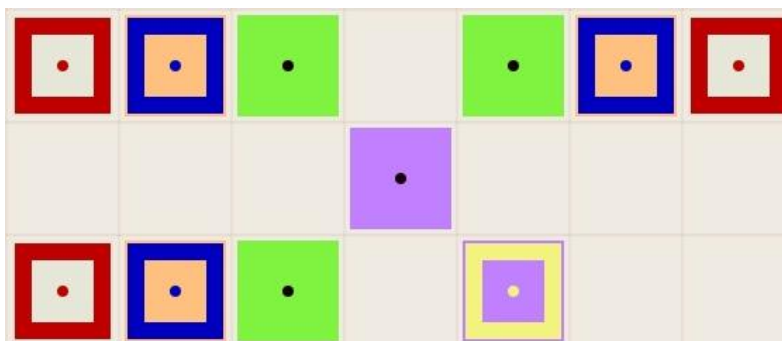
Slika 5.8: Vse celice v isti urini fazi, gonilniki so vhodi

- izhodna celica v lastni urini fazi, gonilniki v lastni urini fazi, kot prikazuje slika 5.9. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 60nm - 160nm.



Slika 5.9: Gonilniki in izhodna celica v lastni urini fazi

- srednja in izhodna celica v isti urini fazi, gonilniki v lastni urini fazi, kot prikazuje slika 10. Izkazalo se je, da delujejo pri oddaljenostih med 66nm - 160nm.



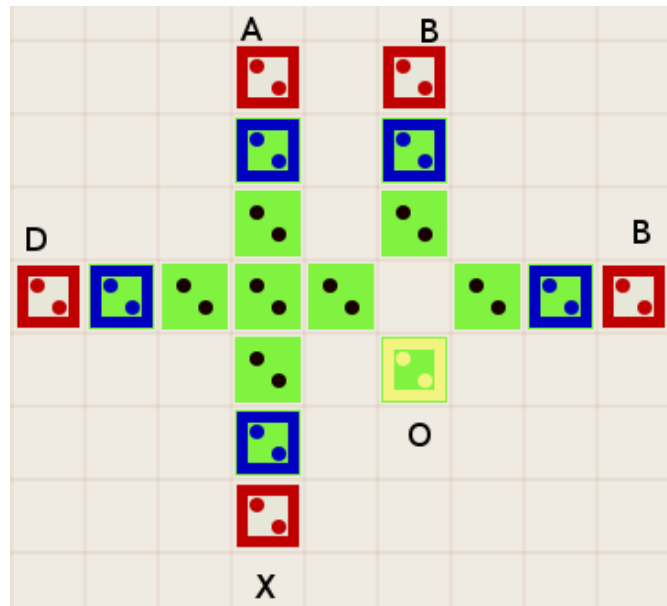
Slika 5.10: Srednja in izhodna celica v isti urini fazi

6 Obnašanje karakterističnih funkcij

Karakteristični funkciji, ki sta prikazani na sliki 6.1 in 6.2 ne delujeta pravilno. Težava se pojavi že pri karakteristični funkciji f^A saj njeno delovanje ni pravilno. Funkcija f^B ne deluje prav tako, saj je v bistvu enaka kot f^A , samo da ima na vhodu negirane vhodne kombinacije. Ker pa je tudi f^A osnova za karakteristično funkcijo f^C , tudi ta posledično ne deluje pravilno.



Slika 6.1: Karakteristična funkcija f^A . Zelene celice in rumena celica predstavljajo funkcijo f^A



Slika 6.2: Karakteristična funkcija f^C . Zelene celice in rumena celica predstavljajo funkcijo f^C .

V tabeli 6.1 so prikazani rezultati simulacije in pričakovani rezultati karakteristične funkcije f^A . Razvidno je, da se težava pojavlja v stanju C, kjer na izhodu dobimo nespremenjen vhod. Naslednji korak je preveriti vse možne kombinacije na vhodu in ugotoviti ali obstaja taka vhodna kombinacija, kjer bi lahko dobili pričakovani izhod. Kot se izkaže po več testih na različnih oddaljenostih med celicami, ne dobimo ustreznih rezultatov. V tabeli 6.2 so podani pričakovani in simulirani rezultati za vse možne vhodne kombinacije.

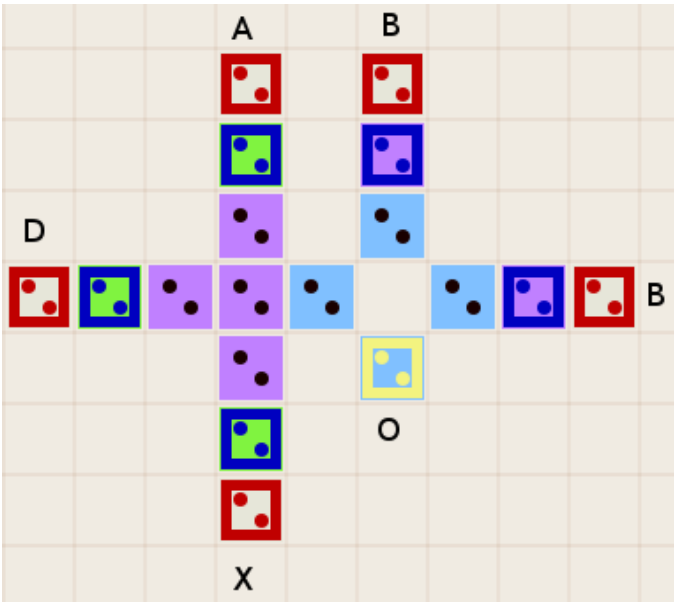
X	F^A O (simulacija)	F^A O (pričakovana)
A	B	B
B	A	A
C	C	A
D	A	A

Tabela 6.1: Pričakovani in simulacijski rezultati za karakteristično funkcijo F^A

$X_1X_2X_3$	$F^A O$ (simulacija)	$F^A O$ (pričakovano)	$X_1X_2X_3$	$F^A O$ (simulacija)	$F^A O$ (pričakovano)
AAA	B	B	CAA	C	B
AAB	D	D	CAB	A	A
AAC	B	B	CAC	C	C
AAD	D	B	CAD	A	A
ABA	B	B	CBA	B	B
ABB	D	D	CBB	A	A
ABC	B	B	CBC	C	C
ABD	B	B	CBD	N	B
ACA	B	B	CCA	B	B
ACB	D	D	CCB	A	A
ACC	B	B	CCC	C	C
ACD	D	B	CCD	A	D
ADA	B	B	CDA	C	B
ADB	D	C	CDB	A	A
ADC	B	B	CDC	C	C
ADD	B	B	CDD	A	C
BAA	A	A	DAA	B	B
BAB	A	A	DAB	A	A
BAC	A	A	DAC	N	A
BAD	A	A	DAD	D	D
BBA	B	B	DBA	B	B
BBB	A	A	DBB	D	A
BBC	C	A	DBC	B	B
BBD	A	A	DBD	D	D
BCA	N	A	DCA	B	B
BCB	A	A	DCB	D	A
BCC	A	A	DCC	B	D
BCD	A	A	DCD	D	D
BDA	C	A	DDA	B	B
BDB	A	A	DDB	A	A
BDC	C	A	DDC	B	C
BDD	A	A	DDD	D	D

 Tabela 6.2: Rezultati simulacije karakteristične funkcije F^A

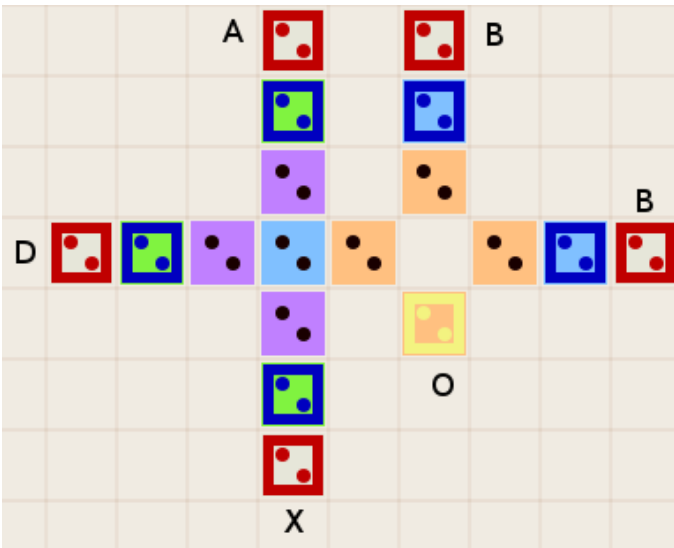
Karakteristična funkcija f^C se prav tako ne obnaša po pričakovanjih. Testi so bili opravljeni tudi tako, da so bile celice v različnih urinih fazah, kar ni pripomoglo k boljšemu rezultatu. Na sliki 6.3 in 6.4 vidimo kako so bile urejene zakasnitve pri izvajanju simulacije.



Slika 6.3: Karakteristična funkcija f^C – zakasnitve

X	$f^C O$ (simulacija)	$f^C O$ (pričakovano)
A	C	A
B	A	A
C	B	B
D	A	A

Tabela 6.3: Rezultati simulacije za sliko 6.3



Slika 6.4: Karakteristična funkcija f^C – zakasnitve

X	$f^C O$ (simulacija)	$f^C O$ (pričakovano)
A	C	A
B	A	A
C	C	B
D	A	A

Tabela 6.4: Rezultati simulacije za sliko 6.4

X	$f^C O$ (simulacija)	$f^C O$ (pričakovano)
A	A	A
B	A	A
C	N	B
D	A	A

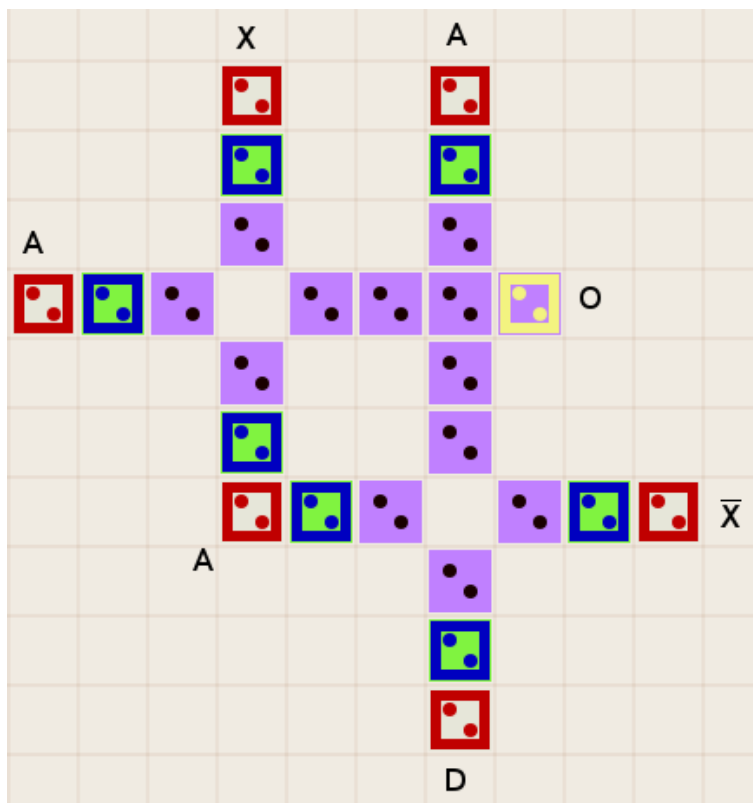
Tabela 6.5: Rezultati simulacije za sliko 6.2

Zanimiv rezultat se pojavi, če oddaljenost iz testnih 109nm povečamo na 120nm. Pri tej oddaljenosti dobimo želeni rezultat vendar je verjetnost stanja B zelo majhna. Rezultate simulacije pri 120nm vidimo v tabeli 6.6.

V tem razdelku je bila realizirana tudi ciklična negacija, ki jo vidimo na sliki 6.5. Njeno delovanje prav tako ni pravilno, tudi če uporabimo različne zakasnitve v celicah.

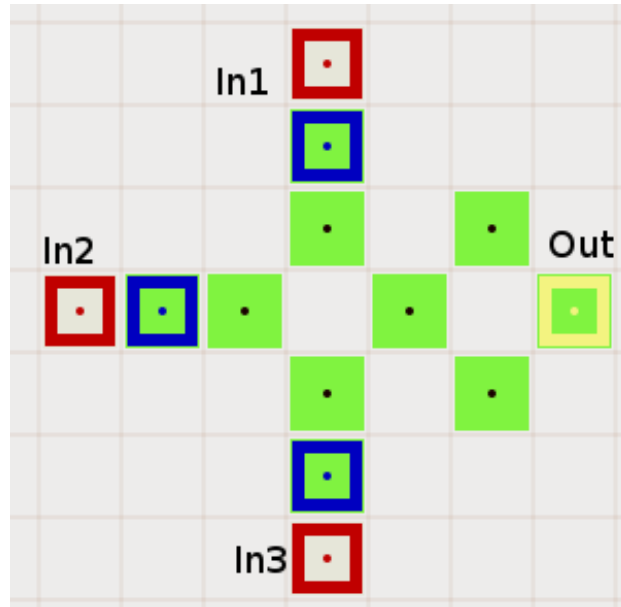
X	f ^c O (simulacija)	f ^c O (pričakovano)
A	A (p=0.99)	A
B	A (p=0.997)	A
C	B (p=0.718)	B
D	A (p=0.99)	A

Tabela 6.6: Rezultat simulacije za sliko 6.2 pri oddaljenosti med celicami 120nm



Slika 6.5: Ciklična negacija

Obnašanje karakteristične funkcije Cf, ki je prikazana na sliki 6.6, da na oddaljenostih med 72nm - 148nm pravilen izhod, kot je to prikazano v tabeli 6.7. Pri oddaljenostih večjih kot 148, pa se začne izhod obnašati nepredvidljivo.

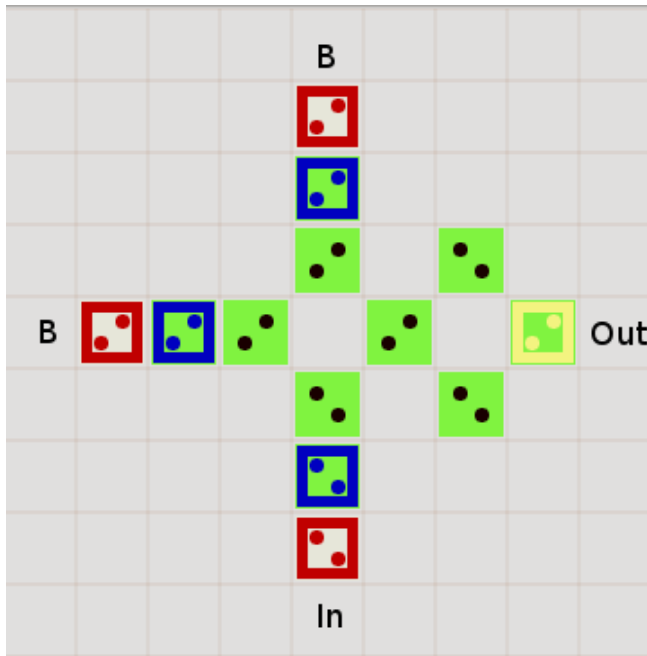


Slika 6.6: Karakteristična funkcija Cf

In ₁ In ₂ In ₃	Izhod	In ₁ In ₂ In ₃	Izhod	In ₁ In ₂ In ₃	Izhod	In ₁ In ₂ In ₃	Izhod
AAA	B	BAA	A	CAA	B	DAA	B
AAB	B	BAB	B	CAB	B	DAB	B
AAC	B	BAC	D	CAC	B	DAC	B
AAD	B	BAD	C	CAD	B	DAD	B
ABA	A	BBA	A	CBA	A	DBA	A
ABB	B	BBB	A	CBB	A	DBB	A
ABC	D	BBC	A	CBC	A	DBC	A
ABD	C	BBD	A	CBD	A	DBD	A
ACA	B	BCA	A	CCA	C	DCA	A
ACB	B	BCB	A	CCB	C	DCB	A
ACC	B	BCC	A	CCC	C	DCC	A
ACD	B	BCD	A	CCD	C	DCD	A
ADA	B	BDA	A	CDA	B	DDA	D
ADB	B	BDB	A	CDB	B	DDB	D
ADC	B	BDC	A	CDC	B	DDC	D
ADD	B	BDD	A	CDD	B	DDD	D

Tabela 6.7: Vhodni vektorji in izhodne karakteristike funkcije Cf

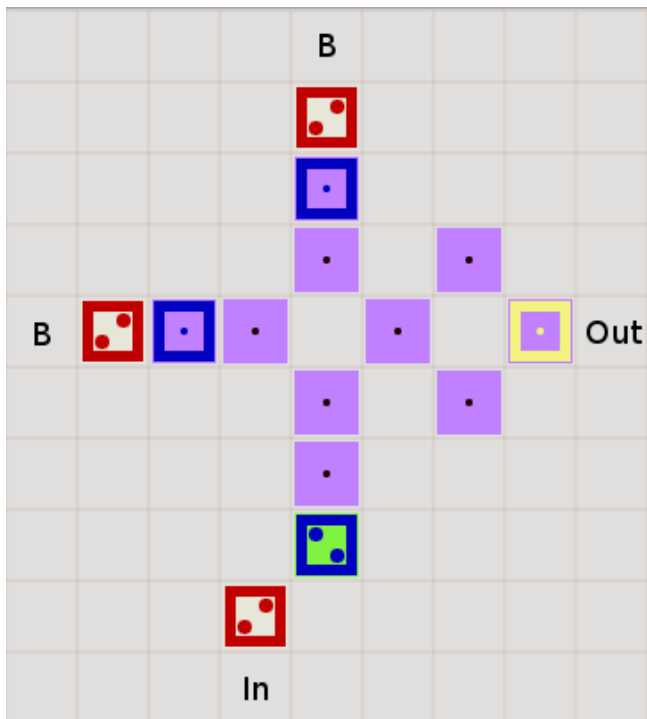
Karakteristične funkcije, prikazane na slika 6.7, 6.8, 6.9 in 6.10 delujejo pri vseh oddaljenostih med 72nm - 160nm.



Slika 6.7: Karakteristična funkcija f^A

In	Out (Pričakovan)	Out (Izmerjen)
A	B	B
B	A	A
C	A	A
D	A	A

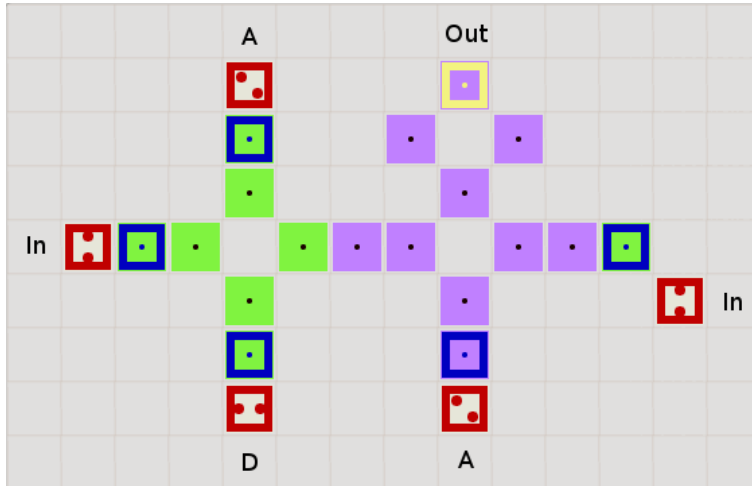
Tabela 6.8: Vhodni in izhodni vektorji funkcije f^A s slike 6.7



Slika 6.8: Karakteristična funkcija f^B

In	Out (Pričakovan)	Out (Izmerjen)
A	A	A
B	B	B
C	A	A
D	A	A

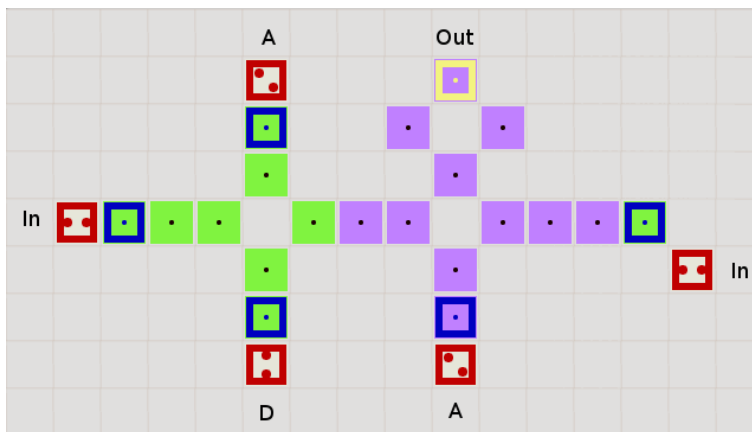
Tabela 6.9: Vhodni in izhodni vektorji funkcije f^B s slike 6.8



Slika 6.9: Karakteristična funkcija f^C

In	Out (Pričakovan)	Out (Izmerjen)
A	A	A
B	A	A
C	B	B
D	A	A

Tabela 6.10: Vhodni in izhodni vektorji funkcije f^C s slike 6.9



Slika 6.10: Karakteristična funkcija f^D

In	Out (Pričakovan)	Out (Izmerjen)
A	A	A
B	A	A
C	A	A
D	B	B

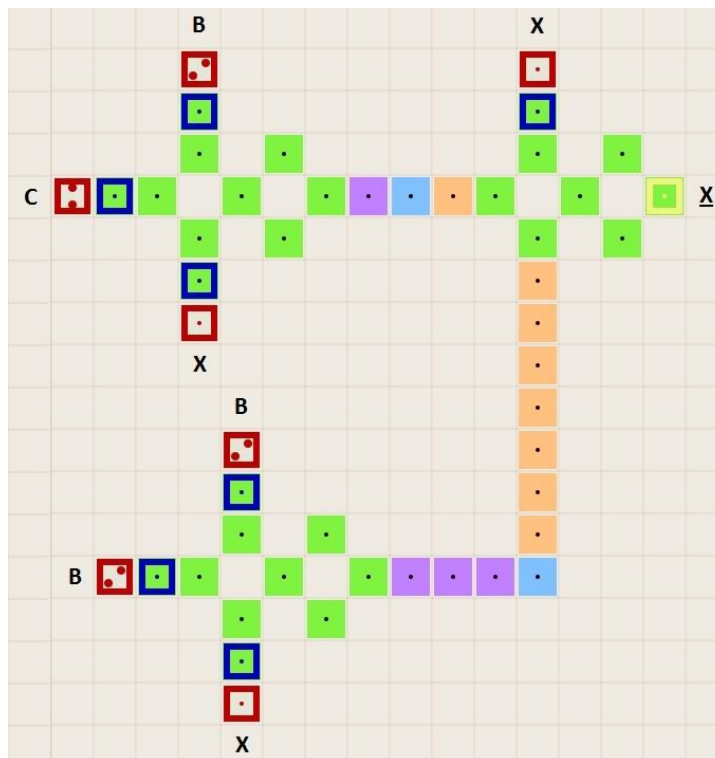
Tabela 6.11: Vhodni in izhodni vektorji funkcije f^D s slike 6.10

7 Ciklična negacija

Cilj je pokazati, da ciklična negacija deluje, kot je to prikazano v tabeli 7.1. Pri testiranju smo vertikalno linijo podaljšali za 4 celice, v nasprotnem primeru bi bile elektrode zelo skupaj, kar bi lahko vplivalo na samo delovanje strukture. Kot je prikazano na sliki 7.1 smo pri prvem načinu dali gonilnike v isto urino fazo. Izkazalo se je, da struktura deluje pri oddaljenostih med 109nm - 160nm.

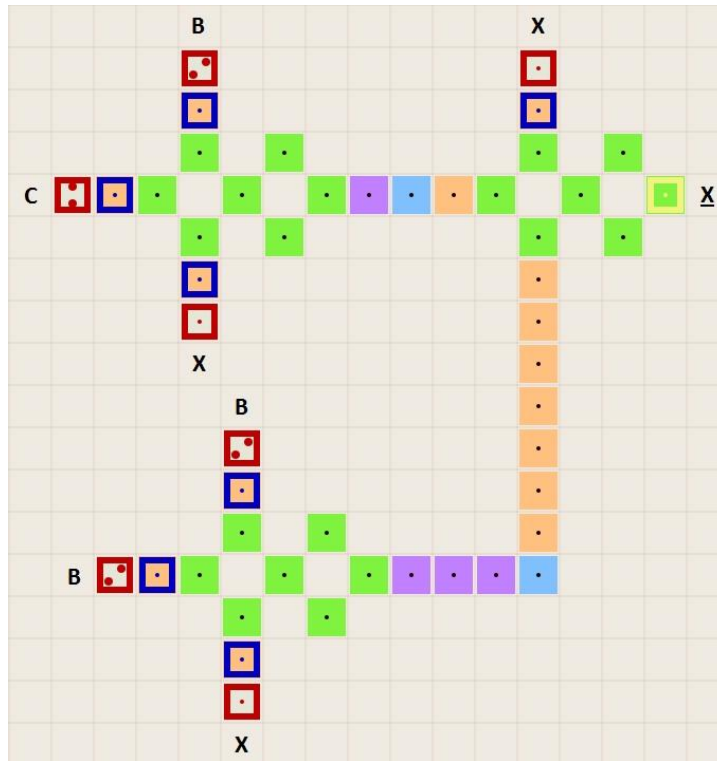
Vhod X	A	B	C
Izhodna stanja \underline{X}	C	A	B

Tabela 7.1: Pravilnostna tabela ciklične negacije



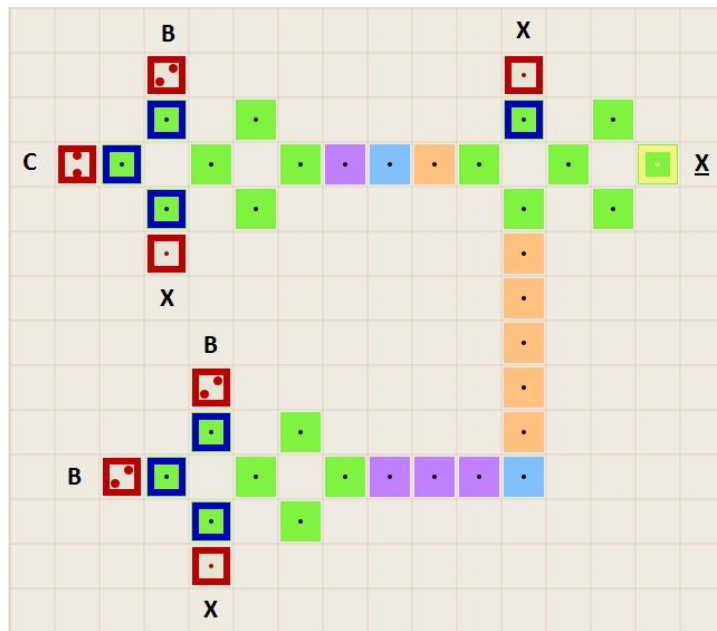
Slika 7.1: Ciklična negacija s podaljšano vertikalno linijo, gonilniki v isti urini fazi

Pri drugem načinu testiranja, kot prikazuje slika 7.2, smo dali gonilnike v lastno urino fazo. Izkazalo se je, da struktura ne deluje pri oddaljenostih med 70nm - 200nm.



Slika 7.2: Ciklična negacija s podaljšano vertikalno linijo, gonilniki v lastni urini fazi

Testirali smo tudi ko so gonilniki vhodi v strukturo, kot prikazuje slika 7.3, vendar se je izkazalo, da struktura ne deluje pri oddaljenostih med 70nm - 200nm.



Slika 7.3: Ciklična negacija s podaljšano vertikalno linijo, gonilniki so vhodi v strukturo

8 Zaključek

Po vseh opravljenih simulacijah se je izkazalo, da strukture s predlagano geometrijo najbolje delujejo nekje med 107nm in 110nm. Oddaljenost, ki smo jo uporabili tudi za dokončno simulacijo, je bila 109nm med celicami. Seveda so nekatere strukture delovale tudi na dosti manjših oddaljenostih vendar nekatere niso delovale po pričakovanjih na nobeni od testiranih oddaljenosti.

V primeru, da bi uporabili omenjeno geometrijo za realizacijo vezij, bi to bilo mogoče saj imamo strukture, ki nam omogočajo funkcijsko poln nabor. Funkcijsko poln nabor v trojiški logiki predstavlja:

- majoritetna vrata in ciklična negacija ali
- majoritetna vrata in karakteristične funkcije

Vendar zaradi kompleksne oblike delujoče ciklične negacije in karakterističnih funkcij, se načrtovanje logičnih vezij lahko zelo zaplete. Največje razočaranje so karakteristične funkcije, ki so predstavljene na slikah 6.1 in 6.2, saj so realizirane na zelo preprost način vendar ne delujejo po pričakovanjih.

9 Viri

- The University of British Columbia: [<http://www.mina.ubc.ca/iwqca>]
- Lebar Bajec, M. Mraz, "Towards multi-state based computing using quantum-dot cellular automata", Unconventional Computing 2005: From cellular Automata to Wetware, 105-116, 2005.
- Lebar Bajec, N. Zimic, M. Mraz, "Toward bottom-up concept: extended quantum-dot cellular automata", Microelectronic Engineering, 83(4-9):1826-1829, 2006.
- Lebar Bajec, N. Zimic, M. Mraz, "The ternary quantum-dot cell and ternary logic", Nanotechnology, 17(8):1937-1942, 2006.
- P. Pecar, M. Mraz, N. Zimic, M. Janez, I. Lebar Bajec, "Solving the ternary QCA logic gate problem by means of adiabatic switchnig", Japanese Journal of Applied Physics, 47(6):5000-5006, 2008.
- P. Pecar, A. Ramsak, N. Zimic, M. Mraz, I. Lebar Bajec, "Adibatic pipelining: A key to ternary computing with quantum dots", Nanotechnology, 19(49):495401, 2008.
- M. Janez, I. Lebar Bajec, P. Pecar, A. Jazbec, N. Zimic, M. Mraz, "Automatic Design of Optimal Logic based on ternary Quantum-dot Cellular Automata", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 9(7):919-9289, 2008.
- P. Pečar, M. Janež, N. Zimic, M. Mraz, I. Lebar Bajec, "The ternary quantum-dot cellular automata memorizing cell", Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, 223-228, 2009.