



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Saulius Vaičeliūnas

LĄSTELIŲ PLYŠINĖS JUNGTIES
MODELIAVIMAS NAUDOJANT
MARKOVO PROCESUS

Magistro darbas

Vadovas
profesorius habilituotas daktaras Henrikas Pranevičius

KAUNAS, 2012



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Saulius Vaičeliūnas

LAŠTELIŲ PLYŠINĖS JUNGTIES
MODELIAVIMAS NAUDOJANT
MARKOVO PROCESUS

Magistro darbas

Vadovas
prof. habil. dr
Henrikas Pranevičius
2012 05 28

Recenzentas
prof. dr
Eduardas Bareiša
2012 05 28

Atliko
IFM 0/1 grupės studentas
Saulius Vaičeliūnas
2012 05 28

KAUNAS, 2012

Saulius Vaičiūnas Ląstelių plyšinės jungties modeliavimas naudojant Markovo procesus
Informatikos magistro baigiamasis darbas / mokslinis vadovas profesorius habilituotas daktaras
Henrikas Pranevičius; Kauno technologijos universitetas; Informatikos fakultetas, Informatikos
katedra – Kaunas, 2012 – 53p.

SANTRAUKA

Šiame darbe pateikiama ląstelių plyšinės jungties Markovo modelių sudarymo metodika, naudojant Markovo procesus, apimanti būsenų grafų generavimą, stacionariųjų tikimybių skaičiavimą ir plyšinės jungties laidumo priklausomybės nuo įtampos skaičiavimus.

Darbe aprašomi skirtingi plyšinės jungties modeliai. Kiekvienas modelis turi savo koneksinų būsenų grafus, kuriais remiantis yra simuliuojama plyšinės jungties laidžio priklausomybė nuo įtampos. Kiekvienas koneksinas gali būti aprašomas dvejomis būsenomis: „O“ – atvira, „C“ - uždara ir trijomis būsenomis: „O“ – atvira, „C“ – uždara, „D“ – visiškai uždara.

Remiantis sumodeliuotais modeliais, buvo sukurta programinė įranga leidžianti grafiškai pavaizduoti modelių būsenų grafus, simuliuoti modelius ir gauti simuliacijos rezultatus. Taipogi buvo realizuota programinės įrangos realizacija į kitas sistemas.

Saulius Vaičeliūnas Modelling of the Gap Junction Cells using Markov processes:
Master's work in computer science / supervisor habil. dr. prof. H. Pranevičius; Departament of
Computer Science, Faculty of Computer Science, Kaunas University of Technology. – Kaunas,
2012. – 53p.

SUMMARY

In this paper methodology of composing Markov process models of gap junction cells is introduced. This methodology contains state graphs generation, computing of stationary probabilities and computing of the conductance of the gap junction dependence on a voltage.

In this paper different gap junction models are presented. Every model has its own connexin state graphs, on which the conductance of the gap junction dependence on a voltage simulation is based. Every connexin can have two different state scenarios: first scenario where two connexin model is based on two states „O“ – open or „C“ – closed and second scenario where three connexin model is based on three states „O“ – open, „C“ – closed and „D“ – deep closed.

The computer programs based on these models were created, which allows user graphically see the models state graphs, simulate models and get the needed results. Also these programs are integrated into more difficult systems and into other libraries.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
ĮVADAS	9
1. ANALITINĖ DALIS	10
1.1 TARPLAŠTELINĖS PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIAI	10
1.2 DARBE SPRENDŽIAMŲ UŽDAVINIAI	13
2. METODOLOGINĖ DALIS	15
2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES KONCEPTUALUSIS MODELIS	15
2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES TOLYDAUS LAIKO MARKVO PROCESŲ MODELIAI	16
2.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (I)	16
2.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II)	19
2.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS	20
2.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (I)	21
2.2.5 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II)	22
2.2.6 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS	23
2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIŲ PLA SPECIFIKACIJA	23
2.3.1 DVIEJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA	23
2.3.2 TRIJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA	25
2.4 BŪSENŲ GRAFŲ GENERAVIMO METODAI	30
2.4.1 BŪSENOS KEITIMO PO ŽINGSNIUI METODAS	30
2.4.2 BŪSENOS KEITIMAS PAGAL ATVIRŲ BŪSENŲ KIEKĮ METODAS	31
3. TIRIAMOJI DALIS	33
3.1. PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIŲ BENDRIEJI PARAMETRAI	33
3.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS	34
3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS	34
3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ II MODELIO TYRIMAS	35
3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS	36
3.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ IR IMITATORIŲ REZULTATAI	37
3.2.5 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ VEIKIMO GREIČIŲ PALYGINIMAS	40
3.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS	42
3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS	42
3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ II MODELIO TYRIMAS	43
3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS	46
3.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ MODELIŲ REZULTATAI	47

4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA IR INSTRUKCIJA VARTOTOJUI.....	49
4.1 PROGRAMINĖ REALIZACIJA	49
4.2 VARTOTOJO INSTRUKCIJA	49
4.3 PROGRAMOS PANAUDOJIMAS KITUOSE PROGRAMUOSE.....	50
IŠVADOS	51
LITERATŪRA	52
PRIEDAI	53

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Koneksinų įgyjamų reikšmių lentelė.....	17
2.2 lentelė. Būsenos keitimo po žingsniui grafo generavimo eiga.....	31
2.3 lentelė. Būsenos keitimo pagal atvirų būsenų kiekį grafo generavimo eiga.....	32
3.1 lentelė. Pasirinktų parametrų reikšmės puskanalio visiems koneksinams.....	33
3.2 lentelė. Simulioriaus parametrai.....	33
3.3 lentelė. 4 koneksinų modelių ir imitatorių vykdymo greičiai.....	40
3.4 lentelė. 4 koneksinų būsenų grafo generatorių veikimo greičiai.....	41

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Keturių koneksinų modelio schema	10
1.2 pav. Modelio perėjimo konstantos išreikštos eksponentinėmis funkcijomis	11
1.3 pav. <i>g_j</i> priklausomybės nuo <i>V_j</i> simuliacijos grafikas	11
1.4 Dvylikos koneksinų modelio schema	12
1.5 pav. <i>g_j</i> priklausomybės nuo <i>V_j</i> simuliacijos grafikas	13
2.1 pav. 2 būsenų grafas	15
2.2 pav. 3 būsenų grafas	15
2.3 pav. PJ 4 koneksinų modelio schema	16
2.4 pav. PJ 12 koneksinų modelio schema	21
2.5 pav. Būsenos keitimo po žingsniui būsenų grafas	31
2.6 pav. Būsenos keitimo pagal atvirų būsenų kiekį būsenų generavimo grafas	32
3.1 pav. 4 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas	34
3.2 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom	34
3.3 pav. 4 koneksinų 2 būsenų (II) modelio būsenų grafas	35
3.4 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom	35
3.5 pav. 4 koneksinų trijų būsenų modelio grafas	36
3.6 pav. 4 koneksinų trijų būsenų grafo fragmentas	36
3.7 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom	37
3.8 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom. Panaudotas 2012 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius	37
3.9 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų plyšinės jungties laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom. Panaudotas 2010 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius	38
3.10 pav. Bendras 4 koneksinų dviejų būsenų modelių ir imitatorių plyšinės jungties laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas	39
3.11 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom. Panaudotas 2010 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius	39
3.12 Bendras 4 koneksinų trijų būsenų modelio ir imitatoriaus plyšinės jungties laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas	40
3.13 pav. 4 koneksinų modelių ir imitatorių vykdymo laikų palyginimo diagrama	41
3.14 pav. 4 koneksinų būsenų grafo generatorių veikimo laikų palyginimo diagrama	41
3.15 pav. 12 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas	42
3.16 pav. 12 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafo fragmentas	43
3.17 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom	43
3.18 pav. 12 koneksinų (II) modelio būsenų grafas	44
3.19 12 koneksinų trijų būsenų grafo fragmentas	44
3.20 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom	45
3.21 pav. 12 koneksinų 3 būsenų modelio dalinis būsenų grafas	46
3.22 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom	46
3.23 pav. Bendras 12 koneksinų modelių plyšinės jungties laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas	47
4.1 pav. Modelių pasirinkimo sąrašas	49
4.2 pav. „Graphex“ programos langas	50

IVADAS

Šiame darbe tiriamas tarpląstelinių plyšinių jungčių veikimas, naudojant skirtingus koneksinų būsenas aprašančius grafus. Sudaryti skirtingi tolydaus laiko Markovo procesų modeliai (dviejų būsenų keturiu ir dvylikos koneksinų ir trijų būsenų keturiu ir dvylikos koneksinų).

Tikslas – sudaryti Markovo procesų modelių ląstelių plyšinei jungčiai simuliuoti, atlikti modelių veikimo greičio ir patikimumo analizę, palyginti gautus rezultatus su sukurtais imitatoriais ir eksperimentiniais duomenimis, sukurti programinius paketus modelių realizavimui.

Yra sukurti imitatoriai kurie imituoja tarpląstelinę plyšinę jungtį, prie aukščiau aprašytu modelių, tačiau skirtumas nuo šio darbo tyrinėjamų modelių yra tas, jog imitatoriai vykdant globalią optimizaciją ilgai užtrunka prie modelio imitavimo, nes imitatorius kiekvienoje naujoje iteracijoje perskaičiuoja visus vykdomo modelio parametrus iš naujo. Kad paspartinti optimizaciją iškilo poreikis realizuoti Markovo procesais paremtus modelius, kurie išgeneruotu visą modelio veikimo scenarijų dar prieš jį vykdant, o modelis pasinaudojęs sugeneruotu būsenų grafu apskaičiuotu stacionariasias tikimybes ir laidžio priklausomybę nuo įtampos.

Kad užtikrinti modelių patikimumą, buvo bendraujama su Niujorko Einšteino kolegijos kolegijoje (Albert Einstein College of Medicine of Yeshiva University, New York, U.S.A) profesoriumi Feliksu Bukausku, medicinos daktaru, KTU Informatikos fakulteto Verslo informatikos katedros profesoriumi Henriku Pranevičiumi ir Nerijum Paulausku (buvusiu KTU Informatikos fakulteto magistrantu, dabar studijuojančio Lietuvos sveikatos mokslų universite, kardiologijos institute, doktorantūroje)

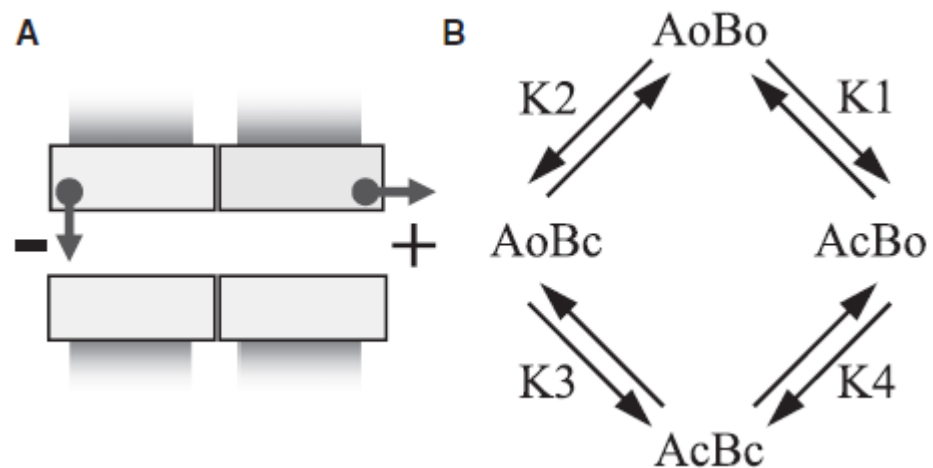
1. ANALITINĖ DALIS

1.1 TARPLAŠTELINĖS PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIAI

Koneksinai – didelė membraninių proteinų šeimyna kuri formuoja plyšinės jungties kanalus, kurie suteikia tiesioginį kelią elektoriniams ir metaboliniams signalams tarp ląstelių. Kiekvienas plyšinės jungties kanalas yra sudarytas iš dviejų puskanalių – koneksonų. Plyšinės jungties bendravimas vaidina svarbų vaidmenį daugumoje procesų, tokiuose kaip: impulso skleidimui širdyje, organų vystymuisi augant.

Savybė kuri yra bendra plyšinės jungties kanalams turintiems bet kokio tipo koneksinus yra laidis g_j ir įtampa V_j . Bendra ypatybė yra ta, jog „steady-state“ – ramybės būseną nenustoja ties nuliu didinant V_j įtampą, o pasiekia stabilizuotą arba liktinį laidumą kuris yra tarp 5% - 30% dydžio maksimalaus g_j laidumo, o šis priklauso nuo koneksino tipo.

Vienas iš tiriamų modelių yra keturių koneksinų modelis. Šiame modelyje kanalas yra sudarytas iš dviejų puskanalių o kiekvienas puskanalis turi po du koneksinus.



1.1 pav. Keturių koneksinų modelio schema.

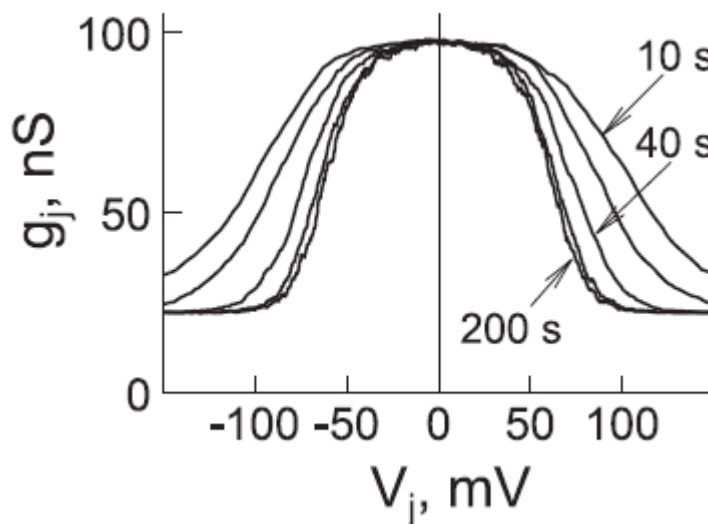
(1.1 pav) pavaizduota: (A) plyšinės jungties kanalo schema susidedanti iš greitų vartų kiekviename puskanalyje. (B) 4 būsenų modelis. AoBo – būseną kai kairysis ir dešinysis vartai yra „O“ – atviroje būsenoje. AcBo – būseną kai kairysis vartas yra „C“ – uždaroje būsenoje, o dešinysis yra „O“ – atviroje. AoBc – būseną kai kairysis vartas yra „O“ – atviroje būsenoje, o dešinysis yra „C“ – uždaroje. AcBc – būseną kai kairysis ir dešinysis vartai yra „C“ – uždaroje būsenoje.

Modelio perėjimo tikimybės yra apibrėžtos eksponentinėmis funkcijomis, kurios priklauso nuo krentančios įtampos ant kairiojo ir dešiniojo puskanalio.

$$\begin{aligned}
 K_1 &= e^{A_1(-\Pi \cdot V_A - V_{01})} \\
 K_2 &= e^{A_2(\Pi \cdot V_B - V_{02})} \\
 K_3 &= e^{A_3(-\Pi \cdot V_A - V_{03})} \\
 K_4 &= e^{A_4(\Pi \cdot V_B - V_{04})}
 \end{aligned}$$

1.2 pav. Modelio perėjimo konstantos išreikštos eksponentinėmis funkcijomis

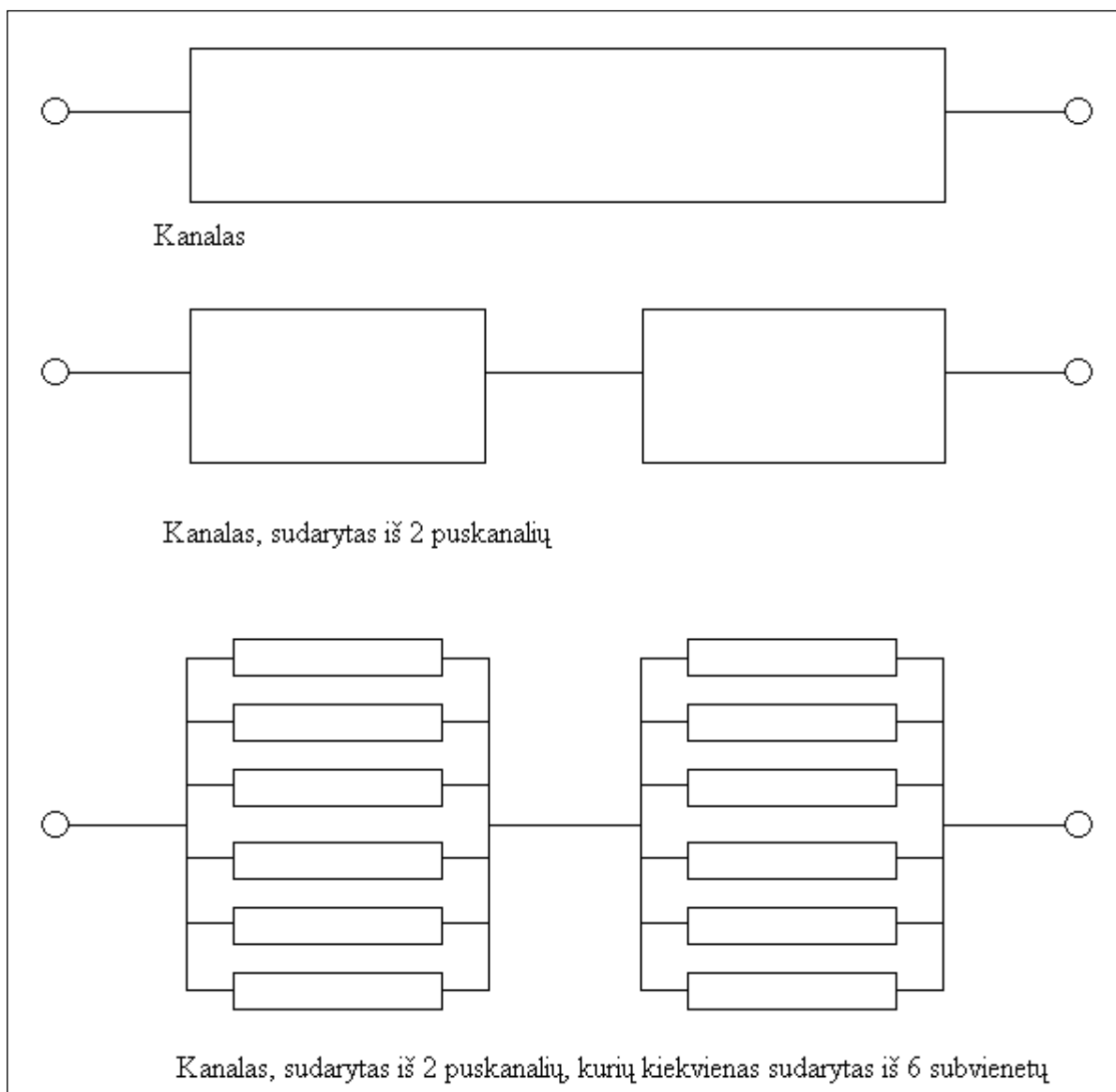
(1.2 pav) pavaizduotos modelio perėjimo konstantos išreikštos eksponentinėmis funkcijomis, kur A_i – įtampai jautrus koeficientas, V_{0i} – pusė maksimalios įtampos ir Π – vartų poliariškumas, kuris gali būti neigiamas arba teigiamas. Bendra plyšinės jungties kanalo įtampa yra puskanalių įtampos suma $V_j = V_k + V_d$.



1.3 pav. g_j priklausomybės nuo V_j simuliacijos grafikas

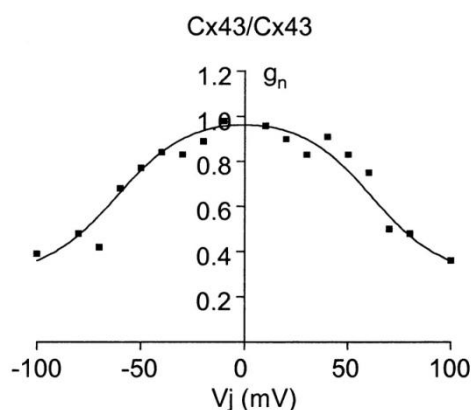
(1.3 pav) pavaizduota V_j simuliacija plyšinėje jungtyje, kai V_j lėtai kinta nuo -150mV iki 150mV . Įtampos kitimo žingsnis buvo keičiamas atitinkamai nuo 200 iki 100, 40, 20 ir 10s. ^[1]

Kitas tiriamas modelis yra šešių koneksinų modelis. Šiame modelyje kanalas yra sudarytas iš dviejų puskanalių o kiekvienas puskanalis turi po šešis koneksinus.



1.4 Dvylikos koneksinų modelio schema

(1.4 pav) pavaizduota plyšinės jungties kanalo schema. Kiekvienas koneksinas veikia tokiu pat principu kuris yra pateiktas (1.1 pav) aprašyme. Skirtumas yra laidžio skaičiavime, nes prieš tai aprašytame modelyje, puskanaliai ir koneksinai yra sujungti nuosekliai, o čia puskanaliai yra sujungti nuosekliai, o koneksinai tarpusavyje lygiagrečiai.



1.5 pav. g_j priklausomybės nuo V_j simuliacijos grafikas

(1.5 pav) pavaizduota šio modelio eksperimentiniai rezultatai, keičiant V_j įtampą nuo -100 mV iki 100 mV.

Abu modeliai yra tiriami ir jiems yra kuriami imitatoriai. Šiame darbe yra aptariama ne imitatoriaus kūrimas, o Markovo procesų pritaikymas kuriant matematinius – programinius modelius, kurie simuliuotu tarpląstelinės plyšinės jungties laidžio priklausomybę nuo įtampos. Markovo procesų pritaikymas šiems modeliams yra reikalingas tam, kad būtų galima iširti jų veikimo greitį lyginant su imitatoriaus veikimo greičiu.

Modelio veikimo greitis yra neatsiejamas laiko faktorius taikant optimizaciją ir paiešką. Paieška naudojama tam, kad sukurtus programinius modelius, būtų galima pristie prie eksperimentinių rezultatų, todėl tinkamų modelių parametrų ieškojimas užtrunka gan didelį laiko tarpą.

Optimizavimas – sumažina eksperimentinių rezultatų triukšmus, kurie gali atsirasti dėl iškraipytos įrangos ar pašalinių įrenginių veikiančių signalų, todėl prieš vykdant paiešką, būtina nufiltruoti signalus kiek įmanoma daugiau, kad rezultatai būtų kuo tikslesni eksperimentiniams [2][3][4].

1.2 DARBE SPRENDŽIAMŲ UŽDAVINIAI

1. Plyšinės jungties modelių sudarymas
 - a. Keturių koneksinų dviejų būsenų modelis
 - b. Keturių koneksinų trijų būsenų modelis
 - c. Dvylikos koneksinų dviejų būsenų modelis
 - d. Dvylikos koneksinų trijų būsenų modelis
2. Sudarytų modeliams būsenų grafų generatorius
3. Atlikti modelių analizę su imitatoriaus ir eksperimentų duomenimis

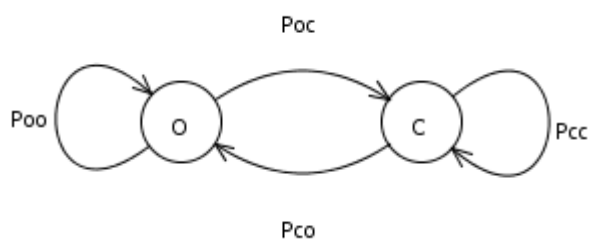
4. Sukurti kompiuterinę programą, kuri realizuotu grafų generatorius ir modelius, atliktu modelių simuliaciją ir pateiktu laidžio priklausomybės nuo įtampos rezultatus, būtų lengvai integruojama į kitas sistemas.

2. METODOLOGINĖ DALIS

2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES KONCEPTUALUSIS MODELIS

Tarpląstelinė plyšinė jungtis yra sudaryta iš $N \gg 1$ kanalų. Kiekvienas kanalas sudarytas iš dviejų puskanalių kairiojo ir dešiniojo. Kiekvienas puskanalis gali būti sudarytas iš n koneksinų, priklausomai nuo tai, kokia plyšinė jungtis yra nagrinėjama. Kiekvienas koneksinas kinta pagal tam tikrus būsenų grafus. Šiuo metu praktikoje yra naudojami du koneksinų kitimo tipai tai: 2 ir 3 būsenų.

Dviejų būsenų koneksino būsenų perėjimo grafas pavaizduotas (2.1 pav).



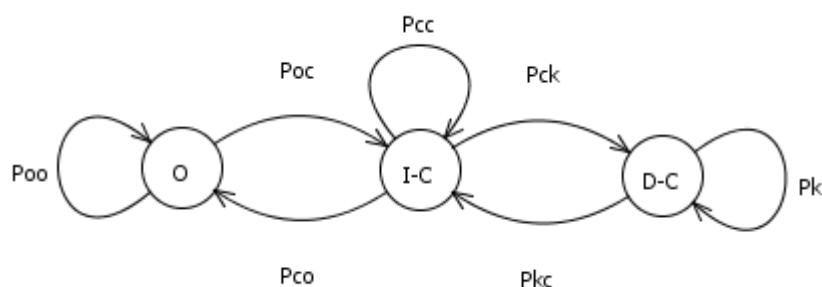
2.1 pav. 2 būsenų grafas

Kiekvienas koneksinas gali būti „O“ – (angl. „open“) atviroje arba „C“ – (angl. „closed“) uždaroje būsenoje. Kad koneksinas bus vienoje iš šių būsenų apsprendžia perėjimo tikimybės. P_{oo} – tikimybė jog koneksinas liks „O“ būsenoje. P_{oc} – tikimybė jog koneksinas „O“ būseną pakeis į „C“ būseną. P_{cc} – tikimybė jog koneksinas liks „C“ būsenoje. P_{co} – tikimybė jog koneksinas „C“ būseną pakeis į „O“.

Koneksino būsenų perėjimo tikimybės yra skaičiuojamos pagal šias formules:

$$\begin{aligned} P_{oc} &= \frac{K \cdot k}{1+k} & P_{co} &= \frac{K}{1+k} \\ P_{oo} &= 1 - P_{oc} & P_{cc} &= 1 - P_{co} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Trijų būsenų koneksino būsenų perėjimo grafas pavaizduotas 2 pav.



2.2 pav. 3 būsenų grafas

Papildomai, šiame grafe „I – C“ būseną turi papildomą perėjimą į „D – C“ būseną, su tikimybe P_{ck} . Iš būsenos „D – C“ koneksinas pereina į būseną „I – C“ su tikimybe P_{kc} . Iš „D – C“ būsenos koneksinas gali pereiti į save su tikimybe P_k , tuomet atitinkamai tikimybės pereiti iš „I-C“ į „I – C“ ir iš „I – C“ į „O“ yra lygiai tokios pat kaip ir (2pav) tik papildomai, kad įvertintume perėjimą į „D – C“ būseną, P_{co} ir P_{cc} yra apskaičiuojama taip:

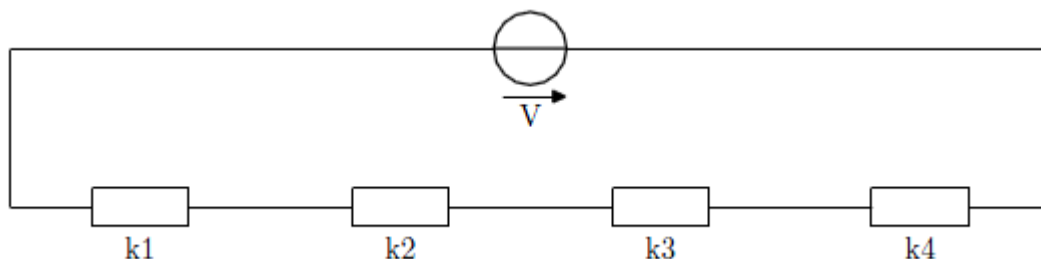
$$P_{ck} = \begin{cases} P_{co} = P_{co} - (P_{co} * k) \\ P_{cc} = P_{cc} - (P_{cc} * k) \end{cases} ; \begin{matrix} P_k = k \\ P_{kc} = 1 - k \end{matrix} \quad (2.2)$$

Pastaba: „I – C“ būseną yra tokia pat kaip ir „C“, tik skiriasi būsenos žymėjimas.

2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES TOLYDAUS LAIKO MARKOVO PROCESŲ MODELIAI

2.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (I)

Šiame modelyje kiekvienas koneksinas gali būti dviejuose būsenose: „O“ – atvira ir „C“ – uždara. Plyšinės jungties (PJ) kanalo 4 koneksinų modelis yra sudarytas iš 4 koneksinų, pažymėtų paveiksle (2.3 pav.), pateiktame žemiau. Kiekvienas puskanalis turi po 2 nuosekliai sujungtus koneksinus. Srovės įtampa žymima V raide.



2.3 pav. PJ 4 koneksinų modelio schema

Taigi, turime nuoseklų laidininkų jungimą. Nuosekliai sujungtų laidininkų kiekvienoje grandinės dalyje srovės stipris I yra vienodas. Remiantis Omo dėsnio, bendra srovės įtampa yra lygi grandinės dalių įtampų V_1, V_2, V_3, V_4 sumai, o kiekviena įtampa yra lygi srovės stiprio ir varžos sandaugai. Taigi, turime:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 \\ I_1 &= I_2 = I_3 = I_4 = I \\ IR &= I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Remiantis (2.3) formule, varža lygi

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2.4)$$

R_1, R_2, R_3, R_4 atitinkamai yra koneksinų k_1, k_1, k_1, k_1 varžos. Kadangi reikia skaičiuoti laidį, o ne varžą, tai laidžio formulė yra

$$g = \frac{g_1 g_2 g_3 g_4}{g_2 g_3 g_4 + g_1 g_3 g_4 + g_1 g_2 g_4 + g_1 g_2 g_3} \quad (2.5)$$

Formulė 2.5 gauta žinant, kad laidis yra atvirkščias varžai dydis, t.y. $g = \frac{1}{R}$.

Remiantis tuo, kad srovės stipris visose grandinės dalyse yra vienodas, t.y. $i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = i$ (atitinkamai tai yra pirmo, antro, trečio, ketvirto koneksinų srovės stipriai yra vienodi ir lygūs grandinės srovės stipriui), o įtampa kiekvieno sujungto nuosekliai koneksino yra skirtinga, tačiau žinome kiekvieno koneksino laidžio formulę, tai galima skaičiuoti visos grandinės ir kiekvieno koneksino nusistovėjusį laidį.

Iteracines įtampas (kiekvieno koneksino) formulės gaunamos pasinaudojant Omo dėsniu ir tuo, kad srovės stipris visose grandinės dalyse yra vienodas.

$$\begin{aligned} V_1 = \frac{i}{g_1} &= \left[i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_2 = \frac{i}{g_2} &= \left[i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 2}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_3 = \frac{i}{g_3} &= \left[i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 3}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_4 = \frac{i}{g_4} &= \left[i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 4}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

Kadangi turi būti nustatoma pradinė įtampa, tai programos kode pradedame skaičiuoti kai $V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 0 \text{ mV}$.

Tarkime vartotojos įvedamos elektrinės grandinės įtampa $V = 20 \text{ mV}$, poliškumas $P = +$, teigiamas. Sudaroma kitimo lentelė (čia pateikiama nepilna, dešimt tūkstantųjų tikslumu).

2.1 lentelė. Koneksinų įgyjamų reikšmių lentelė

V, mV	V_1	V_2	V_3	V_4	g_1, pS	g_1, pS	g_1, pS	g_1, pS	g, pS
0	0	0	0	0	$g_o = 2$	$g_o = 2$	$g_o = 2$	$g_o = 2$	$g_1 \text{ grandinės} = 0,5$
dar 15 galimų laidžių variantų									

20	5	5	5	5	2,0125	2,0125	2,0125	2,0125	$g_1 grandinės = 0,5031$
dar 15 galimų įtampos variantų					dar 15 galimų laidžių variantų				
$V = \frac{V \cdot g_1, kai V = 0}{g_1, kai V = 20}$ $= \frac{20 \cdot 0,5}{0,5031} = 19,8768$		16 galimų įtampų variantų			16 galimų laidžių variantų				
...					...				
...					...				

Apibrėžiama dažnių matrica Q , kuri yra išvestinė tikimybiųjų įvykių, kintančių per be galo mažą laiko intervalą. Taria, kad koneksinai gali keisti būseną per vieną žingsnį dažniu

$\lambda_{oc}(V_i) = \frac{p_{oc}(V_i)}{\text{koneksino laikas}}$ ir $\lambda_{co}(V_i) = \frac{p_{co}(V_i)}{\text{koneksino laikas}}$; čia $i = (1, \dots, 4)$ yra koneksino numeris, *koneksino laikas* – koneksino buvimo laikas, įvedamas vartotojo, milisekundėmis (*ms*);

$$\lambda_{oo} = \lambda_{cc} = 0.$$

Taigi Q matrica šiuo atveju bus tokia:

$$Q = (\lambda_{a,b} + \lambda_{c,d} + \lambda_{e,f} + \lambda_{g,h}); \quad (2.7)$$

čia: $a = \{o, c\}, b = \{o, c\}, c = \{o, c\}, d = \{o, c\}, e = \{o, c\}, f = \{o, c\}, g = \{o, c\}, h = \{o, c\}$, kai yra modeliuojamas 2 būsenų modelis ir $a = \{o, c, d\}, b = \{o, c, d\}, c = \{o, c, d\}, d = \{o, c, d\}, e = \{o, c, d\}, f = \{o, c, d\}, g = \{o, c, d\}, h = \{o, c, d\}$, kai yra modeliuojamas 3 būsenų modelis.

Kaip matyti intensyvumai λ sudedami. Q matrica yra eilės 16x16. Šios matricos pagrindinės įstrižainės elementai yra 0, tačiau jie keičiami matricos Q kiekvienos eilutės suma. Turint Q matricą (matricos elementai žymimi $q_{i,j}$) galima ieškoti nusistovėjusių intensyvumų vektorių Π . Šis vektorius yra randamas sprendžiant šią lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{16} \Pi_i q_{i,j} = 0; j = 1,16; \\ \sum_{i=1}^{16} \Pi_i = 1; \end{cases} \quad (2.8)$$

Šios lygties matricinė forma pateikta (2.9 formulė):

$$(\Pi_1 \dots \Pi_{16}) \cdot \begin{pmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{1,16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{16,1} & \dots & q_{16,16} \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Remiantis šia matricine išraiška, ieškomas Π vektorius, t.y. $\Pi = (\Pi_1 \Pi_2 \dots \Pi_{16})$, kuriam rasti reikia skaičiuoti pseudo atvirkštinę matricą A^{-1} („-1“ reiškia atvirkštinę matricą, šiuo atveju matrica yra pseudo atvirkštinė, nes nėra kvadratinė, o stačiakampinė matrica), kuri susideda iš elementų matricos, pavaizduotos aukščiau esančioje lygtyje (2.9), tačiau skaičiuojama pagal konkrečias formules. B vektorius yra $B = (0 \dots 0 1)^T$ – laisvųjų narių vektorius. Taigi lygtis tokia:

$$\Pi = B \cdot A^{-1} \quad (2.10)$$

Toliau yra skaičiuojamas kanalo laidis, naudojantis gautu stacionariųjų tikimybių vektoriumi:

$$g_i = \frac{\Pi_i g_1 g_2 g_3 g_4}{g_2 g_3 g_4 + g_1 g_3 g_4 + g_1 g_2 g_4 + g_1 g_2 g_3}; i = 1, 16 \quad (2.11)$$

Apskaičiavus laidumą, toliau yra skaičiuojamas kanalo laidis įtampos intervale, įvestame vartotojo $V = 0; 10; 100 \text{ mV}$

$$g_i = \frac{\prod_{i=1}^{16} g_i}{\sum_{l=1}^{16} \prod_{i=1, i \neq l}^{16} g_i}; \quad (2.12)$$

Jeigu laidis yra skaičiuojamas daugiau nei vienam kanalui, o tarkim k kanalų, tuomet bendras kanalų laidis bus lygus:

$$g = k \cdot g_j \quad (2.13)$$

2.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIOS 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II)

Šis modelis yra ekvivalentiškas modeliui aprašytam 2.2.1 skyriuje, tačiau skiriasi tuom, jog šiame modelyje Q matrica yra formuoja kitaip. Žinoma jog plyšinė jungtis sudaryta iš 4 konekstinų, du koneksinai yra kairėje pusėje ir kiti du dešinėje. Taigi galime suformuoti Q_l – dažnių matricą kairiajai pusei ir Q_r – dažnių matricą dešinėjai pusei.

$$Q_l = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & * & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & * \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$Q_r = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Bendra Q_l ir Q_r dažnių matrica Q galima gauti panaudojus Kronekerio sandaugą:

$$Q = Q_l \oplus Q_r = Q_l \otimes I_3 + I_3 \otimes Q_r \quad (2.16)$$

Kur I_3 žymi vienetinę trečios eilės matricą $I_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Atlikę veiksmus gauname Q

matricos išraišką:

$$Q = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 0 & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & \lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & 0 & \lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 0 & 0 & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Pastaba: * - pažymėti matricos elementai yra tos eilutės elementų suma su neigiamu ženklu.

Turėdami Q matricą, tolimesnių skaičiavimų metodika yra lygiai tokia pat kaip ir (I) modelio, nuo (2.9) formulės.

2.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS

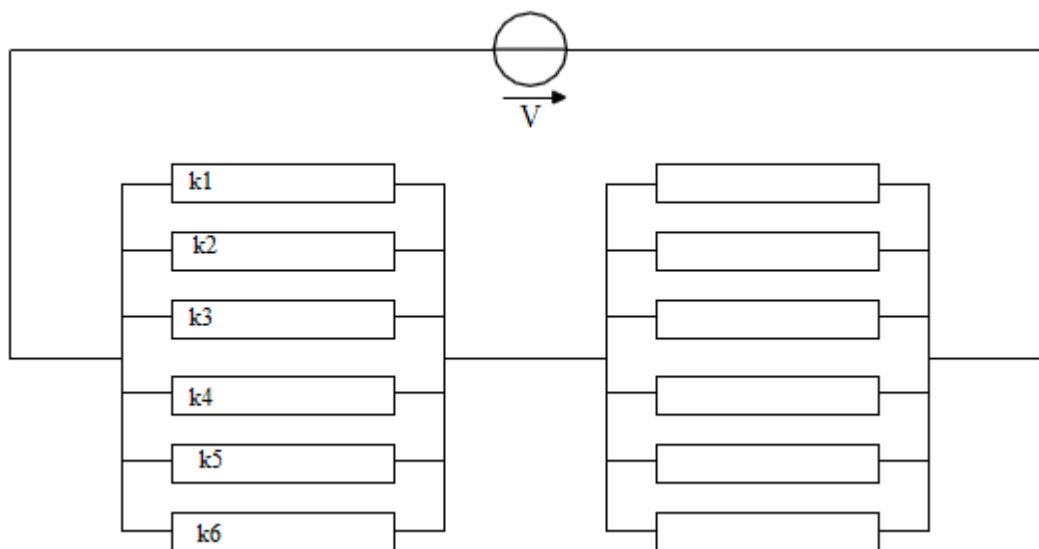
Šis modelis remiasi 2.2.1 skyriuje aprašytu modeliu. Kiekvienas koneksinas gali būti vienoje iš trijų būsenų: „O“ – atvira, „C“ – uždara ir „D“ – pilnai uždara.

Papildomai šiame modelyje atsiranda papildomas parametras – pilnai uždaros būsenos perėjimo tikimybė, kurios skaičiavimo formule yra (2.2). Visa veiksmų seka, ir pateikimas yra lygiai toks pat kaip ir aprašytas 2.2.1 skyriuje, tik Q matrica bus 256x256 dydžio. Taipogi, kad

išpildyti pilną Markovo grandinės grįžtamumą, buvo įterpta tarpinė būseną „G“ – ji yra ekvivalentiška būsenai „C“. Šią būseną buvo privaloma įdėti, nes be jos, skaičiuojamos tikimybės

2.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (I)

Šiame modelyje kiekvienas koneksinas gali būti dviejuose būsenose: „O“ – atvirą ir „C“ – uždara. Plyšinės jungties (PJ) kanalo 12 koneksinų modelis yra sudarytas iš 12 koneksinų, pažymėtų paveiksle, pateiktame (2.4 pav). Kiekvienas puskanalis turi po 6 lygiagrečiai sujungtus koneksinus. Srovės įtampa žymima V raide.



2.4 pav. PJ 12 koneksinų modelio schema

Šis modelis panašus į 4 koneksinų modelį, tačiau kaip matyti iš schemas, laidžio ir kitų formulų skaičiavimai skiriasi..

Dažnių matrica skaičiuojama lygiai taip pat tik atsiranda papildomų dedamųjų

$$Q = (\lambda_{a,b} + \lambda_{c,d} + \lambda_{e,f} + \lambda_{g,h} + \lambda_{i,j} + \lambda_{k,l} + \lambda_{m,n} + \lambda_{o,p} + \lambda_{r,s} + \lambda_{t,u} + \lambda_{v,w} + \lambda_{x,y}); \quad (2.18)$$

Π vektoriaus radimas

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{49} \Pi_i q_{i,j} = 0; j = 1,49; \\ \sum_{i=1}^{49} \Pi_i = 1; \end{cases} \quad (2.19)$$

Šios lygties matricinė forma

$$(\Pi_1 \dots \Pi_{49}) \cdot \begin{pmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{1,49} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{16,1} & \dots & q_{49,49} \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Kanalo laidis, naudojantis gautu stacionariųjų tikimybių vektoriumi

$$g_i = \Pi_i \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} + \frac{1}{g_4} + \frac{1}{g_5} + \frac{1}{g_6}} + \frac{1}{\frac{1}{g_7} + \frac{1}{g_8} + \frac{1}{g_9} + \frac{1}{g_{10}} + \frac{1}{g_{11}} + \frac{1}{g_{12}}} \right) \quad (2.21)$$

Kanalo laidis įtampų intervale

$$g_i = \frac{\prod_{i=1}^{49} g_i}{\sum_{l=1}^{49} \prod_{i=1, i \neq l}^{49} g_i}; \quad (2.22)$$

2.2.5 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II)

Šis modelis yra ekvivalentiškas (I) modeliui, tačiau skiriasi tuom, jog šiam modelyje Q matrica yra formuoja kitaip. Žinoma jog plyšinė jungtis sudaryta iš 12 konekscių, šeši koneksinai yra kairėje pusėje ir kiti šeši dešinėje. Taigi galime suformuoti Q_l – dažnių matricą kairiajai pusei ir Q_r – dažnių matricą dešinejai pusei.

$$Q_l = \begin{pmatrix} * & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & * & 5\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & * & 4\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(l)} & * & 3\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(l)} & * & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(l)} & * & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(l)} & * \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$Q_r = \begin{pmatrix} * & 6\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & 5\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 4\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(r)} & * & 3\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(r)} & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Bendra Q_l ir Q_r dažnių matrica Q galima gauti panaudojus Kronekerio sandaugą:

$$Q = Q_l \oplus Q_r = Q_l \otimes I_7 + I_7 \otimes Q_r \quad (2.26)$$

Kur I_7 žymi vienetinę septintos eilės matricą $I_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Atlikę

veiksmus gauname Q matricos išraišką:

$$Q = \begin{pmatrix} * & 6\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & 5\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 4\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(r)} & * & 3\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(r)} & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(r)} & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{co}^{(l)} & \dots & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & 6\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(r)} & * & 5\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 4\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(r)} & * & 3\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(r)} & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & 0 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Q

Pastaba: * - pažymėti matricos elementai yra tos eilutės elementų suma su neigiamu ženklu.

Turėdami Q matricą, tolimesnių skaičiavimų metodika yra lygiai tokia pat kaip ir (I) modelio, nuo (xxx) formulės.

2.2.6 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS

jkhj

2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIŲ PLA SPECIFIKACIJA

2.3.1 DVIEJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA

Sistemos su dviem koneksinių būsenomis („O“ ir „C“) agregatinė specifikacija:

1. Įėjimo signalų aibė: $X = \emptyset$.

2. Išėjimų signalų aibė: $Y = \emptyset$.
3. Išorinių įvykių aibė: $E' = \emptyset$.
4. Vidinių įvykių aibė:

$$E'' = \{e_1'', e_2'', e_3'', e_4''\};$$

- čia e_1'' - kairėje pusėje perėjimas iš „C“ į „O“;
 e_2'' - kairėje pusėje perėjimas iš „O“ į „C“;
 e_3'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „C“ į „O“;
 e_4'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „O“ į „C“;

5. Perėjimo intensyvumai tarp sistemos būsenų:

$$e_1'' \rightarrow (L - n_l(t)) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, \quad e_2'' \rightarrow n_l(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, \quad e_3'' \rightarrow (R - n_r(t)) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, \quad e_4'' \rightarrow n_r(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}.$$

6. Diskrečioji būsenos komponentė:

$$v(t) = \{n_l(t), n_r(t)\}; \quad n_l(t) = \overline{0, L}; \quad n_r(t) = \overline{0, R};$$

- čia $n_l(t)$ - koneksinų, esančių „O“ būsenoje kairėje pusėje, skaičius;
 $n_r(t)$ - koneksinų, esančių „O“ būsenoje dešinėje pusėje, skaičius;
 L - koneksinų skaičius kairėje pusėje;
 R - koneksinų skaičius dešinėje pusėje.

7. Tolydžioji būsenos komponentė:

$$z_v(t) = \{w(e_1'', t), w(e_2'', t), w(e_3'', t), w(e_4'', t)\}.$$

8. Pradinė sistemos būseną:

$$z(t) = \{0, 0, < \infty, \infty, < \infty, \infty\}.$$

9. Vidinių perėjimų operatoriai:

$H(e_1'')$: / perėjimas iš „C“ į „O“ kairėje pusėje/

$$n_l(t+0) = \begin{cases} n_l(t) + 1, & \text{jeigu } n_l(t) < L, \\ n_l(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_r(t+0) = n_r(t);$$

$$w(e_1'', t+0) = \begin{cases} (L - n_l(t) - 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) < L - 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_2'', t+0) = (n_l(t) + 1) \cdot \lambda_{oc}^{(l)};$$

$$w(e_3'', t+0) = \begin{cases} (R - n_r(t)) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_4'', t+0) = \begin{cases} n_r(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

$H(e_2'')$: / perėjimas iš „O“ į „C“ kairėje pusėje/

$$n_l(t+0) = \begin{cases} n_l(t) - 1, & \text{jeigu } n_l(t) > 0, \\ n_l(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
n_r(t+0) &= n_r(t); \\
w(e_1'', t+0) &= (L - n_l(t) + 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)}; \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} (n_l(t) - 1) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} (R - n_r(t)) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= \begin{cases} n_r(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}
\end{aligned}$$

$H(e_3'')$: / perėjimas iš „C“ į „O“ dešinėje pusėje/

$$\begin{aligned}
n_l(t+0) &= n_l(t); \\
n_r(t+0) &= \begin{cases} n_r(t) + 1, & \text{jeigu } n_r(t) < R, \\ n_r(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_1'', t+0) &= \begin{cases} (L - n_l(t)) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} n_l(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} (R - n_r(t) - 1) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) < R - 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= (n_r(t) + 1) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}.
\end{aligned}$$

$H(e_4'')$: / perėjimas iš „O“ į „C“ dešinėje pusėje/

$$\begin{aligned}
n_l(t+0) &= n_l(t); \\
n_r(t+0) &= \begin{cases} n_r(t) - 1, & \text{jeigu } n_r(t) > 0, \\ n_r(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_1'', t+0) &= \begin{cases} (L - n_l(t)) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} n_l(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_l(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= (R - n_r(t) + 1) \cdot \lambda_{co}^{(r)}; \\
w(e_4'', t+0) &= \begin{cases} (n_r(t) - 1) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}
\end{aligned}$$

2.3.2 TRIJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA

Sistemos su trimis koneksinų būsenomis („O“, „C“ ir „D“) agregatinė specifikacija:

1. Įėjimo signalų aibė: $X = \emptyset$.
2. Išėjimų signalų aibė: $Y = \emptyset$.
3. Išorinių įvykių aibė: $E' = \emptyset$.
4. Vidinių įvykių aibė:

$$E'' = \{e_1'', e_2'', e_3'', e_4'', e_5'', e_6'', e_7'', e_8''\};$$

- čia e_1'' - kairėje pusėje perėjimas iš „D“ į „C“;
 e_2'' - kairėje pusėje perėjimas iš „C“ į „O“;
 e_3'' - kairėje pusėje perėjimas iš „O“ į „C“;
 e_4'' - kairėje pusėje perėjimas iš „C“ į „D“;
 e_5'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „D“ į „C“;
 e_6'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „C“ į „O“;
 e_7'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „O“ į „C“;
 e_8'' - dešinėje pusėje perėjimas iš „C“ į „D“.

5. Perėjimo intensyvumai tarp sistemos būsenų:

$$e_1'' \rightarrow (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, \quad e_2'' \rightarrow n_{lc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, \quad e_3'' \rightarrow n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, \quad e_4'' \rightarrow n_{lc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}$$

$$e_5'' \rightarrow (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, \quad e_6'' \rightarrow n_{rc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, \quad e_7'' \rightarrow n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, \quad e_8'' \rightarrow n_{rc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}.$$

6. Diskrečioji būsenos komponentė:

$$v(t) = \{n_{lo}(t), n_{lc}(t), n_{ro}(t), n_{rc}(t)\}; \quad n_{lo}(t) = \overline{0, L}; \quad n_{lc}(t) = \overline{0, L}; \quad n_{lo}(t) + n_{lc}(t) = \overline{0, L};$$

$$n_{ro}(t) = \overline{0, R}; \quad n_{rc}(t) = \overline{0, R}; \quad n_{ro}(t) + n_{rc}(t) = \overline{0, R};$$

- čia $n_{lo}(t)$ - koneksinų, esančių „O“ būsenoje kairėje pusėje, skaičius;
 $n_{lc}(t)$ - koneksinų, esančių „C“ būsenoje kairėje pusėje, skaičius;
 $n_{ro}(t)$ - koneksinų, esančių „O“ būsenoje dešinėje pusėje, skaičius;
 $n_{rc}(t)$ - koneksinų, esančių „C“ būsenoje dešinėje pusėje, skaičius;
 L - koneksinų skaičius kairėje pusėje;
 R - koneksinų skaičius dešinėje pusėje.

7. Tolydžioji būsenos komponentė:

$$z_v(t) = \{w(e_1'', t), w(e_2'', t), w(e_3'', t), w(e_4'', t), w(e_5'', t), w(e_6'', t), w(e_7'', t), w(e_8'', t)\}.$$

8. Pradinė sistemos būseną:

$$z(t) = \{0, 0, 0, 0, < \infty, \infty, \infty, \infty, < \infty, \infty, \infty, \infty\}.$$

9. Vidinių perėjimų operatoriai:

$H(e_1'')$: / perėjimas iš „D“ į „C“ kairėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = n_{lo}(t);$$

$$n_{lc}(t+0) = \begin{cases} n_{lc}(t) + 1, & \text{jeigu } n_{lo}(t) + n_{lc}(t) < L, \\ n_{lc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{ro}(t+0) = n_{ro}(t);$$

$$n_{rc}(t+0) = n_{rc}(t);$$

$$w(e_1'', t+0) = \begin{cases} (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t) - 1) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) + n_{lc}(t) < L - 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_2'', t+0) = (n_{lc}(t) + 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)};$$

$$w(e_3'', t+0) = \begin{cases} n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_4'', t+0) = (n_{lc}(t) + 1) \cdot \lambda_{cd}^{(l)};$$

$$w(e_5^'', t+0) = \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_6^'', t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_7^'', t+0) = \begin{cases} n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_8^'', t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

$H(e_2^'')$: / perėjimas iš „C“ į „O“ kairėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = \begin{cases} n_{lo}(t) + 1, & \text{jeigu } n_{lc} > 0, \\ n_{lo}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{lc}(t+0) = \begin{cases} n_{lc}(t) - 1, & \text{jeigu } n_{lc} > 0, \\ n_{lc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{ro}(t+0) = n_{ro}(t);$$

$$n_{rc}(t+0) = n_{rc}(t);$$

$$w(e_1^'', t+0) = \begin{cases} (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) + n_{lc}(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_2^'', t+0) = \begin{cases} (n_{lc}(t) - 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_3^'', t+0) = (n_{lo}(t) + 1) \cdot \lambda_{oc}^{(l)};$$

$$w(e_4^'', t+0) = \begin{cases} (n_{lc}(t) - 1) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_5^'', t+0) = \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_6^'', t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_7^'', t+0) = \begin{cases} n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_8^'', t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

$H(e_3^'')$: / perėjimas iš „O“ į „C“ kairėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = \begin{cases} n_{lo}(t) - 1, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ n_{lo}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{lc}(t+0) = \begin{cases} n_{lc}(t) + 1, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ n_{lc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{ro}(t+0) = n_{ro}(t);$$

$$n_{rc}(t+0) = n_{rc}(t);$$

$$\begin{aligned}
w(e_1'', t+0) &= \begin{cases} (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) + n_{lc}(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_2'', t+0) &= (n_{lc}(t) + 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)}; \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} (n_{lo}(t) - 1) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= (n_{lc}(t) + 1) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}; \\
w(e_5'', t+0) &= \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_6'', t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_7'', t+0) &= \begin{cases} n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_8'', t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}
\end{aligned}$$

$H(e_4'')$: / perėjimas iš „C“ į „D“ kairėje pusėje/

$$\begin{aligned}
n_{lo}(t+0) &= n_{lo}(t); \\
n_{lc}(t+0) &= \begin{cases} n_{lc}(t) - 1, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ n_{lc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
n_{ro}(t+0) &= n_{ro}(t); \\
n_{rc}(t+0) &= n_{rc}(t); \\
w(e_1'', t+0) &= (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t) + 1) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}; \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} (n_{lc}(t) - 1) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= \begin{cases} (n_{lc}(t) - 1) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_5'', t+0) &= \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_6'', t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_7'', t+0) &= \begin{cases} n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_8'', t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}
\end{aligned}$$

$H(e_5'')$: / perėjimas iš „D“ į „C“ dešinėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = n_{lo}(t);$$

$$\begin{aligned}
n_{lc}(t+0) &= n_{lc}(t); \\
n_{ro}(t+0) &= n_{ro}(t); \\
n_{rc}(t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t)+1, & \text{jeigu } n_{ro}(t)+n_{lc}(t) < R, \\ n_{rc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_1'', t+0) &= \begin{cases} (L-n_{lo}(t)-n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t)+n_{lc}(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_5'', t+0) &= \begin{cases} (R-n_{ro}(t)-n_{rc}(t)-1) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t)+n_{rc}(t) < R-1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_6'', t+0) &= (n_{rc}(t)+1) \cdot \lambda_{co}^{(r)}; \\
w(e_7'', t+0) &= \begin{cases} n_{ro}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_8'', t+0) &= (n_{rc}(t)+1) \cdot \lambda_{co}^{(r)}.
\end{aligned}$$

$H(e_6'')$: / perėjimas iš „C“ į „O“ dešinėje pusėje/

$$\begin{aligned}
n_{lo}(t+0) &= n_{lo}(t); \\
n_{lc}(t+0) &= n_{lc}(t); \\
n_{ro}(t+0) &= \begin{cases} n_{ro}(t)+1, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ n_{ro}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
n_{rc}(t+0) &= \begin{cases} n_{rc}(t)-1, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ n_{rc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_1'', t+0) &= \begin{cases} (L-n_{lo}(t)-n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t)+n_{lc}(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_2'', t+0) &= \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_3'', t+0) &= \begin{cases} n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_4'', t+0) &= \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_5'', t+0) &= \begin{cases} (R-n_{ro}(t)-n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t)+n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_6'', t+0) &= \begin{cases} (n_{rc}(t)-1) \cdot \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases} \\
w(e_7'', t+0) &= (n_{ro}(t)+1) \cdot \lambda_{oc}^{(r)};
\end{aligned}$$

$$w(e_8'', t+0) = \begin{cases} (n_{rc}(t)-1) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

$H(e_7'')$: / perėjimas iš „O“ į „C“ dešinėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = n_{lo}(t);$$

$$n_{lc}(t+0) = n_{lc}(t);$$

$$n_{ro}(t+0) = \begin{cases} n_{ro}(t)-1, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ n_{ro}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$n_{rc}(t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t)+1, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 0, \\ n_{rc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_1'', t+0) = \begin{cases} (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) + n_{lc}(t) < L, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_2'', t+0) = \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{co}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_3'', t+0) = \begin{cases} n_{lo}(t) \cdot \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_4'', t+0) = \begin{cases} n_{lc}(t) \cdot \lambda_{cd}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lc}(t) > 0, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_5'', t+0) = \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t)) \cdot \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_6'', t+0) = (n_{rc}(t)+1) \cdot \lambda_{co}^{(r)};$$

$$w(e_7'', t+0) = \begin{cases} (n_{ro}(t)-1) \cdot \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_8'', t+0) = (n_{rc}(t)+1) \cdot \lambda_{cd}^{(r)}.$$

$H(e_8'')$: / perėjimas iš „C“ į „D“ dešinėje pusėje/

$$n_{lo}(t+0) = n_{lo}(t);$$

$$n_{lc}(t+0) = n_{lc}(t);$$

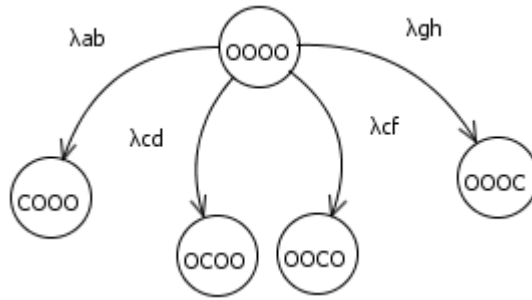
$$n_{ro}(t+0) = n_{ro}(t);$$

$$n_{rc}(t+0) = \begin{cases} n_{rc}(t)-1, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 0, \\ n_{rc}(t), & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

2.4 BŪSENŲ GRAFŲ GENERAVIMO METODAI

2.4.1 BŪSENOS KEITIMO PO ŽINGSNIUI METODAS

Grafo būseną G_s yra sudaryta iš naudojamo modelio kairiojo ir dešiniojo puskanalių būsenų. Grafo perėjimo lanko svoris λ – būsenos keitimo dažnis. Būsenų grafo pradinis generavimo žingsnis pavaizduotas (2.5 pav.).



2.5 pav. Būsenos keitimo po žingsniui būsenų grafas

Pažymėję kairiojo puskanalio koneksinų būseną X_l , o dešiniojo X_r gauname jog $G_s = X_l X_r$. Koneksinų galimų būsenų aibę pažymėkime $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$. Grafo būseną G_s turi vienodą skaičių išėjimo ir įėjimo lankų. Lankų skaičius priklauso nuo to, kiek kanalas turi koneksinų. Turėdami būseną G_{s_i} jai generuojame būsenas $G_{s_{i+1}} \dots G_{s_{i+n}}$, kur n – naujų būsenų kiekis. Kiekviena nauja būseną yra sudaroma keičiant puskanalio koneksino X_{l_i} arba X_{r_i} į jam priešingą būseną iš būsenų aibės S . Kiekviena būseną pereina į naują būseną su dažniu λ , kuris vėliau yra naudojamas stacionariųjų tikimybių skaičiavimuose.

Tarkime turime kanalą kurio kiekvienas puskanalis turi po 2 koneksinus, tuomet kiekvieno puskanalio pradinė būseną yra $X_l = "00"$ ir $X_r = "00"$. Grafo būseną $G_s = "0000"$. Ši būseną turės 4 išeinančius lankus ir 4 įeinančius lankus. Grafo generavimo eiga pavaizduota XX lentelėje.

2.2 lentelė. Būsenos keitimo po žingsniui grafo generavimo eiga

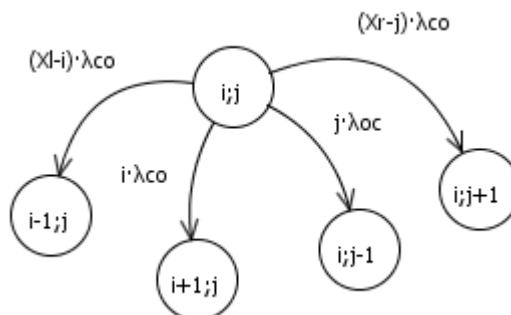
Pradinė būseną G_s	„0000“
G_{s_1}	„C000“
G_{s_2}	„0C00“
G_{s_3}	„00C0“
G_{s_4}	„000C“

Gautoms naujoms būsenoms taikomas tas pats principas tol, kol yra išgeneruojamos visos įmanomos būsenos.

Atsiradus naujai papildomai būsenai, algoritmas veikia taip pat. Atitinkamai būsenų skaičius priklausys nuo to, kiek modelis turi koneksinų ir kiek skirtingų kitimo būsenų jis turi.

2.4.2 BŪSENOS KEITIMAS PAGAL ATVIRŲ BŪSENŲ KIEKĮ METODAS

Grafo būseną G_s yra sudaryta iš naudojamo modelio kairiojo ir dešiniojo puskanalių koneksinų atvirų būsenų skaičiaus. Grafo perėjimo lanko svoris – būsenos keitimo dažnis. Grafo būsenų generavimas pavaizduotas (2.6 pav.).



2.6 pav. Būsenos keitimo pagal atvirų būsenų kiekį būsenų generavimo grafas

Pažymėję kairiojo puskanalio koneksinų atviras būsenas X_l , o dešiniojo X_r gauname jog $G_s = X_l; X_r$. Grafo būseną G_s gali turėti nuo 2 iki 4 išėjimo ir įėjimo lankų. Lankų skaičius nepriklauso nuo to, kiek kanalas turi koneksinų. Turėdami būseną G_{s_i} jai generuojame būsenas, atitinkamai uždaroje ir atidaroje tiek kairiojo tiek dešiniojo puskanalio koneksinus. Kiekviena būseną pereina į naują būseną su atitinkamais dažniais $(X_l - i) \cdot \lambda_{co}$ – jei vienas kairiojo puskanalio koneksinas užsidarė, $i \cdot \lambda_{co}$ – jei vienas kairiojo puskanalio koneksinas atsidarė, $(X_r - j) \cdot \lambda_{oc}$ – jei vienas dešiniojo puskanalio koneksinas užsidarė, $j \cdot \lambda_{oc}$ – jei vienas dešiniojo puskanalio koneksinas atsidarė, kurios vėliau yra naudojamas stacionariųjų tikimybių skaičiavimuose.

Tarkime turime kanalą kurio kiekvienas puskanalis turi po 2 koneksinus, tuomet kiekvieno puskanalio pradinė būseną yra $X_l = 1$ ir $X_r = 1$. Grafo būseną $G_s = "1;1"$. Ši būseną turės 4 išeinančius lankus ir 4 įeinančius lankus. Grafo generavimo eiga pavaizduota XX lentelėje.

2.3 lentelė. Būsenos keitimo pagal atvirų būsenų kiekį grafo generavimo eiga

Pradinė būseną G_s	„1;1“
G_{s_1}	„0;1“
G_{s_2}	„2;1“
G_{s_3}	„1;2“
G_{s_4}	„1;0“

Gautoms naujoms būsenoms taikomas tas pats principas tol, kol yra išgeneruojamos visos įmanomos būsenos.

Šiek tiek modifikavus šį algoritmą, jį galima pritaikyti ir trijų būsenų grafams generuoti. Trijų būsenų grafą stebimas yra pagal 6 kriterijus. Trys kriterijai yra skirti kairiajai pusei, likę trys – dešiniajai. Šie kriterijai tai: kiek generuojama būseną turi „O“, „C“ ir „D“ būsenų.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1. PLYŠINĖS JUNGTIŲ MODELIŲ BENDRIEJI PARAMETRAI

Kad galima būtų atlikti laidžių skaičiavimus, pasirenkamos reikšmės parametru, apibūdinančių konksinų būsenų kitimo savybes visiems modeliams vienodi.

3.1 lentelė. Pasirinktų parametru reikšmės puskanalio visiems konksinams

Parametras	Reikšmė
A	0,1
Gc	0,1
Go	1
K	0,1
P	±
Rc	±1000000
Ro	±1000000
V0	40

P – poliškumas, priklauso nuo puskanalio poliškumo, kairysis puskanalis yra „+“ poliškumo, dešinysis – „-“.

3.2 lentelė. Simuliatoriaus parametrai

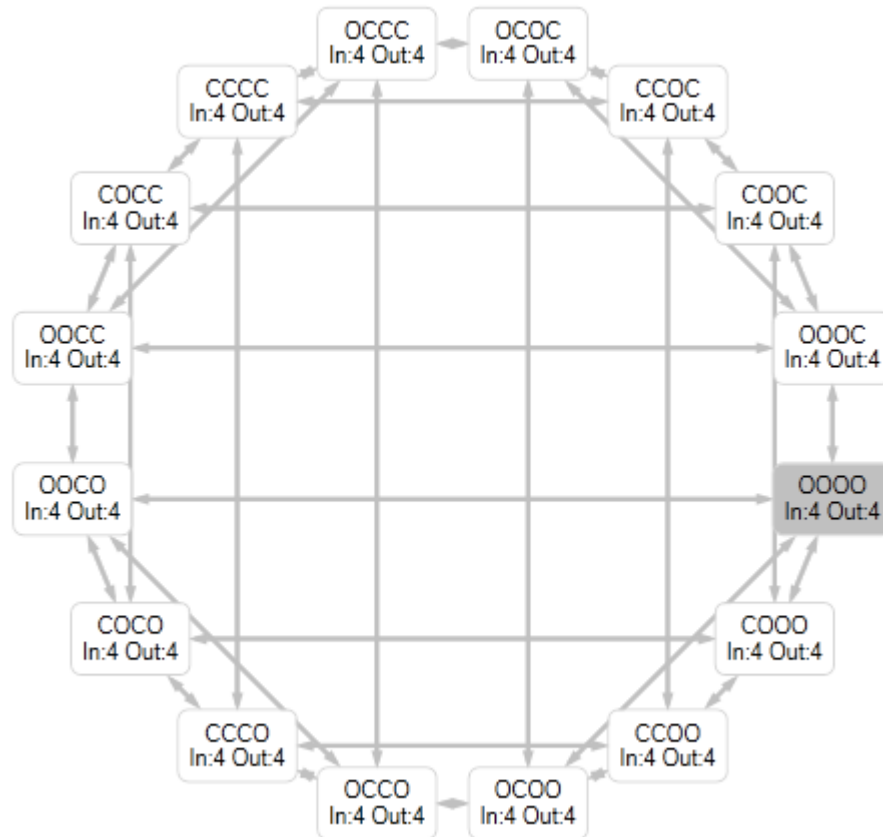
Parametras	Reikšmė
Simuliacijos iteracijų kiekis kol konksinai pasieks nusistovėjusią būseną	7
Konksino užsibuvimo laikas	0,2
Įtampos intervalo pradžia	-100
Įtampos intervalo pabaiga	100
Įtampos žingsnis	10

Pastaba: Išgeneruotame grafe pilka spalva pažymėta grafo viršūnė reiškia pradinę būseną t.y. būseną nuo kurios buvo išgeneruotos visos kitos grafo būsenos.

3.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS

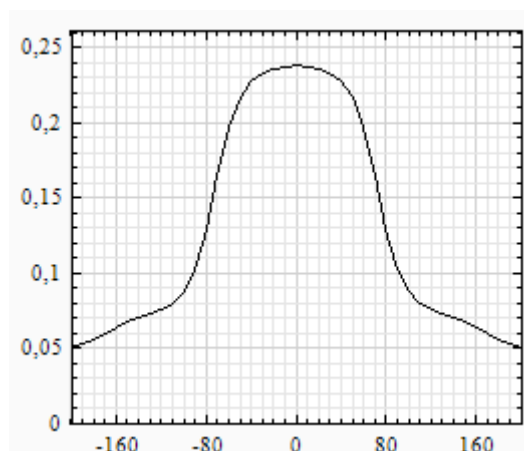
3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.1 pav.). Šis grafas turi 16 viršūnių, ir 64 lankus.



3.1 pav. 4 konekcinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.2 pav.).

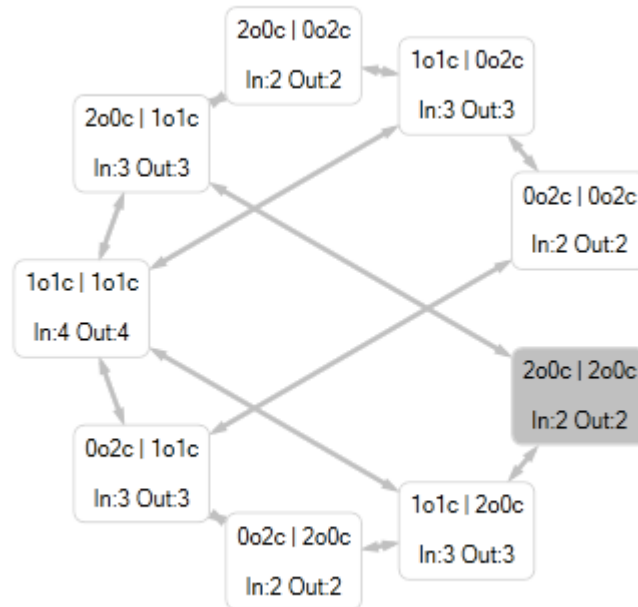


3.2 pav. Plyšinės jungties 4 konekcinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas.

Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

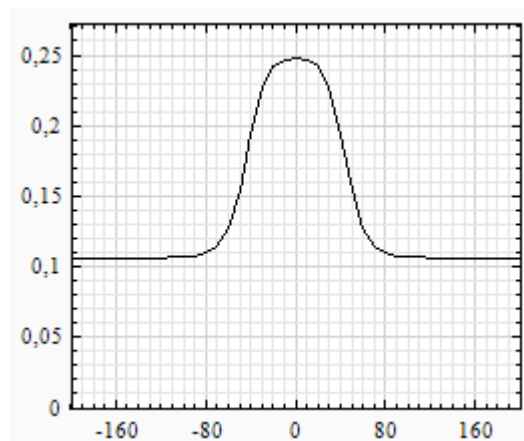
3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ II MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.3 pav.). Šis grafas turi 9 viršūnes ir 24 lankus.



3.3 pav. 4 konekcinų 2 būsenų (II) modelio būsenų grafas

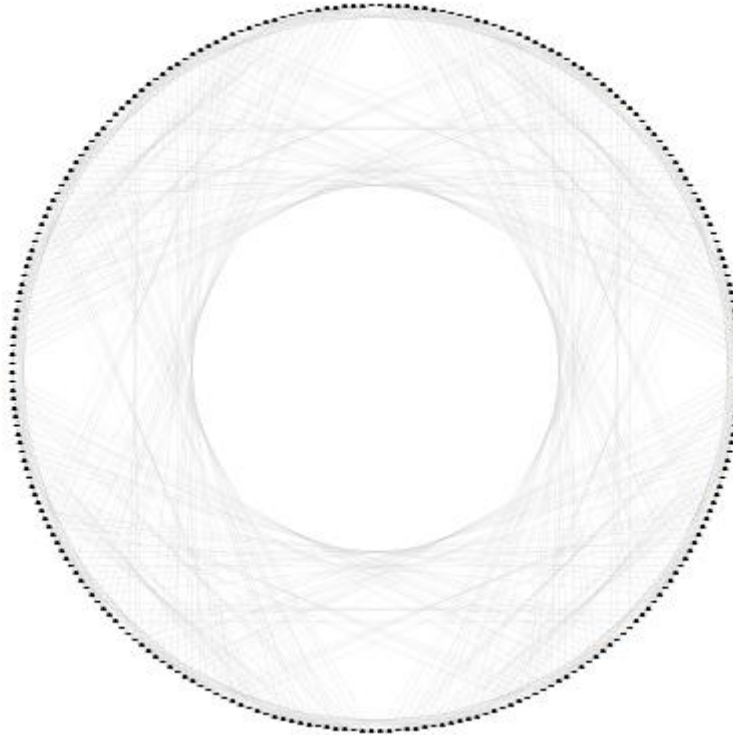
Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.4 pav).



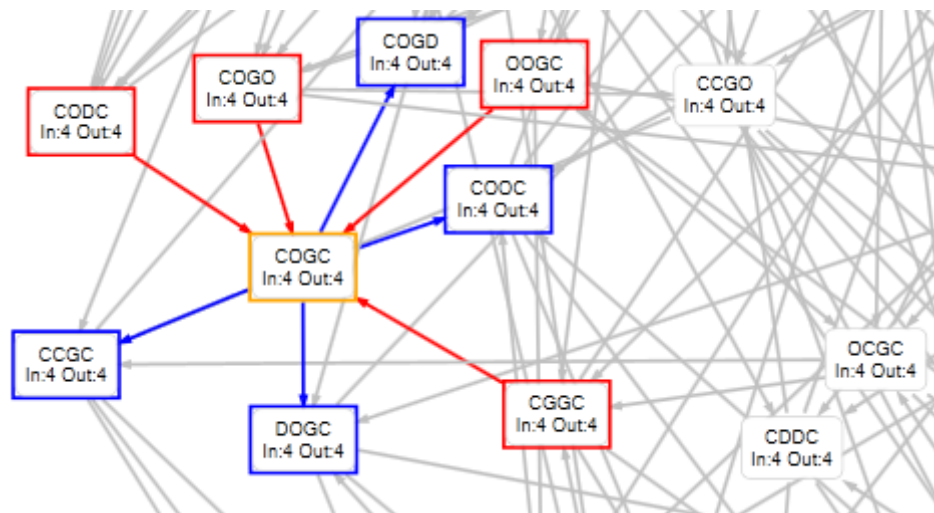
3.4 pav. Plyšinės jungties 4 konekcinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.5 pav). Šis grafas turi 256 viršūnes ir 1024 lankus.

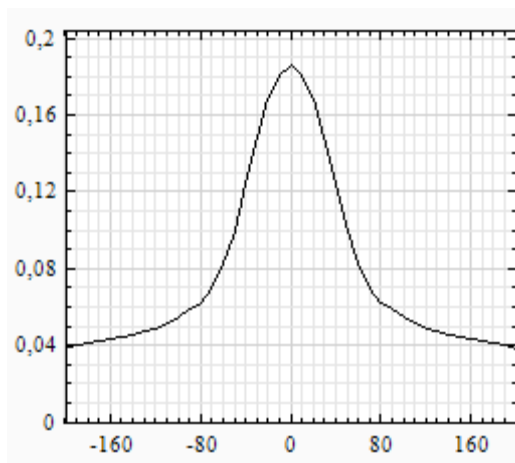


3.5 pav. 4 koneksinių trijų būsenų modelio grafas



3.6 pav. 4 koneksinių trijų būsenų grafo fragmentas

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.7 pav.).

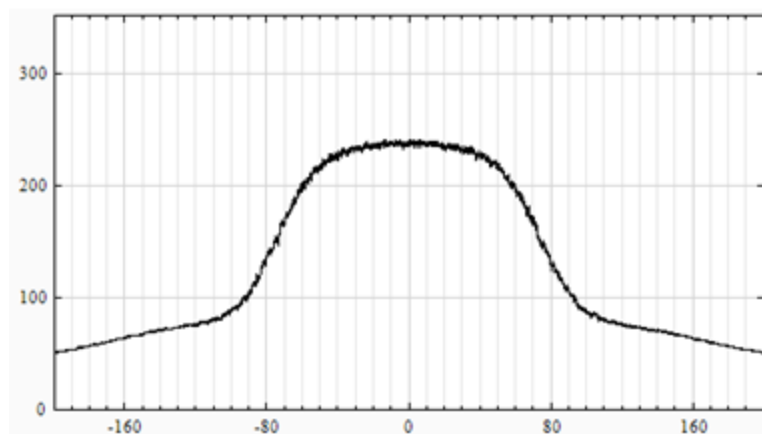


3.7 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom.

3.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ IR IMITATORIŲ REZULTATAI

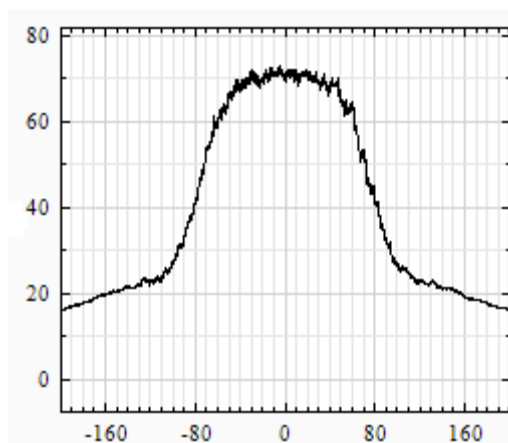
Imitatorius – tai programa kuri imituoja plyšinę jungtį. Imitatoriui buvo parinkti tokie pat parametrai kaip ir tiriamų modelių. Buvo naudojami du imitatoriai. Pirmas imitatorius kuris yra vis dar kuriamas ir tobulinimas Nerijaus Paulausko. Antrasis imitatorius kuris buvo sukurtas Nerijaus Paulausko ir Sauliaus Vaičeliūno 2010 metais.

Pirmojo imitatoriaus laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas yra pavaizduotas (3.8 pav).



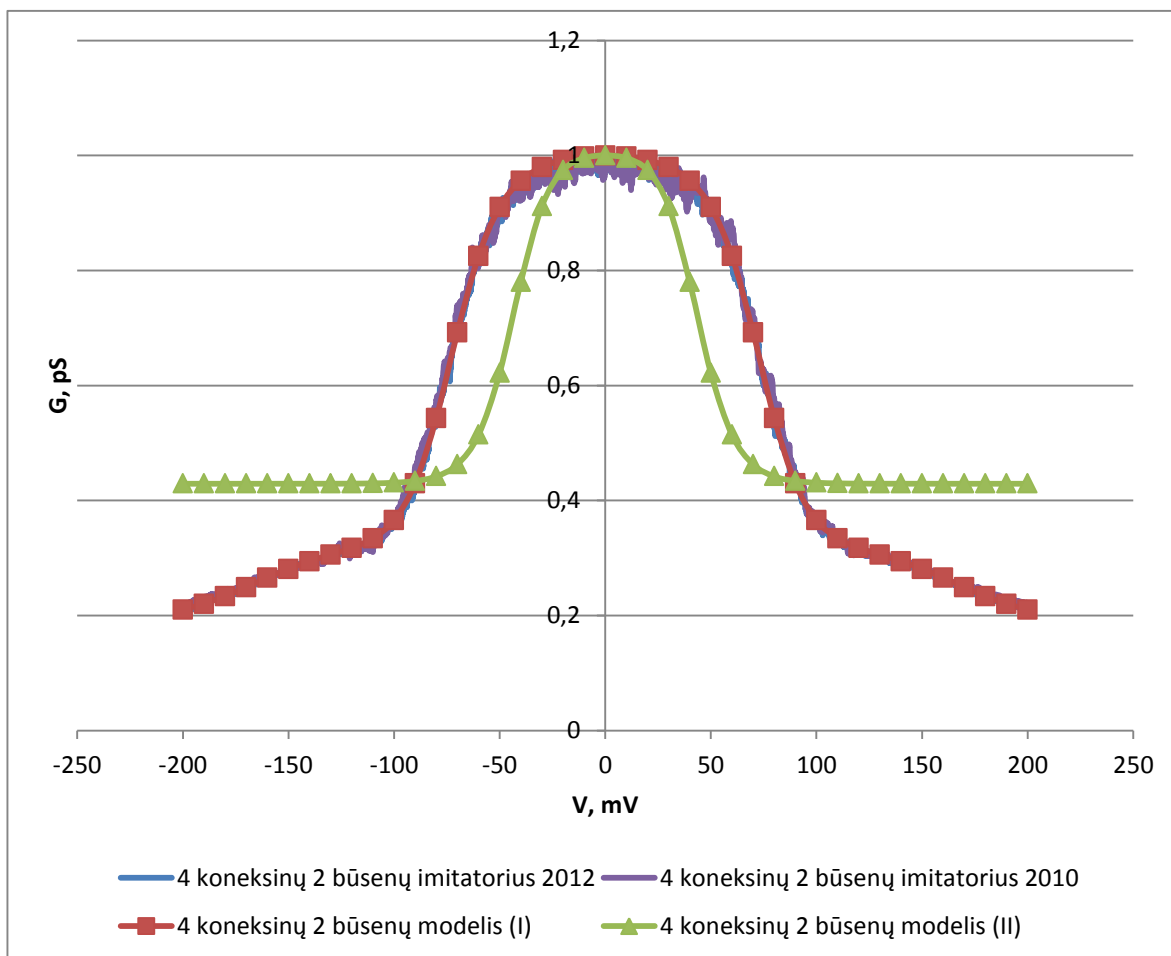
3.8 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom. Panaudotas 2012 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius

Antrojo imitatoriaus laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas yra pavaizduotas (3.8 pav)



3.9 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų plyšinės jungties laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom. Panaudotas 2010 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius

Bendras 4 koneksinų dviejų būsenų modelių ir imitatorių laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas pavaizduotas (3.10 pav).



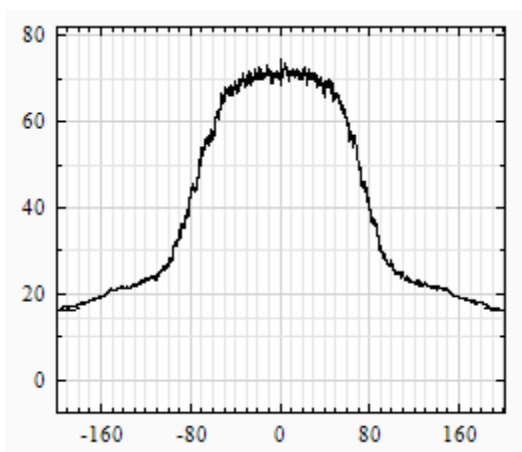
3.10 pav. Bendras 4 koneksinų dviejų būsenų modelių ir imitatorių plyšinės jungties laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas

Iš grafiko galima matyti, jog pirmo ir antro imitatoriaus laidumo priklausomybė nuo įtampos grafikai sutampa su pirmo modelio grafiku. Iš gautų duomenų galima daryti išvadą jog pirmas modelis veikia korektiškai. Grafike aiškiai matyti jog antro modelio gauta laidžio priklausomybė nuo įtampos nesutampa nei su imitatorių nei su pirmo modelio duomenimis. Šie duomenys gali nesutapti dėl kelių priežasčių.

Viena iš jų galėtų būti ta, jog nesutapimas atsiranda dėl to, kad būsenų grafas nepadengia visų galimų būsenų. Pirmajame modelyje būsenų grafas turi 16 būsenų, tuo tarpu antrasis modelis turi tik 9. Antrajame modelyje kai kurios būsenos yra traktuojamos kaip ta pati būseną. Antrajame modelyje, visi koneksinai yra vienodi, tuo tarpu pirmajame modelyje kairiojo puskanalio koneksinai skiriasi nuo dešinės pusės koneksinų, nes dešinė pusė yra poliškai neigiama.

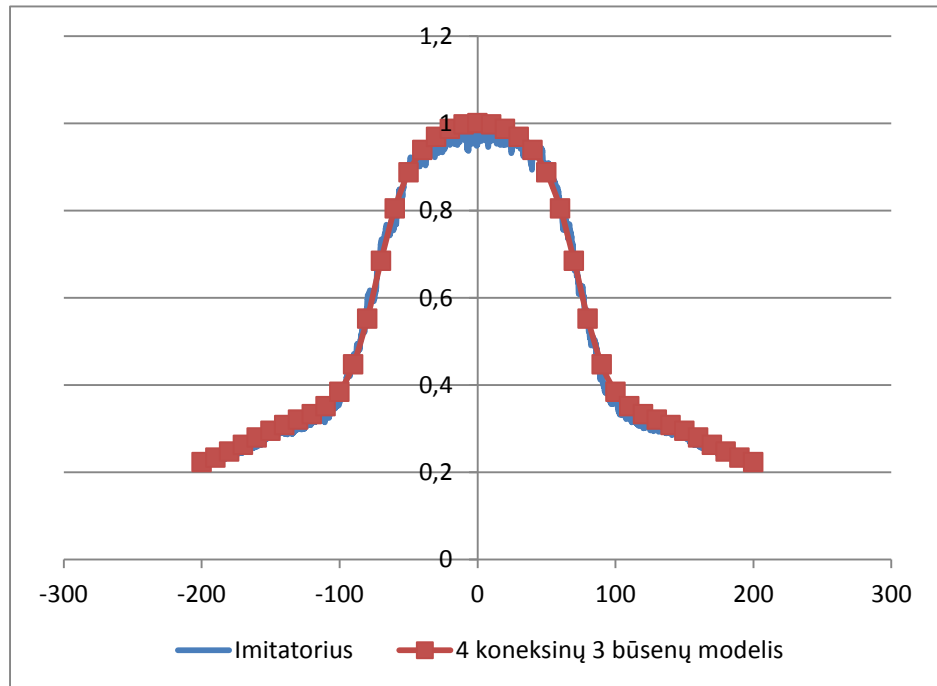
Antroji priežastis gali būti ta, jog sukurtas modelis gali turėti netikslumų skaičiuojant ar priskiriant tikimybes atitinkamoms grafo būsenoms.

Keturių koneksinų trijų būsenų imitatoriaus plyšinės jungties laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.11 pav).



3.11 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom. Panaudotas 2010 metais sukurtas plyšinės jungties imitatorius

Bendras 4 koneksinų dviejų būsenų modelių ir imitatorių laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas pavaizduotas (3.12 pav). Kaip galima matyti iš pateikto grafiko, imitatoriaus ir modelio gauti rezultatai sutampa idealiai.



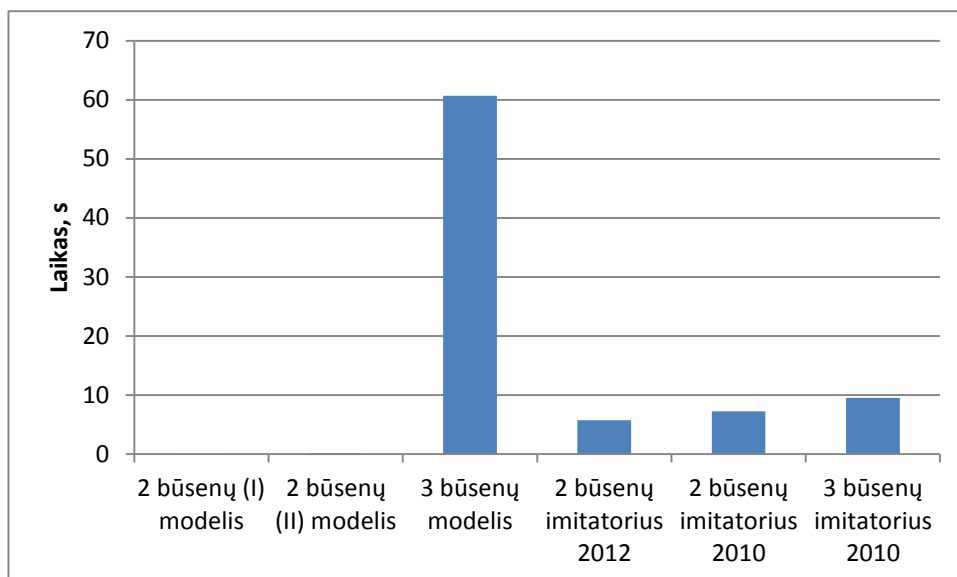
3.12 Bendras 4 koneksinų trijų būsenų modelio ir imitatoriaus plyšinės jungties laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas

3.2.5 PLYŠINĖS JUNGTIOS 4 KONEKSIŲ MODELIŲ VEIKIMO GREIČIŲ Palyginimas

Modelių ir imitatorių veikimo greičiu lentelė pavaizduota (3.3 lentelė), o diagrama (3.13 pav).

3.3 lentelė. 4 koneksinų modelių ir imitatorių vykdymo greičiai

2 būsenų (I) modelis	0,0629589s
2 būsenų (II) modelis	0,1369539s
3 būsenų modelis	60.6928997s
2 būsenų imitatorius 2012	5,716327
2 būsenų imitatorius 2010	7,2366874s
3 būsenų imitatorius 2010	9,521357s

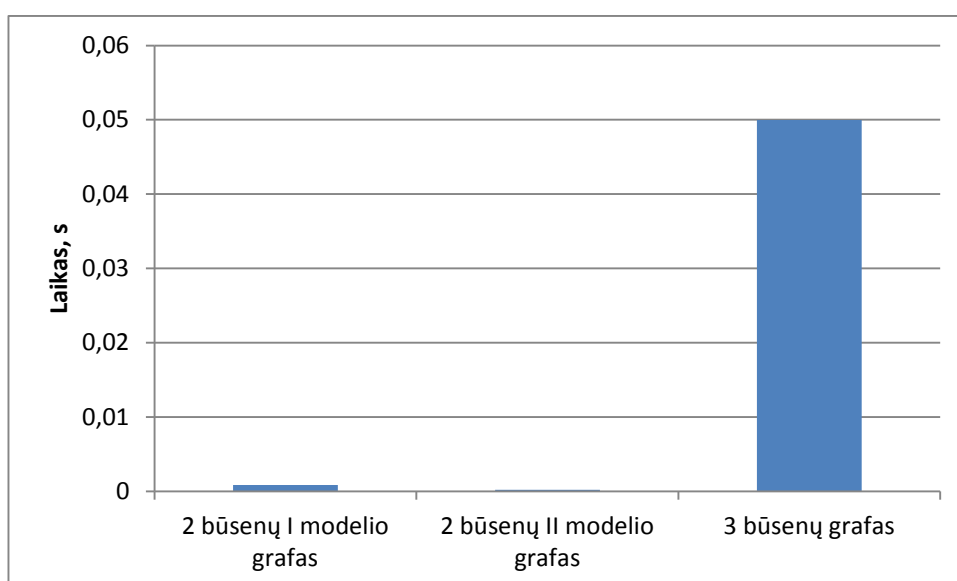


3.13 pav. 4 koneksinų modelių ir imitatorių vykdymo laikų palyginimo diagrama

Būsenu grafo generatoriaus veikimo greičiai pavaizduoti (3.4 lentelė), o diagrama (3.14 pav.). Kaip galima pastebėti iš pateiktos diagramos, 4 koneksinų 2 būsenu (II) modelio grafas yra išgeneruojamas greičiau, taip atsitinka todėl, kad jis turi tik devynias būsenas, tuo tarpu 4 koneksinų 2 būsenu (I) modelis turi 16, o 3 būsenu – 256 būsenas.

3.4 lentelė. 4 koneksinų būsenu grafo generatorių veikimo greičiai

2 būsenu I modelio grafas	0,0008322s
2 būsenu II modelio grafas	0,0002094s
3 būsenu grafas	0,0499623s

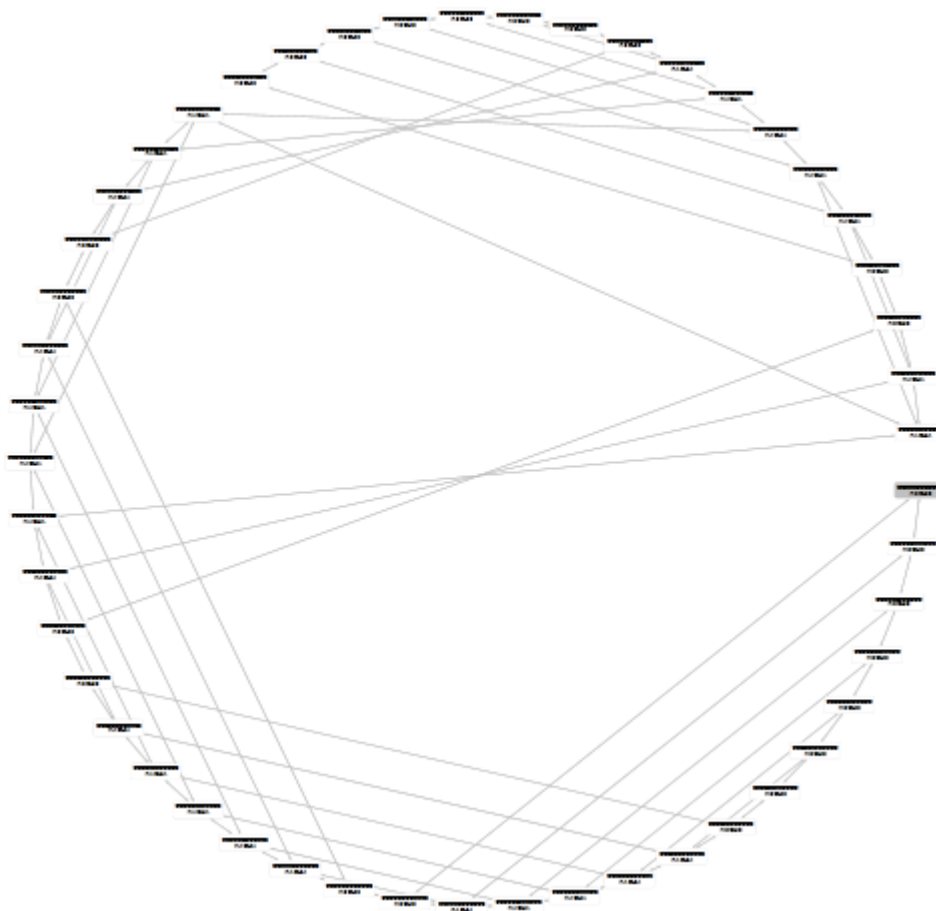


3.14 pav. 4 koneksinų būsenu grafo generatorių veikimo laikų palyginimo diagrama

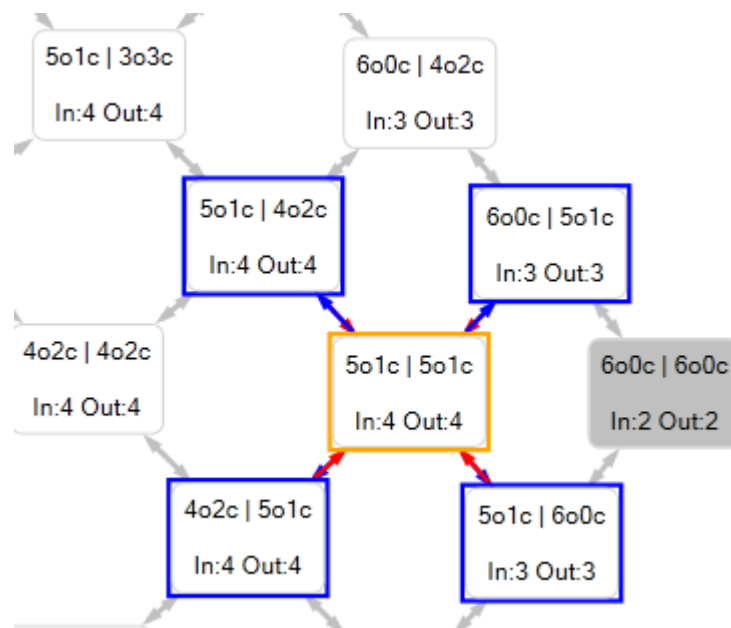
3.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS

3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.15 pav.). Šis grafas turi 49 būsenas ir 168 lankus. Šiam modeliui buvo pritaikytas 2.4.2 skyriuje aprašytas būsenų generavimo algoritmas, nes taikant 2.4.1 skyriuje aprašytą algoritmą, tuomet grafas turi 4096 būsenas ir 49152 lankus. Problema iškyla atvaizduojant grafą, nes grafo vaizdavimo biblioteka nesugeba atvaizduoti tokio kiekio objektų vienu metu. Taipogi, turint tokį kiekį būsenų, modelio skaičiavimo greitis išaugtu, o tai yra blogai, nes kuriant Markovo procesais paremtus modelius yra siekiama pasiekti kuo greitesnį modelių veikimą.

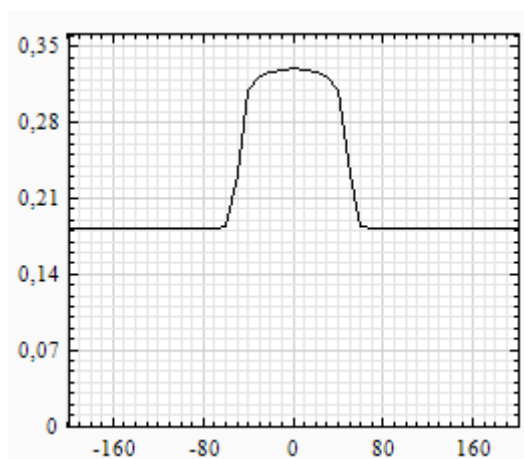


3.15 pav. 12 konekstinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas



3.16 .pav. 12 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafo fragmentas

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.17 pav).

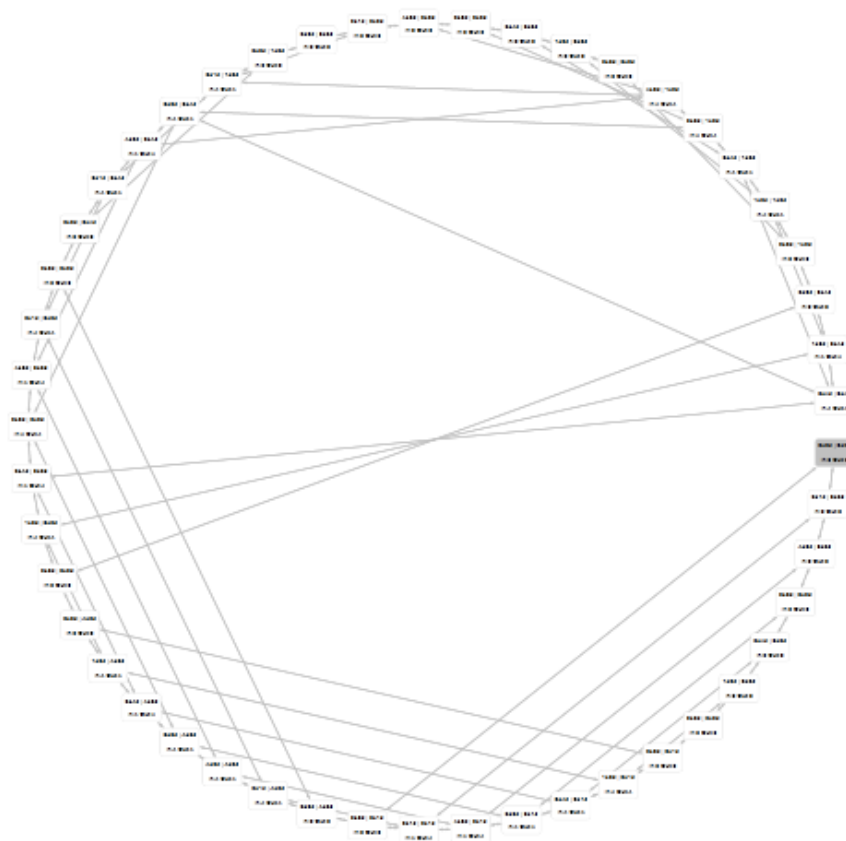


3.17 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas.

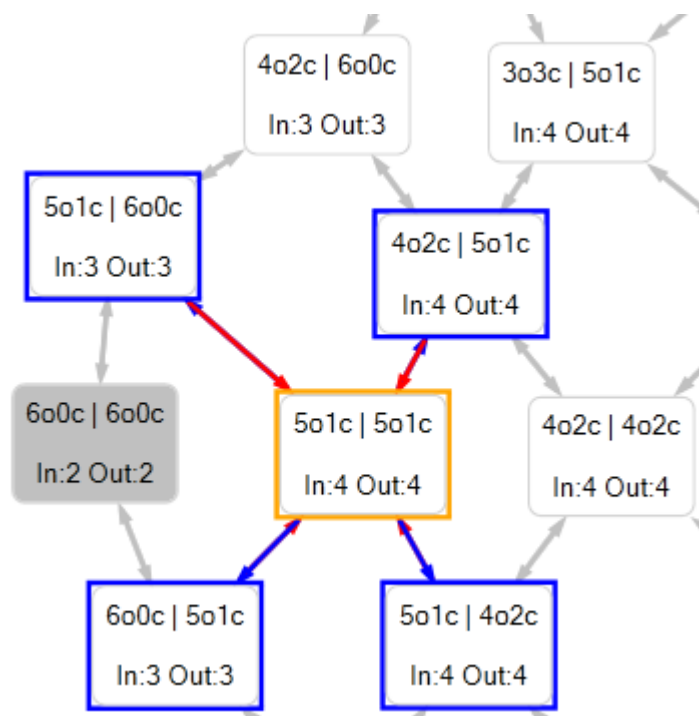
Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ II MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.18 pav). Šis grafas turi 49 būsenas ir 168 lankus.



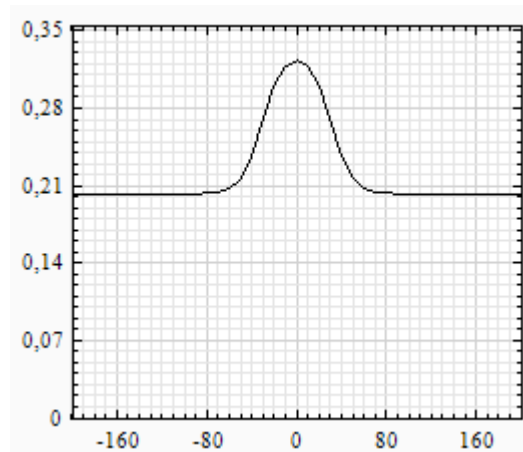
3.18 pav. 12 koneksinų (II) modelio būsenų grafas



3.19 12 koneksinų trijų būsenų grafo fragmentas

Iš grafo fragmento, kuris yra pateiktas (3.19 pav.) aiškiai galima matyti kaip vyksta būsenų perėjimai. Fragmente pasirinkta būseną turi keturis išėjimų ir keturis įėjimų lankus. Vizualiai aiškiai galima matyti į kurias būsenas ji pereina ir kurios būsenos pereina į ją.

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.20 pav.).

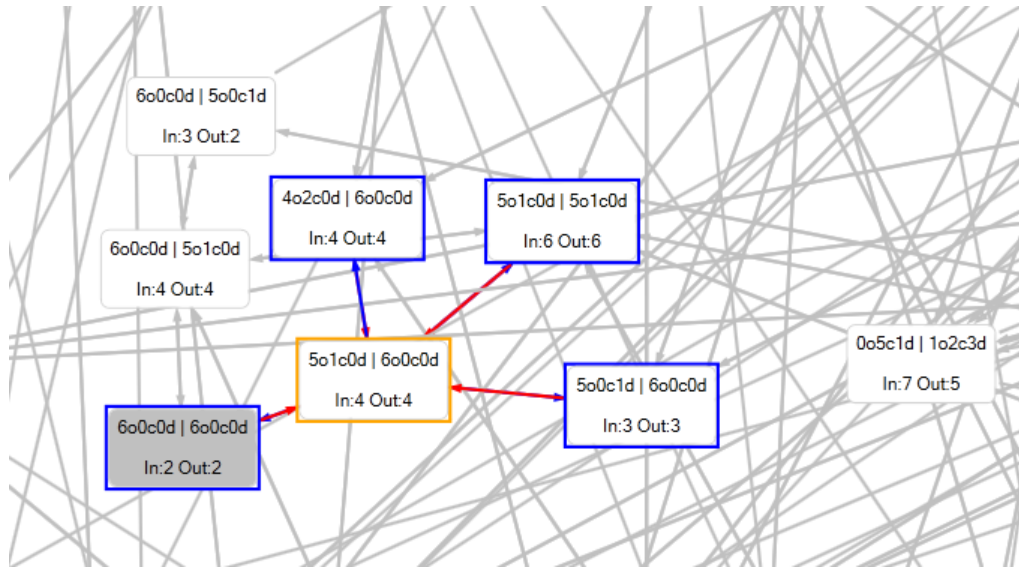


3.20 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas.

Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

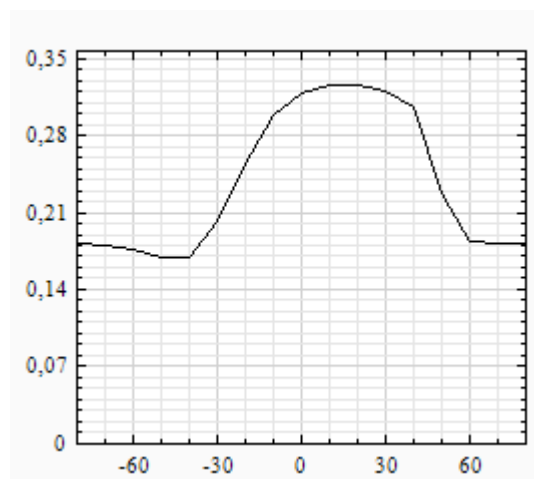
3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.21 pav). Šis grafas turi 784 būsenas ir 4560 lankus.



3.21 pav. 12 konekcinų 3 būsenų modelio dalinis būsenų grafas

Šis modelis nėra užbaigtas, nes problema iškyla sugeneruoto grafo pritaikyme sukurtam modeliams. (3.21 pav.) pateikiamas tik dalinis grafas.

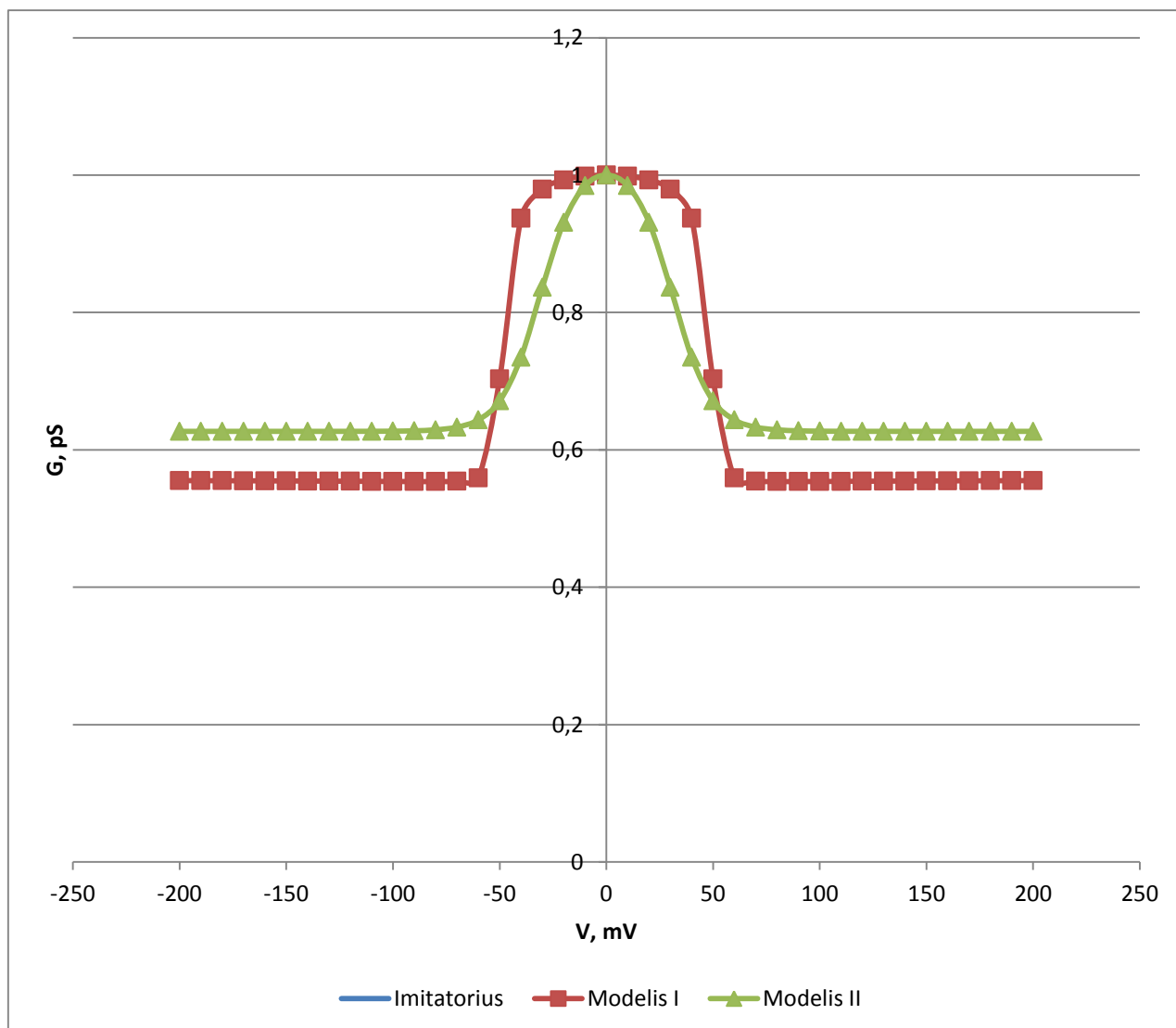


3.22 pav. Plyšinės jungties 12 konekcinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas.

Koneksinas modeliuojamas trim būsenom

3.2.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ MODELIŲ REZULTATAI

Bendras I ir II modelių laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.23 pav).



3.23 pav. Bendras 12 konekinių modelių plyšinės jungties laidžio priklausomybių nuo įtampų grafikas

Iš grafiko galima matyti jog pirmo ir antro modelių rezultatai nesutampa. Čia galime pastebėti lygiai tokį patį nesutapimą, kuris buvo pastebėtas tarp 4 konekinių pirmojo ir antrojo modelių grafikų. Galima daryti prielaidą, jog ir čia antrasis modelis gali turėti klaidų kaip ir 4 konekinių II modelis.

12 konekinių 2 būsenų I modelio korektiškumo negalime palyginti su imitatoriumi, nes toks imitatorius dar nėra sukurtas. Galima tik teoriškai teigti jog galbūt šis modelis ir yra korektiškas.

12 koneksinų 3 būsenų modelio korektiškumo taipogi negalime patikrinti, nes nėra sukurto imitatoriaus kuris imituotu 12 koneksinų 3 būsenų kanalo veikimą. Todėl ir čia galima teoriškai samprotauti jog galbūt šis modelis yra korektiškas, tačiau remiantis 4 koneksinų pirmuoju modeliu, galima daryti išvadą, jog šis modelis yra nekorektiškas, nes jo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas neturi simetriškai lenktos varpo formos. Iš praktikos, teorinis 3 būsenų koneksinų veikimas, turėtų labai neženkliai pakeisti varpo formą.

Skirtingai nuo 12 koneksinų 2 būsenų grafų, 12 koneksinų 3 būsenų grafas turi gan daug, būsenų, o tai įtakoja modelio skaičiavimo laiką. Skaičiuojant nuo -200 mV iki 200 mV , kai įtampos kitimas yra 10 mV , modelis skaičiavimus vykdo apie 40 minučių, o tai yra gan ilgas vykdymo laikas, lyginant su 4 koneksinų 3 būsenų modeliu, kurio skaičiavimai yra įvykdomi per nepilnas 10 sekundžių.

4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA IR INSTRUKCIJA VARTOTOJUI

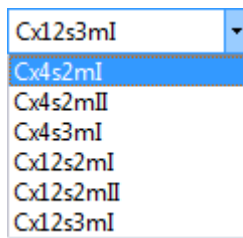
4.1 PROGRAMINĖ REALIZACIJA

Buvo sukurta magistro darbe aprašytų modelių realizacinė programa. Programinės realizacija yra parašyta naudojant C# programavimo kalbą, nes programos modeliai turėjo būti lengvai integruojami į į kuriamų imitatorių bibliotekas.



Panaudota ir praplėsta veiksmų su matricomis biblioteka, kuriai reikėjo papildomų funkcijų matricų skaičiavimuose^[9]. Sukurtas ir praplėstas grafų generatorius, panaudota Graph# biblioteka sugeneruotų grafų atvaizdavimui^[8].

4.2 VARTOTOJO INSTRUKCIJA

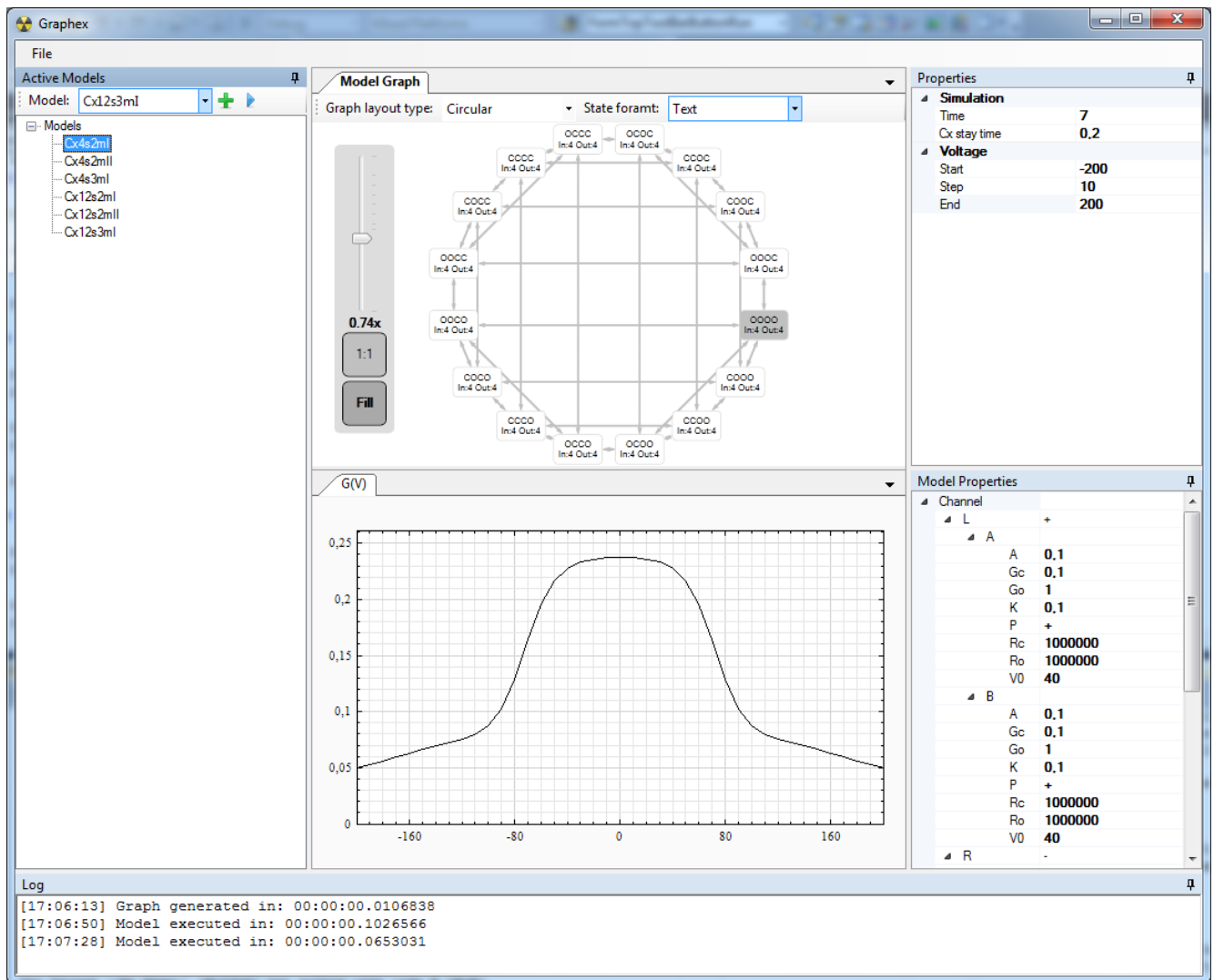
„Graphex“ programos langas pateiktas (4.1 pav). Programos langas yra suskirstytas blokais. „Active models“ blokas leidžia vartotojui prisidėti pasirinktus modelius į modelių medį.



4.1 pav. Modelių pasirinkimo sąrašas

Pasirinkus norimą modelį iš sąrašo (4.1 pav), jis yra pridamas į modelių medį paspaudus žalią  mygtuką, o modelio simuliacijos paleidimas yra įvykdomas paspaudus mėlyną trikampio formos mygtuką . Iš modelių medžio pasirinktus modelius galima peržiūrėti pelytės paspaudimu, keisti jų parametrus ir vykdyti iš naujo. „Log“ bloke, yra pateikiama informacija apie tai, kiek laiko užtruko modelio grafo generavimas ir modelio simuliacija.

Įvykdžius modelį su norimais parametrais, programa vartotojui atvaizduoja sugeneruotą grafą ir laidžio priklausomybės nuo įtampos grafiką.



4.2 pav. „Graphex“ programos langas

4.3 PROGRAMOS PANAUDOJIMAS KITUOSE PROGRAMUOSE

„Graphex“ bibliotekų panaudojimas galimas dviem būdais:

1. Kuriamoje naujoje programoje, įsikelti reikalingus „.dll“ failus, susikurti reikiamus objektus ir su jais atlikti veiksmus.
2. Keturių koneksinų (I) modelyje yra realizuotas metodas (ang. *Interface*), pritaikytas Nerijaus Paulausko kuriamam imitatoriui, kurio pagalba imitatorius gali vykdyti šį modelį.

IŠVADOS

Magistriniame darbe pateikiama plyšinės jungties Markovo modelių metodika, būsenų grafų generatorių metodai, perėjimo tikimybių skaičiavimas prie skirtingų būsenų grafų, kurių dėka galima skaičiuoti plyšinės jungties laidumo priklausomybę nuo įtampos. Sukurti būsenų grafų generatoriai ir įgyvendinti plyšinės jungties modeliai kurie remiasi Markovo procesais. Sukurta programa, kuri įgyvendina šiame darbe aprašytus modelius.

Lyginant gautus modelių vykdymo rezultatus su imitacinio modeliavimo rezultatais parodyta, kad 4 koneksinų 2 būsenų modelis ir 4 koneksinų 3 būsenų modelis, išduoda tokias pat plyšinės jungties laidumo priklausomybes prie lyginamų įtampų.

Lyginant modelio ir imitatoriaus vykdymo laikus, parodyta, jog Markovo procesu modeliuojamas modelis yra apie 100 kartų greitesnis už imitacinį modelio modeliavimą.^[6]

Taipogi, kaip galima pastebėti iš modelio vykdymo laikų, prie didesnių koneksinų kiekio, būsenų grafai tampa gan dideli, o tai turi didelę įtaką modelių veikimo greičiams. Jei modelis turi didelį koneksinų skaičių ir kiekvienas koneksinas yra aprašomas daugiau nei 2 būsenomis, tuomet modelio veikimas ženkliai pailgėja, nes modelis turi atlikti gan didelį skaičiavimų kiekį.

Kadangi tuo metu kai buvo rašomas magistro darbas, dar nėra sukurtų 12 koneksinų 2 ir 3 būsenų imitatorių, todėl darbe pateikta tik Markovo procesais modeliuojami modeliai. Ateityje yra numatyta kurti ne tik 12 koneksinų imitatorius, bet ir imitatorius kurie galētu tiksliai išduoti sukurtų Markovo procesu modeliuojamų modelių adekvatumą.

LITERATŪRA

1. A stochastic four-state model of contingent gating of gap junction channels containing two 'fast' gates sensitive to transjunctional voltage. Paulauskas, N., Pranevicius, M., Pranevicius, H., Bukauskas, F. Biophysical J. 96:3936-48 (2009). Internetinė nuoroda: <http://connexons.aecom.yu.edu/Publications/Paulauskas%20et%20al%20BJ%202009.pdf>
2. Imitacinis tarpląstelinių plyšinių jungčių vartinio mechanizmo priklausomybės nuo įtampos modeliavimas. Mindaugas Pranevičius, Feliksas Bukauskas, Henrikas Pranevičius, Nerijus Paulauskas, 2002.
3. Ye Chen-Izu, Alonso P. Moreno, Robert A. Spangler. Opposing gates model for voltage gating of gap junction channels. 2001.
4. Markovian Model of the Voltage Gating of Connexin-based Gap Junction Channels. Aurelija Sakalauskaitė, Henrikas Pranevičius, Feliksas Bukauskas, Mindaugas Pranevičius. Electronics and Electrotechnics, No. 5 (111), p. 103-106, 2011. Internetinė nuoroda: http://www.ee.ktu.lt/journal/2011/05/24_ISSN_1392-1215_Markovian%20Model%20of%20the%20Voltage%20Gating%20of%20Connexin.pdf
5. Mathematical model of vertebrate gap junctions derived from electrical measurements on homotypic and heterotypic channels. Rolf Vogel and Robert Weingart. Journal of Physiology, No. 510.1, p. 177-189, 1998. Internetinė nuoroda: <http://jp.physoc.org/content/510/1/177.full.pdf>
6. Stochastic 16-State Model of Voltage Gating of Gap-Junction Channels Enclosing Fast and Slow Gates. Nerijus Paulauskas, Henrikas Pranevicius, Jonas Mockus, and Feliksas F.
7. Bukauskas. Biophysical J. (2012).
8. Graph# grafų atvaizdavimo biblioteka, nuoroda internete: <http://graphsharp.codeplex.com>
9. C# operacijų su matricomis biblioteka, nuoroda internete: <http://www.codeproject.com/Articles/51470/Advanced-Matrix-Library-in-C-NET>

PRIEDAI

Kompaktinis diskas su programos išeities kodais ir magistro darbu