

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,

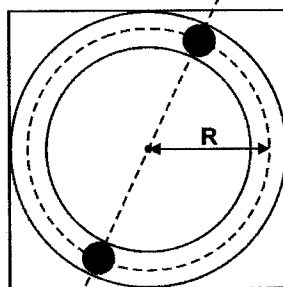
sama celica pa omogoča pomnjenje poljubne zvezne vrednosti podatka neskončno dolgo. Zvezno celico, ki izkorišča kvantne efekte v nadaljevanju imenujemo “zvezna kvantna celica”.

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. Elektronoma ne moreta uiti iz potencialnega kanala, lahko pa se v njem prosto gibljeta.



Slika 27: Zvezna kvantna celica

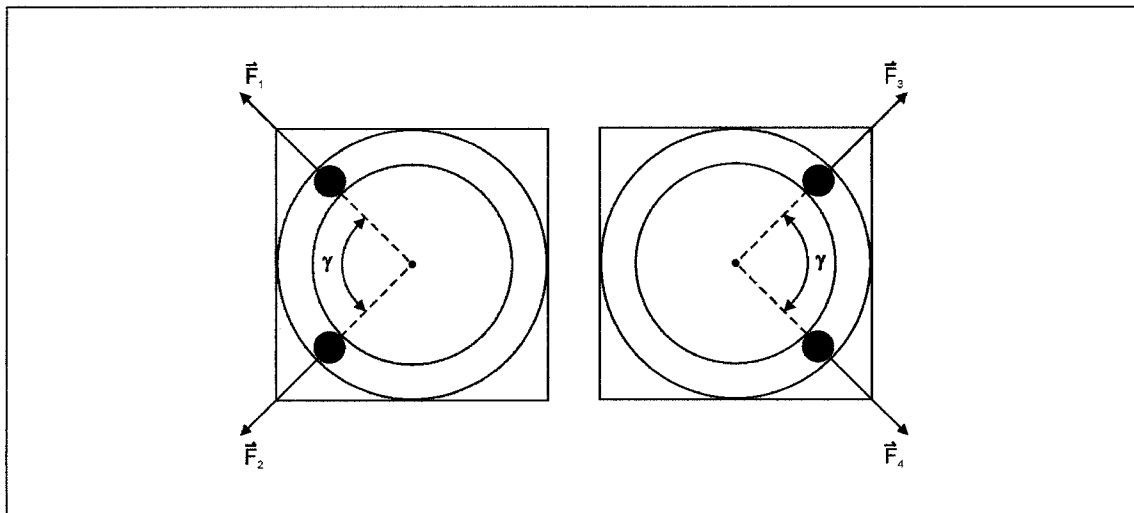
Interakcija med elektronoma v celici temelji na Coulombovi odbojni sili, zaradi katere se elektrona postavita na nasprotni strani premice, ki poteka skozi središče celice. Tako je ostri kot med elektronoma vedno π radianov. Pri tem lahko elektrona zavzameta katerikoli nasprotujoči si poziciji v potencialnem 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.

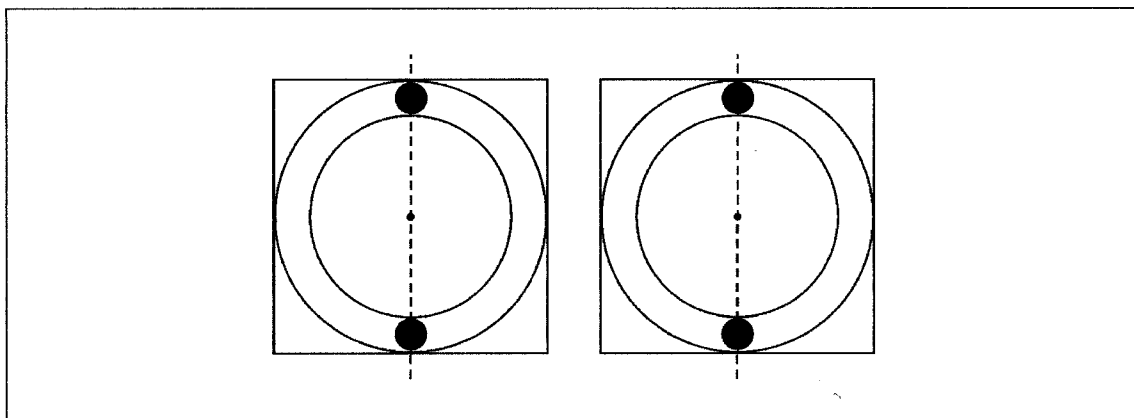
Za posamezno celico smo predpostavili, da nanjo oz. elektrone v njej lahko vpliva le druga zvezna kvantna celica ne pa okolje. Zaradi poenostavitve obravnave smo interakcijo z okoljem in s tem vpliv termodinamičnih efektov popolnoma zanemarili, kar pa ne pomeni da ne obstajajo in vplivajo na samo celico.

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 rezultant sil so prikazani na sliki 28.



Slika 28: Interakcija med prostimi elektroni

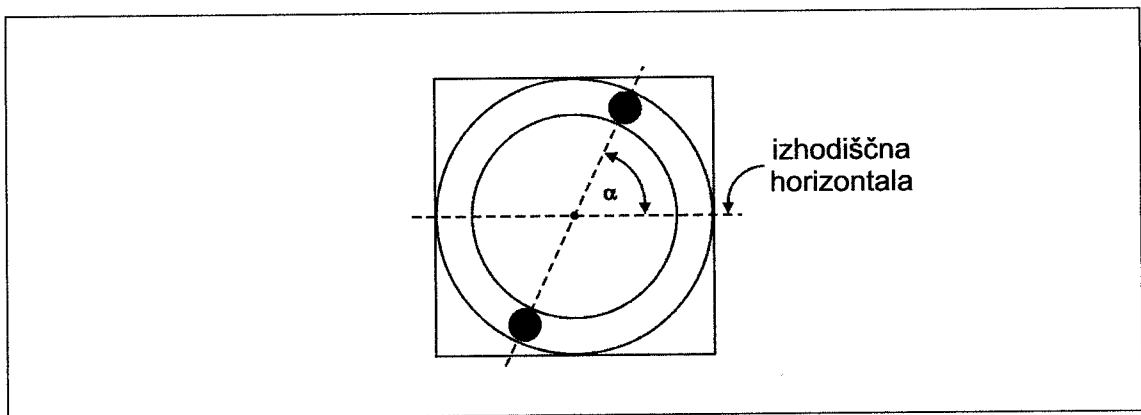
Idealno ravnovesje elektronov, ki bi nam omogočalo linearen prenos informacije iz ene celice na drugo, v primeru interakcije dveh celic je prikazano na sliki 29. Kot γ med elektronoma je π radianov.



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.

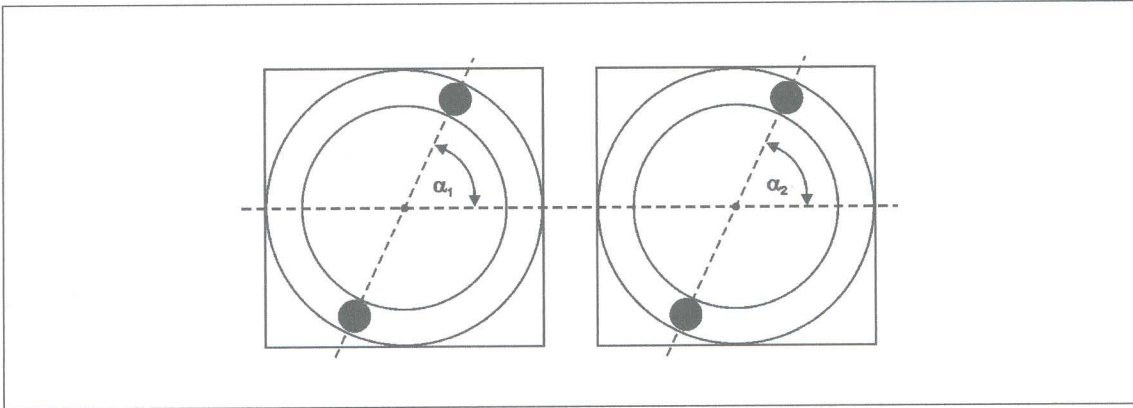
Posledica neželjenega odklona je predpostavka, da elektrona v celici nista popolnoma prosta, temveč vedno zavzemata nasprotujoči si poziciji v potencialnem kanalu in oklepata iztegnjeni kot π radianov. V nadaljevanju ju označujemo kot *vpeta* elektrona. Ker sta sedaj elektrona vedno na nasprotnih straneh 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

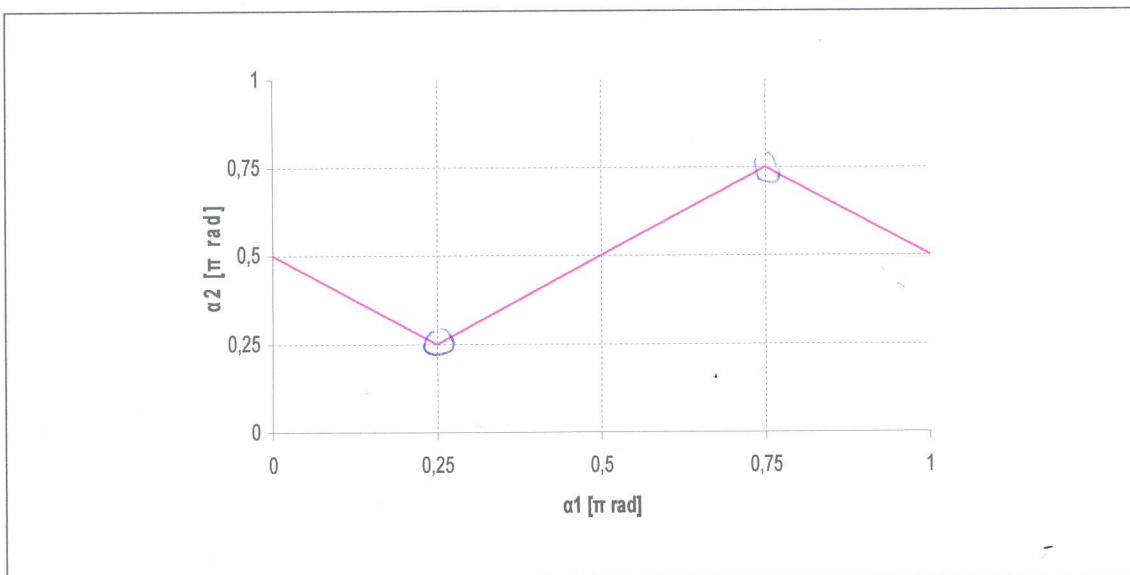
Izvedba brezizgubnega prenosa podatkov oz. signalov po strukturi sestavljeni iz zveznih kvantnih celic zahteva neinvazivno izvedbo vhodov in izhodov, kot je bilo že opisano v poglavju 2.5. Torej gre za upoštevanje načela robno-gnanega procesiranja. Nismo se ukvarjali s samo izvedbo vhoda in izhoda ampak 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. Elektron 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.



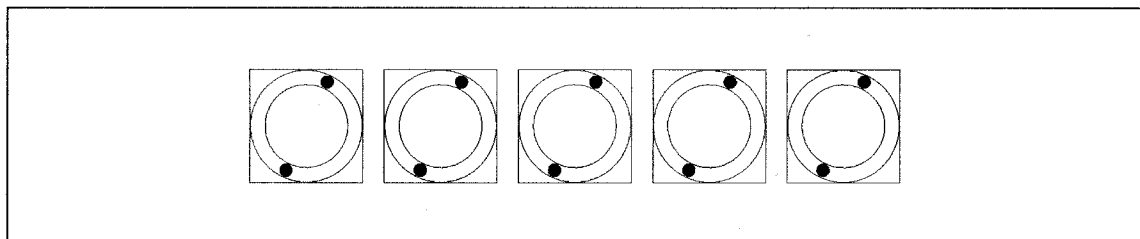
Slika 32: Idealna prevajalna funkcija

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.

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

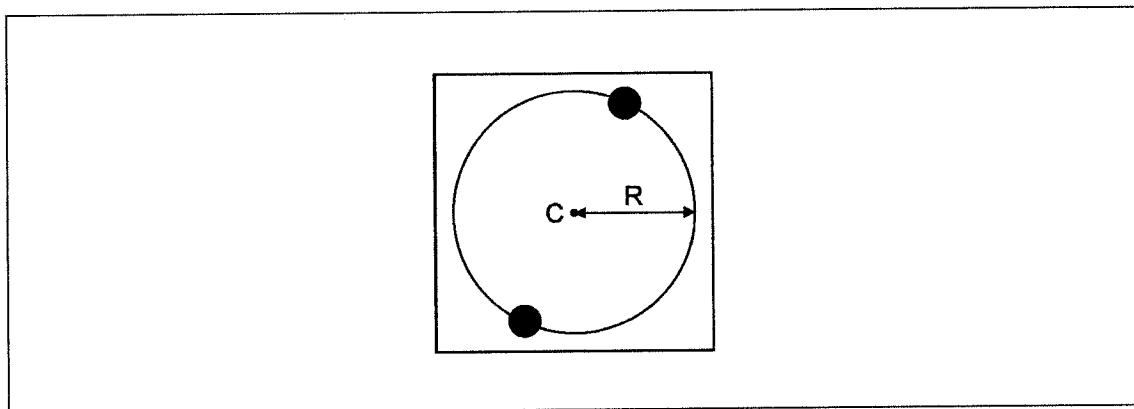
Privzamemo, da bi elektron, ki potuje po krožnici z radijem R , opravil enak kotni premik. Tako izračunamo (12) novo dejansko pozicijo \vec{p}_d elektrona v potencialnem kanalu celice s središčem C .

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

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* zaženetata 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.

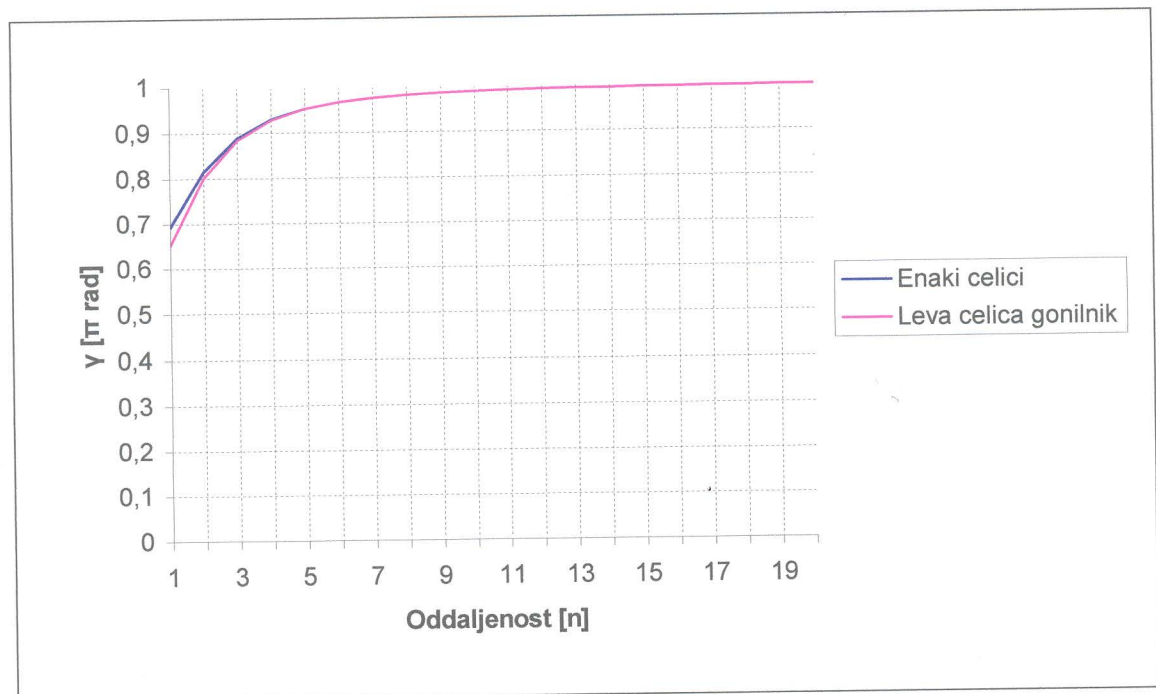
5. REZULTATI SIMULACIJE

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 nasprotujoči 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.

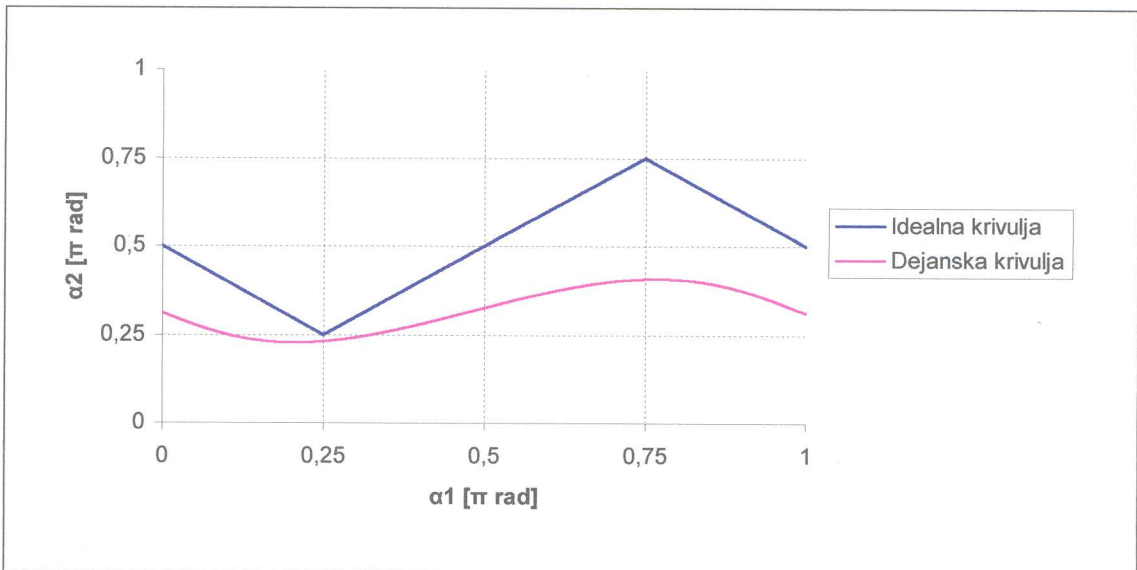


Slika 36: Odvisnost kota γ med prostima elektronoma od razdalje med celicama

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

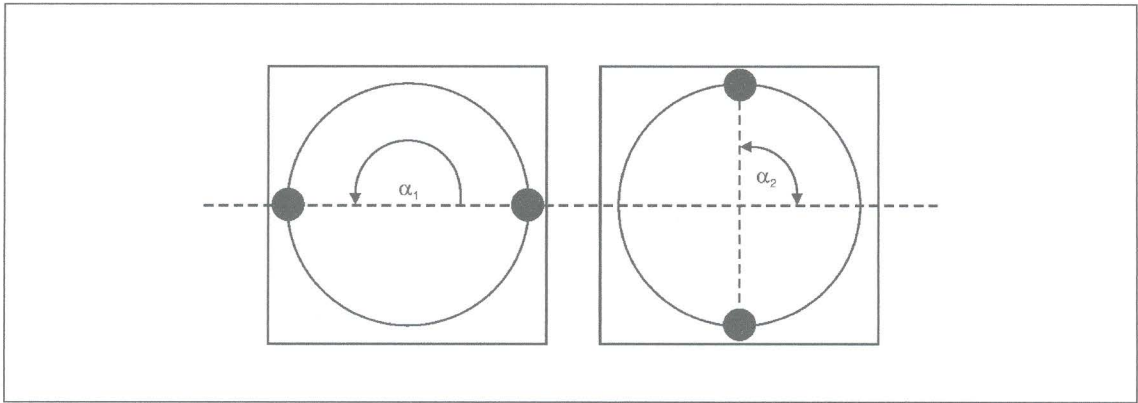
ima *proste* elektrone. Vidimo, da elektroni pri oddaljenosti $n = 15$ oklepajo kot blizu π radianov. Na žalost je pri tej oddaljenosti preslikava odklona ene celice na odklon druge daleč od idealne, zato smo uvedli model *vpetih* elektronov.

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



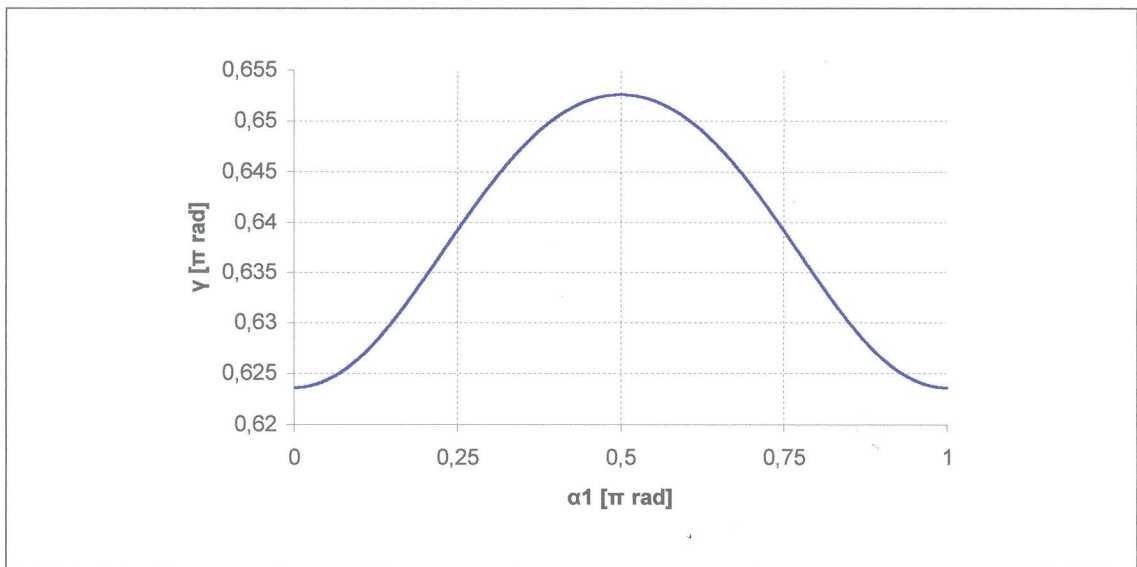
Slika 37: Idealna in dejanska prevajalna funkcija interakcije gonilnika in celice s prostimi elektroni

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. Začetem 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.

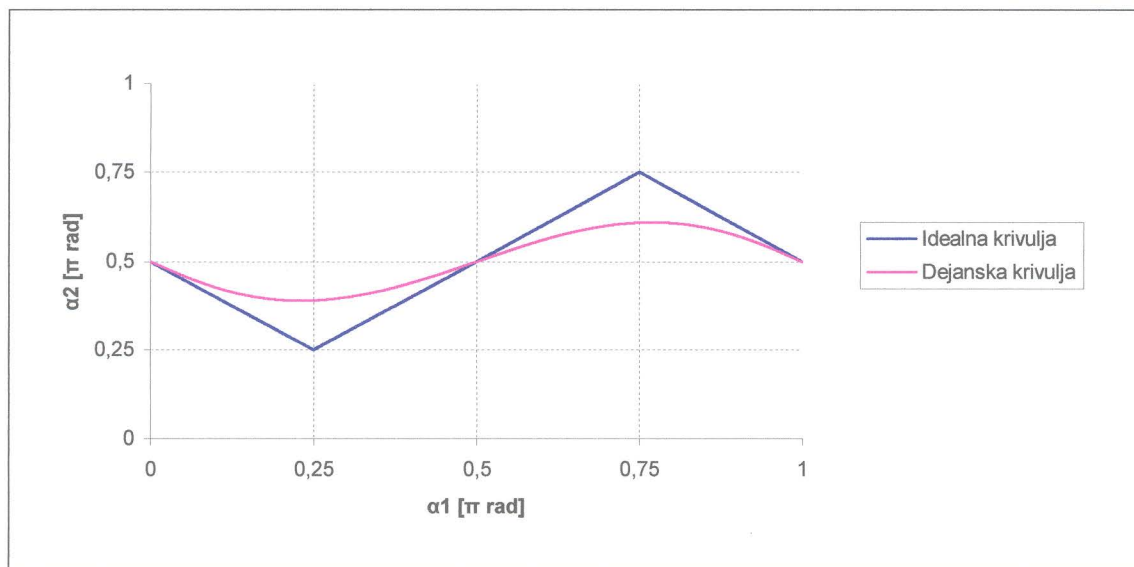


Slika 38: Začetna pozicija

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

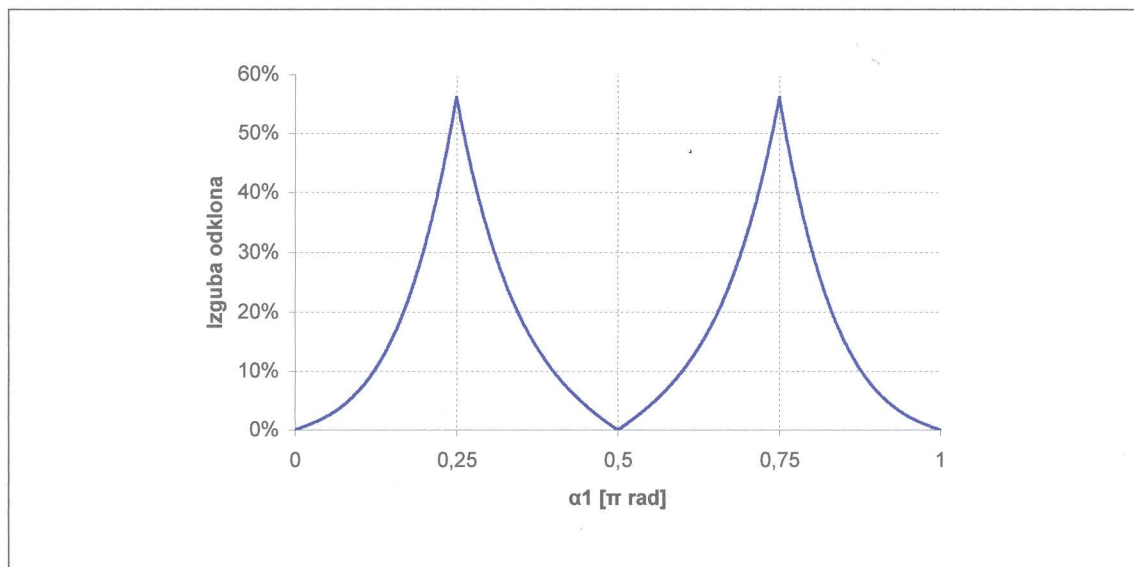
Prevajalno funkcijo dveh celic z *vpetima* elektronoma prikazuje slika 40. Začetna postavitev celic je prikazana na sliki 38. Graf podaja odvisnost odklona α_2 proste celice od odklona α_1 gonilnika.



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*.

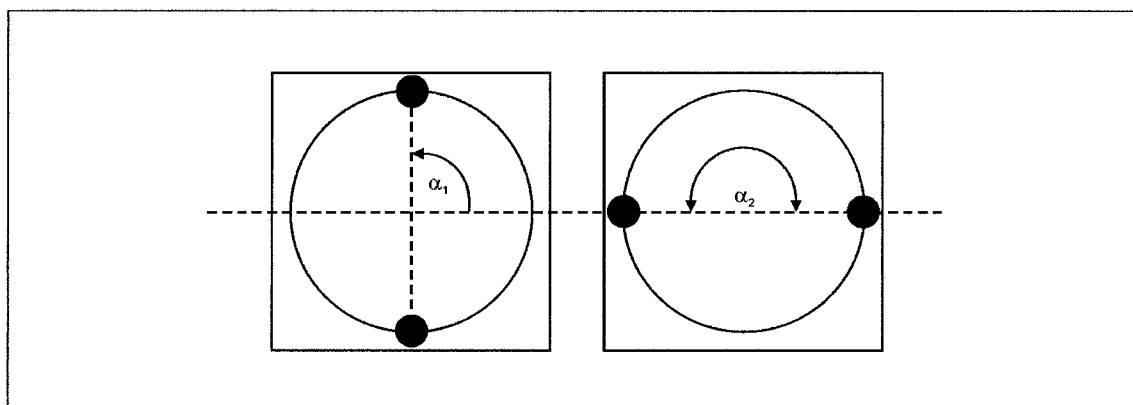
Kot je vidno na sliki 40 odstopanje med odklonoma α_1 in α_2 narašča s približevanjem skrajnim točkam linearne preslikave. Odstopanje v odstotkih je prikazano na sliki 41.



Slika 41: Odstopanje dejanske krivulje od idealne krivulje

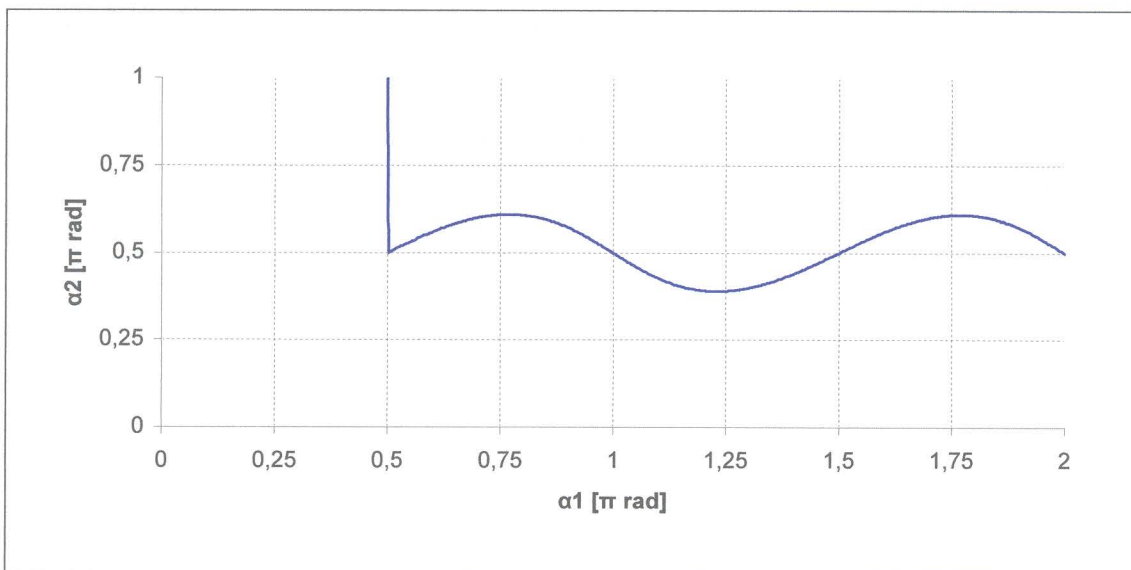
Izguba v skrajnih točkah linerane preslikave je 54,7%, medtem ko je izguba pri odklonih 0 , $0,5\pi$ in π radianov 0%. Odstopanje izkazuje eksponentno naravo, ki je posledica Coulombovega zakona.

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

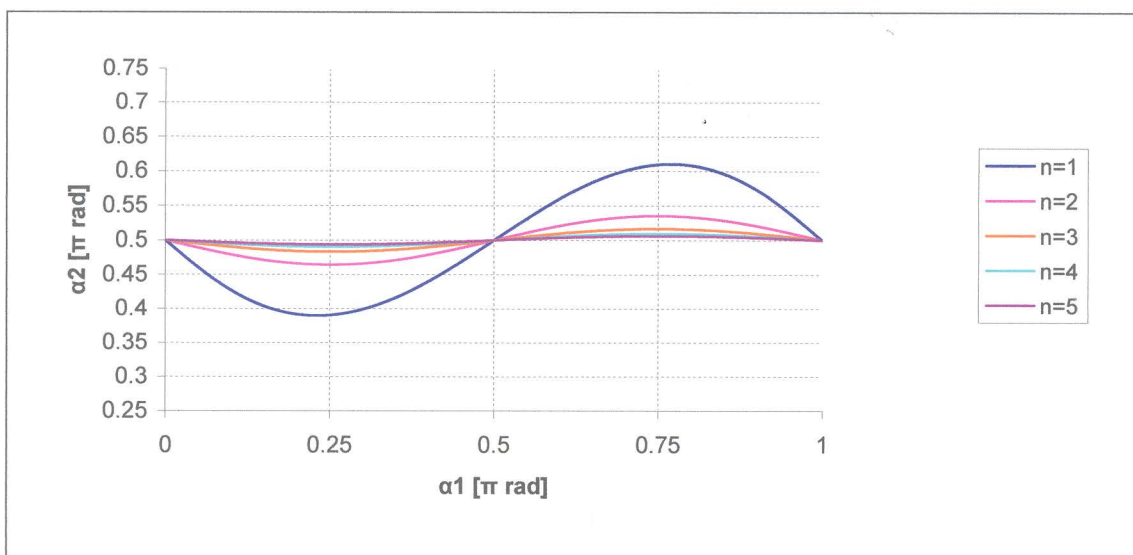
Prosta celica je ohranjala odklon α_2 , če se odklon $\alpha_1 = 0,5\pi$ radianov gonilnika ni spremenil. V trenutku, ko se je odklon gonilnika spremenil, je prosta celica najprej prešla v novo ravnovesno stanje, zatem pa sledila odklonu α_1 gonilnika. Odklon α_1 gonilnika smo spreminjali od $0,5\pi$ 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 nastavljanje 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.

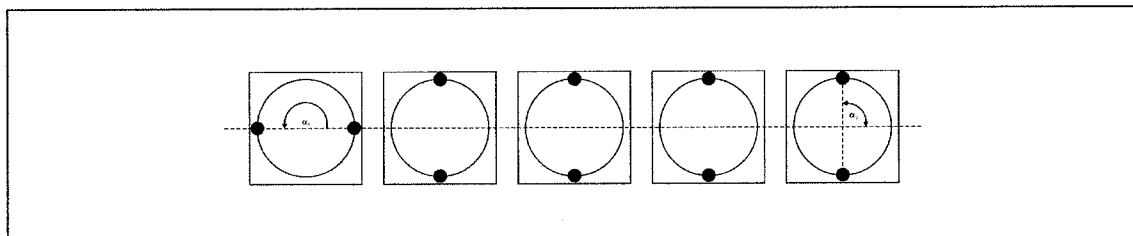
Ugotovili smo, da prevajalna funkcija ni odvisna od radija R krožnice, zato njegova vrednost ni nikoli navedena. Prevajalna funkcija ravno tako ni odvisna od konstantnega dela k Coulombovega zakona v enačbi (15), ki je le drug zapis enačbe (2).

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

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

5.2. Interakcija celic v liniji

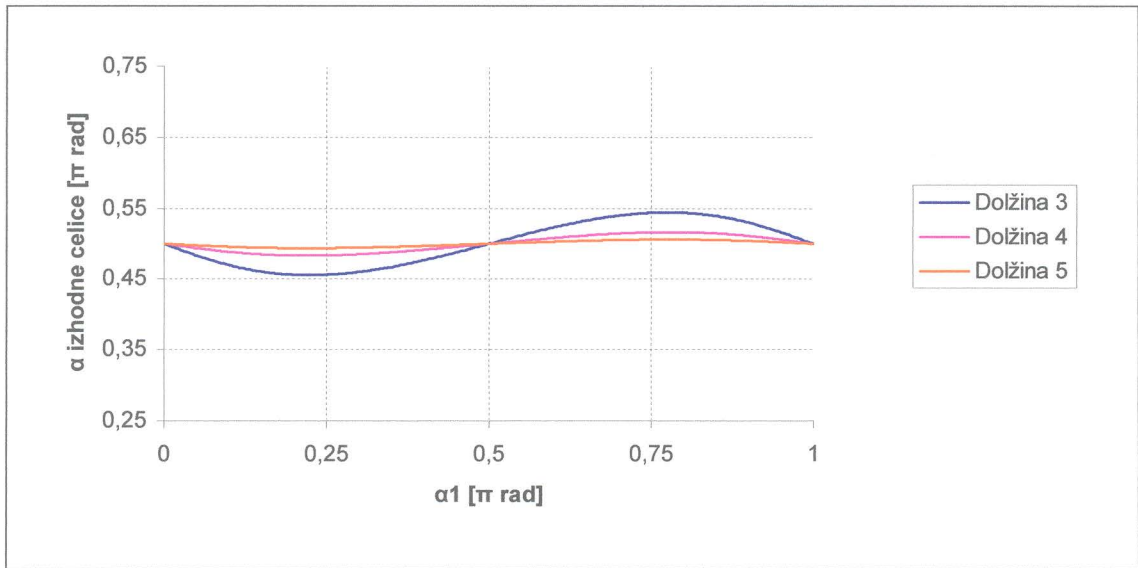
Simulirali smo *linijo* prikazano na sliki 45.



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 predstavljala 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*.