



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**Eglė Kulvinskaitė**

**LĄSTELIŲ PLYŠINĖS JUNGTIES**  
**MODELIAVIMAS NAUDOJANT MARKOVO PROCESUS**

**Baigiamasis magistro projektas**

**Vadovas**  
**prof. habilituotas daktaras Henrikas**  
**Pranevičius**

**KAUNAS, 2015**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**Eglė Kulvinskaitė**

**LĄSTELIŲ PLYŠINĖS JUNGTIES**  
**MODELIAVIMAS NAUDOJANT MARKOVO PROCESUS**

**Baigiamasis magistro projektas**  
**Magistro baigiamasis darbas P000M016**

**Vadovas**  
**prof . habil. Dr.**  
**Henrikas Pranevičius**  
**2015 05 22**

**Recenzentas**  
**Doc. dr. Dalius Makackas**

**Projektą atliko**  
**Eglė Kulvinskaitė**  
**2015 06 05**

**KAUNAS, 2015**



**Eglė Kulvinskaitė Modelling of the Gap Junction Cells using Markov processes: Master's work in applied mathematics science / supervisor habil. dr. prof. H. Pranevičius; Department of Applied mathematics, Faculty of Fundamental Sciences, Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2015. – 44 p.**

## SUMMARY

This paper describes methodology of composing Markov process models of gap junction cells are introduced. It contains state graphs generation, counting the 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.....	6
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
ĮVADAS .....	8
1. ANALITINĖ DALIS.....	9
1.1 PLYŠINĖS JUNGTIŠ FORMUOJANČIŲ KONEKSIŲ STRUKTŪRA IR FUNKCIJOS..	9
1.2 TARPLAŠTELINĖS PLYŠINĖS JUNGTIŠ MODELIAI.....	10
1.3 PLYŠINĖS JUNGTIŠ MODELIS.....	13
1.4 PLYŠINĖS JUNGTIŠ TOLYDAUS LAIKO MARKVO PROCESŲ MODELIAI .....	15
1.4.1 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (I).....	15
1.4.2 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II) .....	19
1.4.3 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS.....	20
1.4.4 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS.....	20
1.4.5 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II) .....	22
2. METODOLOGINĖ DALIS.....	23
2.1 PLYŠINĖS JUNGTIŠ MODELIŲ PLA SPECIFIKACIJA.....	23
2.1.1 DVIEJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA.....	23
2.1.2 TRIJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA.....	25
2.2 BŪSENŲ GRAFŲ GENERAVIMO METODAI.....	32
2.2.1 BŪSENOS KEITIMO PO ŽINGSNIUI METODAS.....	32
3. TIRIAMOJI DALIS .....	33
3.1.PLYŠINĖS JUNGTIŠ MODELIŲ BENDRIEJI PARAMETRAI.....	33
3.2 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS.....	35
3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS.....	35
3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ II MODELIO TYRIMAS.....	36
3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS.....	37
3.3 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 12 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS.....	40
3.3.1 PLYŠINĖS JUNGTIŠ 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS.....	40
3.4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA .....	42
IŠVADOS.....	43
LITERATŪRA.....	44

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Koneksinų įgyjamų reikšmių lentelė .....	16
2.1 lentelė. Būsenos keitimo po žingsniui grafo generavimo eiga.....	33
3.1 lentelė. Pasirinktų parametrų reikšmės puskanalio visiems koneksinams.....	33
3.2 lentelė. Simulatoriaus parametrai.....	34
3.3 Markovo modelių 12 koneksinų 2 būsenų rezultatai, naudojantis 3.1 lentele.....	40

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Plyšinių jungčių kanalų bei juos formuojančių koneksinų struktūra.....	9
1.2 pav. Plyšinės jungties kanalo su greitaisiais vartais kiekviename puskanalyje(A) keturių būsenų modelio (B) schema.....	10
1.3 pav. $g_j$ priklausomybės nuo $V_j$ simuliacijos grafikas.....	11
1.4 Dvylikos koneksinų modelio schema.....	12
1.5 pav. priklausomybės nuo simuliacijos grafikas .....	12
1.6 pav. 2 būsenų grafas.....	13
1.7 pav. 3 būsenų grafas.....	14
1.8 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų modelio schema.....	15
1.9 pav. Plyšinės jungties 12 koneksinų modelio schema.....	21
2.1 pav. Būsenos keitimo po žingsnį būsenų grafas.....	32
3.1 pav. PJK kairiojo puskanalio 7 būsenų (t.y. 6 koneksinų 2 (open-closed) būsenų) stacionariųjų tikimybių priklausomybės nuo įtampos $V$ grafikas.....	35
3.2 pav. 4 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas.....	35
3.3 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom.....	36
3.4 pav. 4 koneksinų 2 būsenų (II) modelio būsenų grafas.....	37
3.5 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom .....	37
3.6 pav. 4 koneksinų 3 būsenų modelio grafas.....	38
3.7 pav. 4 koneksinų trijų būsenų grafo fragmentas.....	38
3.8 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas trim būsenom.....	39
3.9 pav. 12 (nuo 0 iki 6 užsidariusių) koneksinų 2 būsenų tikimybių priklausomybės nuo įtampos grafikas.....	41
3.10 pav. 12 (nuo 7 iki 12 užsidariusių) koneksinų 2 būsenų tikimybių priklausomybės nuo įtampos grafikas.....	41

## IVADAS

Įvairūs ląstelėse vykstantys biologiniai procesai priklauso nuo veiksnių, tokių kaip pH ir jonų koncentracijos pokyčiai. Jie įtakoja biomolekulių aktyvumą ir funkcijas, taip pat yra svarbūs ląstelės homeostazės palaikyme. Šie procesai dalyvauja viduląstelinių ir tarpląstelinių signalų perdavime. Tokių veiksnių veikimo mechanizmų tyrimai leidžia sužinoti apie fiziologinę ir patologinę tam tikrų ląstelės elementų reikšmę ir atskleidžia galimus jų reguliavimo būdus.

Plyšinės jungtys (PJ) tai yra kanalai užtikrinantys tarpląstelinę sąveiką. Jie yra svarbūs ląstelių dauginimuisi, diferenciacijai, migracijai bei koordinacijai. Gausus PJ paplitimas organizme bei didelė įvairovė ligų, kurias sukelia šiuos kanalus formuojančių baltymų koneksinų (Cx) mutacijos, rodo, kad jie būtini normaliam organų funkcionavimui.

Duomenys gaunami naudojant skirtingus tyrimų metodus. PJ kanalų savybių tyrimus ir duomenų interpretavimą apsunkina kanalo struktūra (kanalą sudaro puskanaliai išsidėstę vienas priešais kitą gretimų ląstelių membranose).

Šiame darbe tiriamas tarpląstelinių plyšinių jungčių veikimas, kai naudojami skirtingi koneksinų būsenas aprašantys grafai.[8] Sudaromi skirtingi tolydaus laiko Markovo procesų modeliai (dviejų būsenų keturių ir dvylikos koneksinų; trijų būsenų keturių ir dvylikos koneksinų).

Tikslas – sudaryti Markovo procesų modelius ląstelių plyšinei jungčiai imituoti, taip pat sukurti programinius paketus modelių realizavimui.

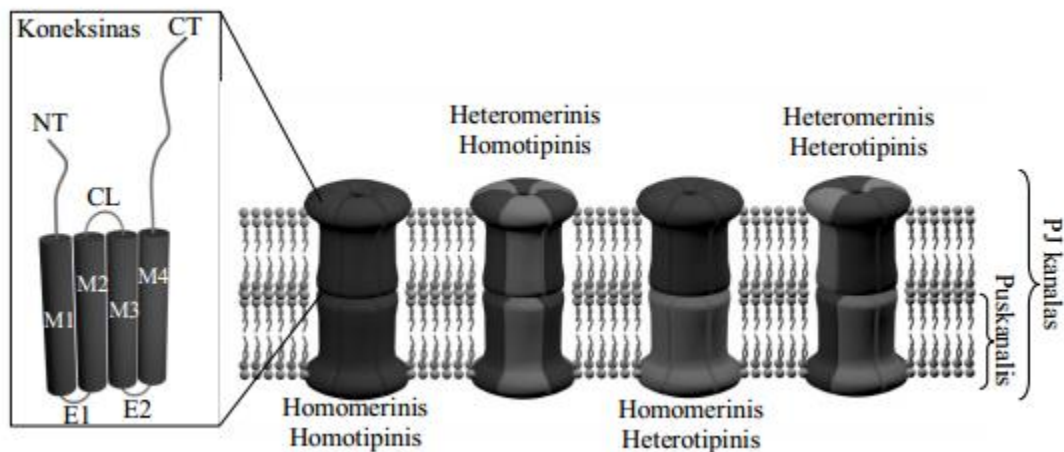
Yra sukurti imitatoriai, galintys atvaizduoti tarpląstelinę PJ, prie aukščiau aprašytų modelių, bet skirtumas nuo šio darbo tyrinėjamų modelių yra tas, kad imitatoriai vykdant globalią optimizaciją ilgai užtrunka prie modelio imitavimo, nes imitatorius naujoje iteracijoje perskaičiuoja visus vykdomo modelio parametrus iš naujo. Prireikus paspartinti optimizaciją iškilo poreikis realizuoti Markovo procesais paremtus modelius. Jie turėtų sugeneruoti visą modelio veikimo scenarijų dar prieš jį vykdant ir modelis pasinaudojęs sugeneruotu būsenų grafu apskaičiuotų stacionariasias tikimybes ir laidžio priklausomybę nuo įtampos.[7].



# 1. ANALITINĖ DALIS

## 1.1. PLYŠINĖS JUNGTIJOS FORMUOJANČIŲ KONEKSIŲ STRUKTŪRA IR FUNKCIJOS

Plyšinės jungtys (PJ) užtikrina jonų mainus, antrinių signalinių molekulių bei mažų metabolitų, neviršijančių 1 kilodaltono (kDa) molekulinį svorį, pernašą, taip pat elektrinę sąveiką tarp ląstelių. Stuburiniuose plyšinės jungtys sudaro koneksinai, o bestuburiuose – ineksinai.[4; 5] „Koneksino“ trumpinys (angl. – connexin), Z žymi baltymo molekulinį svorį kilodaltonais.[6]



**1.1 pav.** Plyšinių jungčių kanalų bei juos formuojančių koneksinų struktūra.

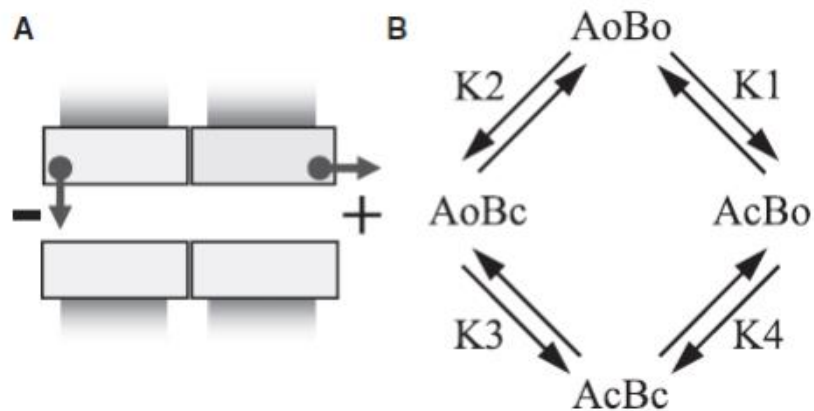
Koneksinų raiška stebima visuose audiniuose išskyrus eritrocitus, diferencijuotas skeleto raumens ir subrendusias spermų ląsteles [6]. Plyšinės jungtys dalyvauja ląstelių homeostazės ir funkcijų palaikyme. Trumpas koneksinų gyvavimo pusperiodis ir greita jų apykaita rodo, kad jie svarbūs procesuose, kuriuose reikalinga greita organizmo reakcija prisitaikant prie besikeičiančių sąlygų. Parodyta, kad koneksinai svarbūs įvairių audinių vystimuisi ir diferenciacijai; šių procesų metu kinta jų raiškos lygis bei fosforinimo būseną, o taip pat, kinta jų sąveika su kitais baltymais. Taip pat koneksinai būtini tam tikrų organų normaliam funkcionavimui, kaip, pavyzdžiui, sinchroniniam širdies raumens susitraukimui, elektrinių sinapsių funkcionalumui smegenyse ir nepakeičiami tokiuose fiziologiniuose procesuose kaip audinio uždegimas bei gijimas.[5]

## 1.2 TARPLAŠTELINĖS PLYŠINĖS JUNGTIES MODELIAI

Koneksinai tai didelė membraninių proteinų šeima. Ji formuoja plyšinės jungties (PJ) kanalus, kurie teikia tiesioginį kelią elektroniniams ir metaboliniams signalams tarp ląstelių. Kiekvienas PJ kanalas yra sudarytas iš dviejų puskanalių – koneksinų. Plyšinės jungties kontaktavimas vaidina svarbų vaidmenį daugumoje procesų, tokiuose kaip: impulse sklaidimui širdyje, organų vystymuisi augant.[5]

Savybė, kuri yra bendra plyšinės jungties kanalams turintiems bet kokio tipo koneksinus yra laidis  $g_j$  ir  $V_j$  įtampa. 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[1].

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



**1.2 pav.** Plyšinės jungties kanalo su greitaisiais vartais kiekviename puskanalyje(A) keturių būsenų modelio (B) schema[11]

(1.2 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 apibrėžtos eksponentinėmis funkcijomis. Jos priklauso nuo krentančios įtampos ant kairiojo ir dešiniojo puskanalio.

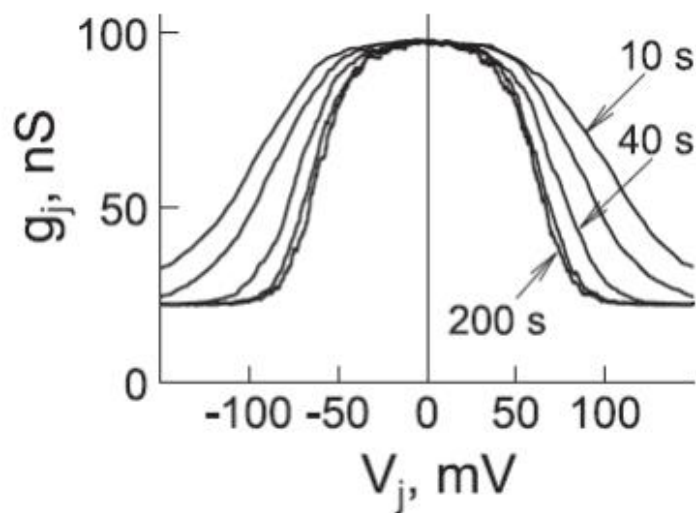
$$K_1 = e^{A_1(-\Pi \times V_A - V_{01})},$$

$$K_2 = e^{A_2}(\Pi \times V_B - V_{02}),$$

$$K_3 = e^{A_3}(-\Pi \times V_A - V_{03}),$$

$$K_4 = e^{A_4}(\Pi \times V_B - V_{04});$$

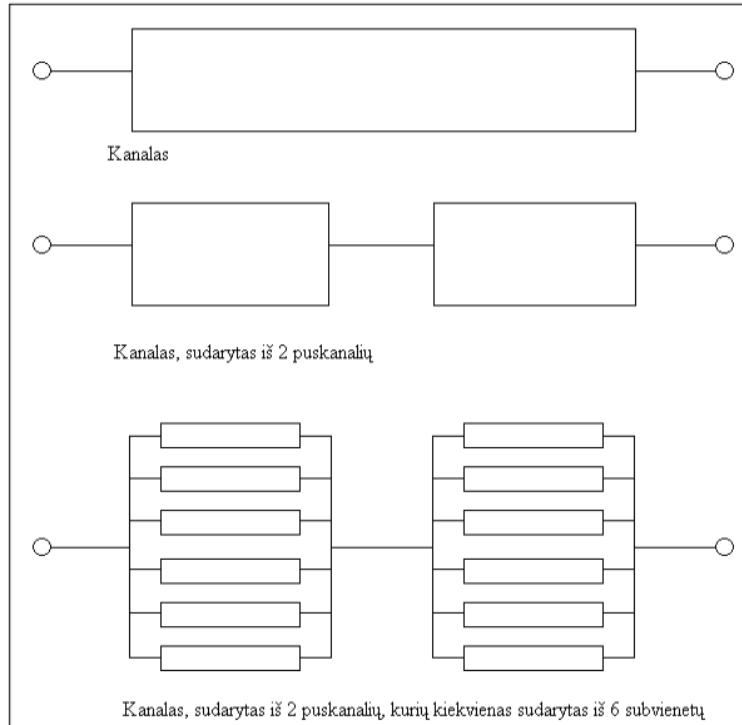
Tai yra modelio perėjimo konstantos išreikštos eksponentinėmis funkcijomis, kur  $A_i$ – įtampai jautrus koeficientas,  $V_{0i}$ – pusė maksimalios įtampos ir  $\Pi$  – vartų poliariškumas, kuris gali būti arba neigiamas, arba teigiamas. Bendra plyšinės jungties kanalo įtampa yra puskanalių įtampos suma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



**1.3 pav.**  $g_j$  priklausomybės nuo  $V_j$  simuliacijos grafikas

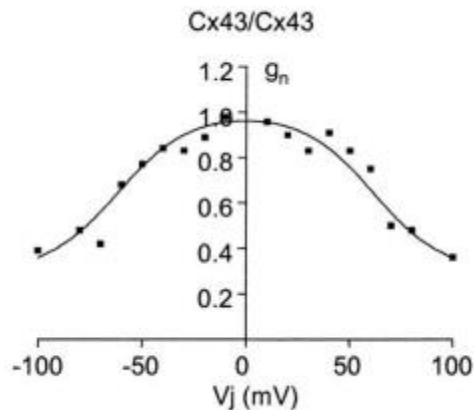
(1.2 pav) pavaizduota  $V_j$  simuliacija plyšinėje jungtyje, kai  $V_j$  lėtai kinta nuo  $-150\text{mV}$  iki  $150\text{mV}$ . Įtampos kitimo žingsnis buvo keičiamas atitinkamai nuo 200 iki 100, 40, 20 ir 10s.[1]

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



**1.4 pav.** Dvylikos koneksinių modelio schema

(1.4 pav) pavaizduota plyšinės jungties kanalo schema. Kiekvienas koneksinas veikia tokiu pat principu kuris yra pateiktas (1.2 pav) aprašyme. Skirtumas yra tik laidžio skaičiavime, kadangi prieš tai aprašytame modelyje, puskanaliai ir koneksinai yra sujungti nuosekliai. Puskanaliai yra sujungti nuosekliai, o koneksinai tarpusavyje lygiagrečiai.



**1.5 pav.**  $g_j$  priklausomybės nuo  $V_j$  simuliacijos grafikas

(1.5 pav) pavaizduota modelio eksperimentiniai rezultatai, kaip keičiama  $V_j$  įtampa nuo  $-100mV$  iki  $100mV$ .

Šie modeliai yra tiriami ir jiems kuriami imitatoriai. Šiame darbe yra aptariama Markovo procesų pritaikymas kuriant matematinius – programinius modelius. Jie turėtų simuliuoti tarpląstelinės PJ laidžios priklausomybę nuo įtampos. Markovo procesų pritaikymas šiems modeliams yra reikalingas, nes tuomet būtų galima ištirti veikimo greitį lyginant su imitatoriaus veikimo greičiu.

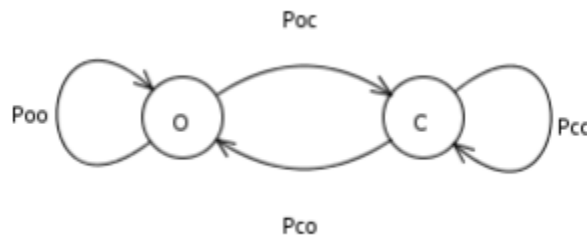
Modelio veikimo greitis yra svarbiausias laiko faktorius taikant optimizaciją ir paiešką. Paieška naudojama tam, kad sukurtus programinius modelius, būtų galima privesti prie eksperimentinių rezultatų, todėl tinkamų modelių parametrų ieškojimas užtrunka pakankamai ilgai.

Optimizavimas – sumažina eksperimentinių rezultatų triukšmus, kurie atsiranda dėl iškraipytos įrangos ar pašalinių signalų veikiančių įrenginį. Dėl to prieš vykdant paiešką, būtina nufiltruoti signalus kiek įmanoma daugiau, kad rezultatai būtų kuo tikslesni eksperimentiniams.[2][3][7]

### 1.3 PLYŠINĖS JUNGTIOS 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 koneksinų, priklausomai nuo to, kokia plyšinė jungtis yra nagrinėjama. Kiekvienas koneksinas keičiasi pagal tam tikrus būsenų grafus. Šiuo metu praktikoje naudojami du koneksinų kitimo tipai tai: 2 ir 3 būsenų.

Dviejų būsenų koneksino būsenų perėjimo grafas pavaizduotas (1.6 pav).



1.6 pav. 2 būsenų grafas

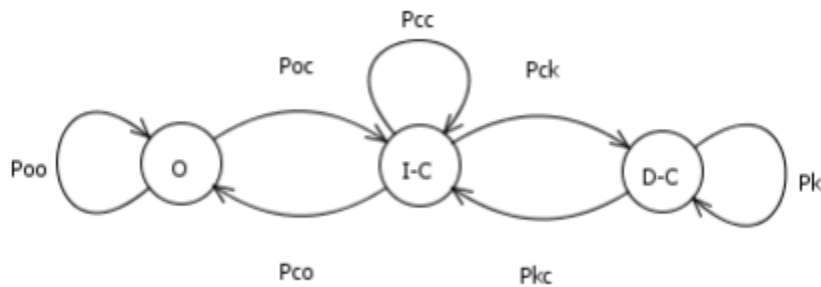
Kiekvienas koneksinas gali būti „O“ – (angl. „open“) atviroje arba „C“ – (angl. „closed“) uždaroje būsenoje. Kad koneksinas bus vienoje iš šių būsenų apsprendžia perėjimo tikimybės.  $P_{oo}$  – tikimybė jog koneksinas liks „O“ būsenoje.  $P_{oc}$  – tikimybė jog koneksinas „O“ būseną pakeis į „C“ būseną.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

$$P_{oc} = \frac{K * k}{1 + k}; \quad P_{co} = \frac{K}{1 + k} \quad (1.1)$$

$$P_{oo} = 1 - P_{oc}; \quad P_{cc} = 1 - P_{co}$$

Trijų būsenų koneksino būsenų perėjimo grafas:



**1.7 pav.** 3 būsenų grafas

Papildomai, šiame grafe „I – C“ būsenai 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 (1.7 pav.) tik papildomai, kad įvertintume perėjimą į „D – C“ būseną,  $P_{co}$  ir  $P_{cc}$  yra apskaičiuojama taip:

$$P_{ck} = \begin{cases} P_{co} = P_{co} - (P_{co} * k) \\ P_{cc} = P_{cc} - (P_{cc} * k) \end{cases}; \quad P_k = k \quad (1.2)$$

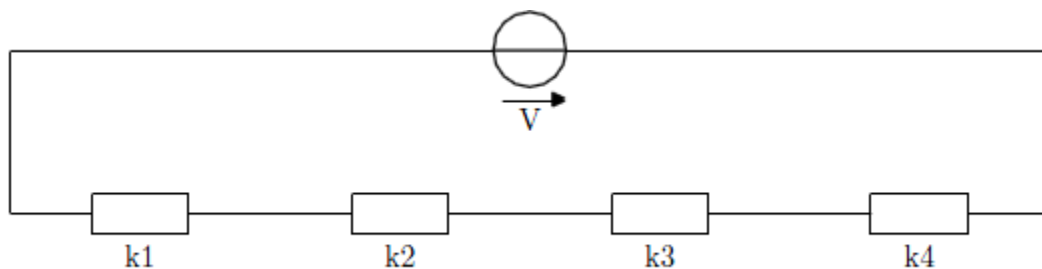
$$P_{kc} = 1 - k$$

*Pastaba:* „I – C“ būsenai yra tokia pat kaip ir „C“, tik skiriasi būsenos žymėjimas.[2]

## 1.4 PLYŠINĖS JUNGTIES TOLYDAUS LAIKO MARKVO PROCESŲ MODELIAI

### 1.4.1 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 (1.8 pav.), pateiktame žemiau. Kiekvienas puskanalis turi po 2 nuosekliai sujungtus koneksinus. Įtampa žymima  $V$  raide.



**1.8 pav.** Plyšinės jungties 4 koneksinų modelio schema

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

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I$$

$$IR = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \quad (1.3)$$

Varža lygi:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.4)$$

$R_1, R_2, R_3, R_4$  atitinkamai yra koneksinų  $k_1, k_2, k_3, k_4$  varžos. Kadangi reikia skaičiuoti laidį, o ne varžą, tai laidžio formulė yra

$$g = \frac{g_1 g_2 g_3 g_4}{g_2 g_3 g_4 + g_1 g_3 g_4 + g_1 g_2 g_4 + g_1 g_2 g_3} \quad (1.5)$$

Formulė 1.5 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 įtampos (kiekvieno koneksino) formulės gaunamos pasinaudojant Omo dėsnio ir tuo, kad srovės stipris visose grandinės dalyse yra vienodas.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{i}{g_1} = \left[ i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_2 &= \frac{i}{g_2} = \left[ i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 2}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_3 &= \frac{i}{g_3} = \left[ i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 3}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \\ V_4 &= \frac{i}{g_4} = \left[ i = V \cdot g; g = \frac{\prod_{i=1}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i} \right] = \frac{V \prod_{i=1, i \neq 4}^4 g_i}{\sum_{l=1}^4 \prod_{i=1, i \neq l}^4 g_i}; \end{aligned} \quad (1.6)$$

Kadangi turi būti nustatoma pradinė įtampa, tai programos kode pradėdame skaičiuoti kai  $V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 0mV$ .

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

**1.1 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	$g_0 = 2$	$g_0 = 2$	$g_0 = 2$	$g_0 = 2$	$g_1 \text{ grandinės} = 0,5$
					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				
$V = \frac{V * g_1, kai V = 0}{g_1, kai V = 20}$ $= \frac{20 * 0,5}{0,5031} = 19,8768$		dar 16 galimų įtampos variantų			dar 16 galimų laidžių variantų				
...									
...									

Apibrėžiama intensyvumo matrica Q. Ši matrica yra išvestinė tikimybinių įvykių, kintančių per be galo mažą laiko intervalą. Galima tarti, kad koneksinai gali keisti būseną per vieną žingsnį intensyvumu:

$$\lambda_{oc}(V_i) = \frac{p_{oc}(V_i)}{\text{koneksino laikas}} \quad \text{ir} \quad \lambda_{co}(V_i) = \frac{p_{co}(V_i)}{\text{koneksino laikas}};$$

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:

$$Q = (\lambda_{a,b} + \lambda_{c,d} + \lambda_{e,f} + \lambda_{g,h}); \quad (1.7)$$

Kaip matyti intensyvumai  $\lambda$  sudedami. Q matrica yra eilės  $16 \times 16$ . 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  $\Pi$ . Šis vektorius yra randamas sprendžiant šią lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{16} \Pi_i q_{i,j} = 0; j = 1,16; \\ \sum_{i=1}^{16} \Pi_j = 1; \end{cases} \quad (1.8)$$

Šios lygties matricinė forma pateikta (2.9 formulė):

$$(\Pi_1 \dots \Pi_{16}) * \begin{pmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{1,16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{16,1} & \dots & q_{16,16} \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Remiantis šia matricine išraiška, ieškomas  $\Pi$  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 (1.9), tačiau skaičiuojama pagal konkrečias formules. B vektorius yra  $B = (0 \dots 0 1)^T$  – laisvųjų narių vektorius. Taigi lygtis tokia:

$$\Pi = B * A^{-1} \quad (1.10)$$

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

$$g_i = \frac{\Pi_i g_1 g_2 g_3 g_4}{g_2 g_3 g_4 + g_1 g_3 g_4 + g_1 g_2 g_4 + g_1 g_2 g_3}; \quad i = 1,16 \quad (1.11)$$

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

$$g_i = \frac{\Pi_{i=1}^{16} g_i}{\sum_{l=1}^{16} \Pi_{i=1, i \neq l}^{16} g_i}; \quad (1.12)$$

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

$$g = k * g_i \quad (1.13)$$

#### 1.4.2 PLYŠINĖS JUNGTIOS 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS (II)

Šis modelis yra ekvivalentiškas modeliui aprašytam 1.4.1 skyriuje, tačiau skiriasi tuo, kad šiame modelyje matrica  $Q$  yra formuojama kitaip. Žinoma jog plyšinė jungtis sudaryta iš 4 konekinių, du koneksiniai yra kairėje pusėje ir kiti du dešinėje. Taigi galime suformuoti  $Q_l$  – dažnių matricą kariajai pusei ir  $Q_r$  – dažnių matricą dešiniajai pusei.

$$Q_l = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & * & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & * \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

$$Q_r = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

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

$$Q = Q_l \oplus Q_r = Q_l \otimes I_3 + I_3 \otimes Q_r \quad (1.16)$$

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:

$$Q = \begin{pmatrix} * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 0 & 0 & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 & \lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} & 0 & \lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 0 & 0 & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 0 & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & \lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

*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 (1.9) formulės.

### 1.4.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIS

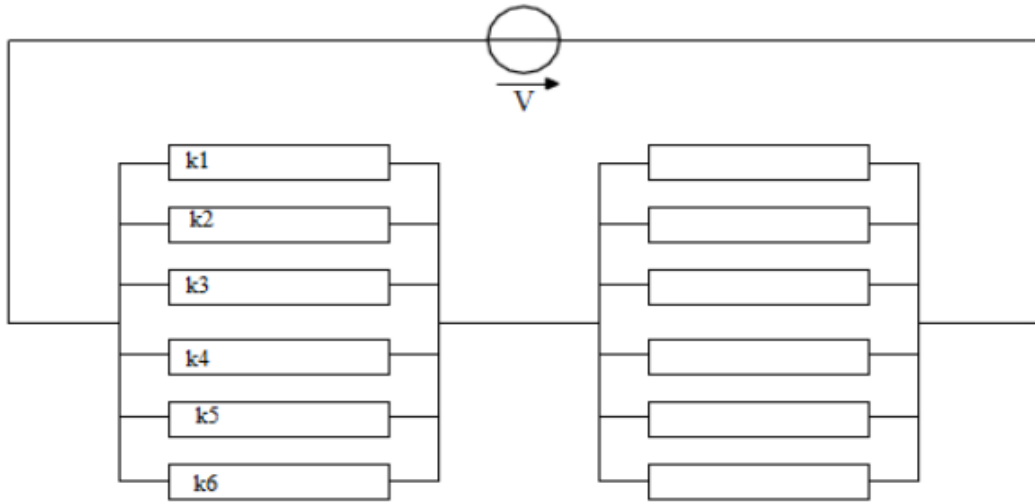
Šis modelis remiasi 1.4.1 skyriuje aprašytu modeliu. Kiekvienas koneksinas gali būti vienoje iš trijų būsenų: „O“ – atvirą, „C“ – uždara ir „D“ - pilnai uždara.

Papildomai šiame modelyje atsiranda papildomas parametras – pilnai uždaros būsenos perėjimo tikimybė, kurios skaičiavimo formule yra (1.2). Visa veiksmų seka ir pateikimas yra lygiai toks pat kaip ir aprašytas 1.4.1 skyriuje, tik  $Q$  matrica bus  $256 \times 256$  dydžio. Taipogi, kad išpildyti pilną Markovo grandinės grįžtamumą, buvo įterpta tarpinė būsena „G“ – ji yra ekvivalentiška būsenai „C“. Šią būseną buvo privaloma įdėti, nes be jos, skaičiuojamos tikimybės.

### 1.4.4 PLYŠINĖS JUNGTIES 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIS

Šiame modelyje kiekvienas koneksinas gali būti dviejuose būsenose: „O“ – atvirą ir „C“ – uždara. Plyšinės jungties (PJ) kanalo 12 konekstinų modelis yra sudarytas iš 12 konekstinų,

pažymėtų paveiksle, pateiktame (1.9 pav). Kiekvienas puskanalis turi po 6 lygiagrečiai sujungtus koneksinus. Įtampa žymima  $V$  raide.



**1.9 pav.** PJ 12 koneksinų modelio schema

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

Dažnių matrica skaičiuojama lygiai taip pat tik atsiranda papildomų dedamųjų:

$$Q = (\lambda_{a,b} + \lambda_{c,d} + \lambda_{e,f} + \lambda_{g,h} + \lambda_{i,j} + \lambda_{k,l} + \lambda_{m,n} + \lambda_{o,p} + \lambda_{r,s} + \lambda_{t,u} + \lambda_{v,w} + \lambda_{x,y}) \quad (1.18)$$

$\Pi$  vektoriaus radimas

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

(1.19)

Šios lygties matricinė forma

$$(\Pi_1 \dots \Pi_{49}) * \begin{pmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{1,49} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{16,1} & \dots & q_{49,49} \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

Kanalo laidis, naudojantis gautu stacionariųjų tikimybių vektoriumi

$$g_i = \Pi_i \left( \frac{1}{\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} + \frac{1}{g_4} + \frac{1}{g_5} + \frac{1}{g_6}} + \frac{1}{\frac{1}{g_7} + \frac{1}{g_8} + \frac{1}{g_9} + \frac{1}{g_{10}} + \frac{1}{g_{11}} + \frac{1}{g_{12}}} \right) \quad (1.21)$$

Kanalo laidis įtampų intervale

$$g_i = \frac{\prod_{i=1}^{49} g_i}{\sum_{l=1}^{49} \prod_{i=1, i \neq l}^{49} g_i} \quad (1.22)$$

#### 1.4.5 PLYŠINĖS JUNGTIOS 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 konekinių, šeši koneksinai yra kairėje pusėje ir kiti šeši dešinėje. Taigi galime suformuoti  $Q_l$  – dažnių matricą kairiajai pusei ir  $Q_r$  – dažnių matricą dešinėjai pusei[2].

$$Q_r = \begin{pmatrix} * & 6\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(l)} & * & 5\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(l)} & * & 4\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(l)} & * & 3\lambda_{co}^{(l)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(l)} & * & 2\lambda_{co}^{(l)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(l)} & * & \lambda_{co}^{(l)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(l)} & * \end{pmatrix} \quad (1.23)$$

$$Q_r = \begin{pmatrix} * & 6\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{oc}^{(r)} & * & 5\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_{oc}^{(r)} & * & 4\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\lambda_{oc}^{(r)} & * & 3\lambda_{co}^{(r)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\lambda_{oc}^{(r)} & * & 2\lambda_{co}^{(r)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\lambda_{oc}^{(r)} & * & \lambda_{co}^{(r)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\lambda_{oc}^{(r)} & * \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

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

$$Q = Q_l \oplus Q_r = Q_l \otimes I_7 + I_7 \otimes Q_r \quad (1.25)$$

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

*Pastaba:* \* - pažymėti matricos elementai yra tos eilutės elementų suma su neigiamu ženklu. Turėdami matricą, tolimesnių skaičiavimų metodika yra lygiai tokia pat kaip ir (I) modelio.

## 2. METODOLOGINĖ DALIS

### 2.1 PLYŠINĖS JUNGTIOS MODELIŲ PLA SPECIFIKACIJA

#### 2.1.1 DVIEJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA

Sistemos su dviem koneksinų būsenomis („O“ ir „C“) agregatinė [9] 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:

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

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. Tolydzioji 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/

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_1'', t+0) = (L - n_l(t) + 1) * \lambda_{co}^{(l)};$$

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

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



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

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

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

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

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

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

$$w(e_3'', t + 0) = \begin{cases} (R - n_r(t) - 1) * \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) < R - 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_4'', t + 0) = (n_l(t) + 1) * \lambda_{oc}^{(l)};$$

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

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

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

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

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

$$w(e_3'', t + 0) = (R - n_r(t) + 1) * \lambda_{co}^{(r)};$$

$$w(e_4'', t + 0) = \begin{cases} (n_r(t) - 1) * \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_r(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

### 2.1.2 TRIJŲ BŪSENŲ MODELIO PLA SPECIFIKACIJA

Sistemos su trimis koneksinių 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:

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

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

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

$n_{lo}(t)$  - konksinų, esančių „O“ būsenoje kairėje pusėje, skaičius;

$n_{lc}(t)$  - konksinų, esančių „C“ būsenoje kairėje pusėje, skaičius;

$n_{ro}(t)$  - konksinų, esančių „O“ būsenoje dešinėje pusėje, skaičius;

$n_{rc}(t)$  - konksinų, esančių „C“ būsenoje dešinėje pusėje, skaičius;

L – konksinų skaičius kairėje pusėje;

R – konksinų 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 būsena:

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

9. Vidinių perėjimų operatoriai:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_3'', t + 0) = \begin{cases} (n_{lo}(t) - 1) * \lambda_{oc}^{(l)}, & \text{jeigu } n_{lo}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_1'', t + 0) = (L - n_{lo}(t) - n_{lc}(t) + 1) * \lambda_{dc}^{(l)};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_5'', t+0) = \begin{cases} (R - n_{ro}(t) - n_{rc}(t) - 1) * \lambda_{dc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) + n_{rc}(t) < R - 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_6'', t + 0) = \begin{cases} (n_{rc}(t) - 1) * \lambda_{co}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{rc}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

$$w(e_7'', t + 0) = (n_{ro}(t) + 1) * \lambda_{oc}^{(r)};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w(e_6'', t + 0) = \begin{cases} (n_{ro}(t) - 1) * \lambda_{oc}^{(r)}, & \text{jeigu } n_{ro}(t) > 1, \\ \infty, & \text{kitu atveju;} \end{cases}$$

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

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

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

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

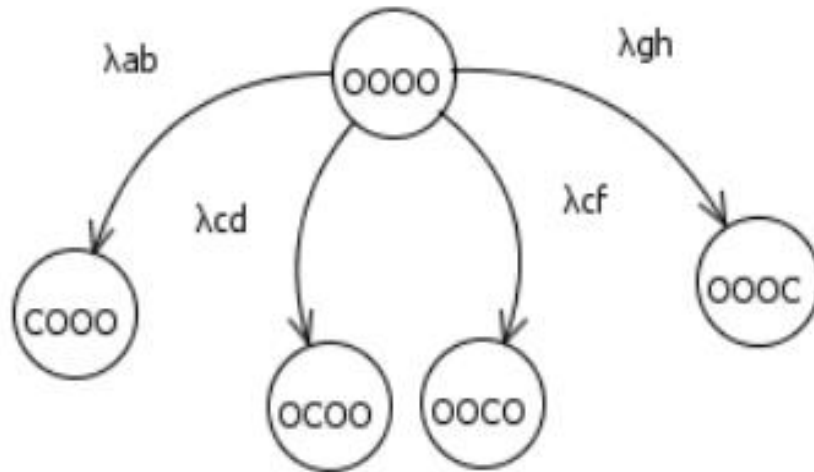
$$n_{ro}(t + 0) = n_{ro}(t);$$

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

## 2.2 BŪSENŲ GRAFŲ GENERAVIMO METODAI

### 2.2.1 BŪSENOS KEITIMO PO ŽINGSNIUI METODAS

Grafo būseną  $G_s$  yra sudaryta iš naudojamo modelio kairiojo ir dešiniojo puskanalių būsenų. Grafo perėjimo lanko svoris  $\lambda$  – būsenos keitimo dažnis. Būsenų grafo pradinis generavimo žingsnis pavaizduotas (2.1 pav.).



**2.1 pav.** Būsenos keitimo po žingsnį 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  $\lambda$ , 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 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Būsenos keitimo po žingsniui grafo generavimo eiga

Pradinė būseną $G_s$	„1;1“
$G_{s1}$	„0;1“
$G_{s2}$	„2;1,“
$G_{s3}$	„1;2“
$G_{s4}$	„1;0“

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

Modifikavus šį algoritmą, galima jį pritaikyti ir trijų būsenų grafams generuoti. Trijų būsenų grafas 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 parametų, apibūdinančių koneksinų būsenų kitimo savybes visiems modeliams vienodi.

**3.1 lentelė.** Pasirinktų parametų reikšmės puskanalio visiems koneksinams

Parametras	Reikšmė
A	0,1(1/mV)
Gc	0,1
Go	1
K	0,1(const.)

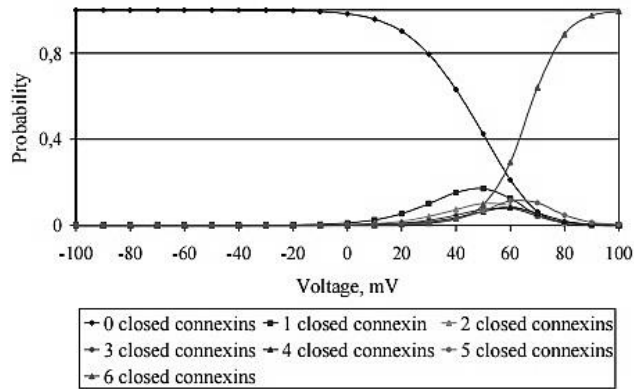
P	1(const.)
Rc	∓1000000
Ro	∓1000000
V0	40 (mV)
V	-100:20:100 (mV)

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

### 3.2 lentelė. Imitatoriaus parametrai

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

Naudojantis formulėmis suskaičiuojamos PJ koneksinų stacionariosios tikimybės, keičiant PJkoneksinų įtampą ( $V = -100 \div 100\text{mV}$ ). Šių tikimybių kitimas, priklausomai nuo įtampos, parodytas 3.1 paveiksle.

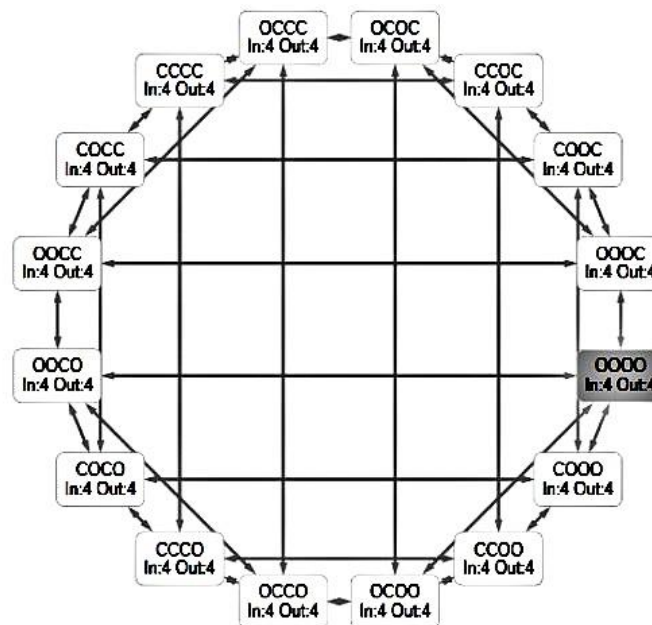


**3.1 pav.** PJK kairiojo puskanalio 7 būsenų (t.y. 6 koneksinų 2 (open-closed) būsenų) stacionariųjų tikimybių priklausomybės nuo įtampos V grafikas

### 3.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ MODELIŲ TYRIMAS

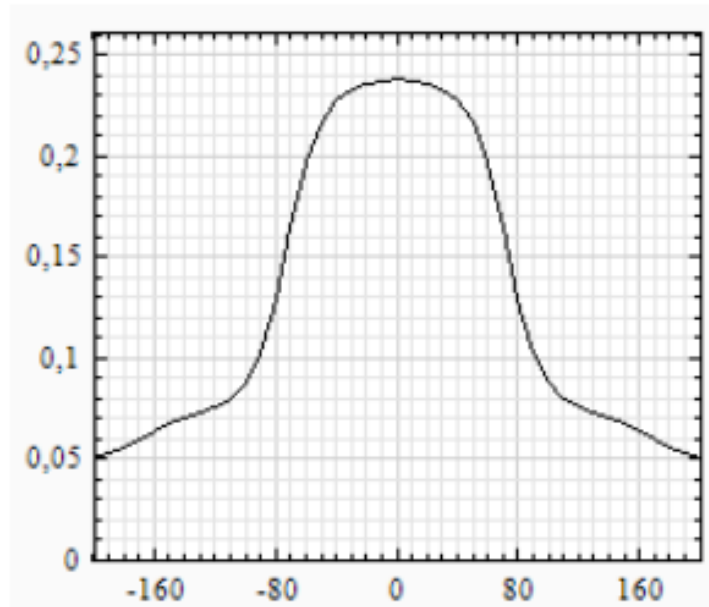
#### 3.2.1 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ I MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.2 pav.). Šis grafas turi 16 viršūnių, ir 64 lankus.



**3.2 pav.** 4 koneksinų 2 būsenų (I) modelio būsenų grafas

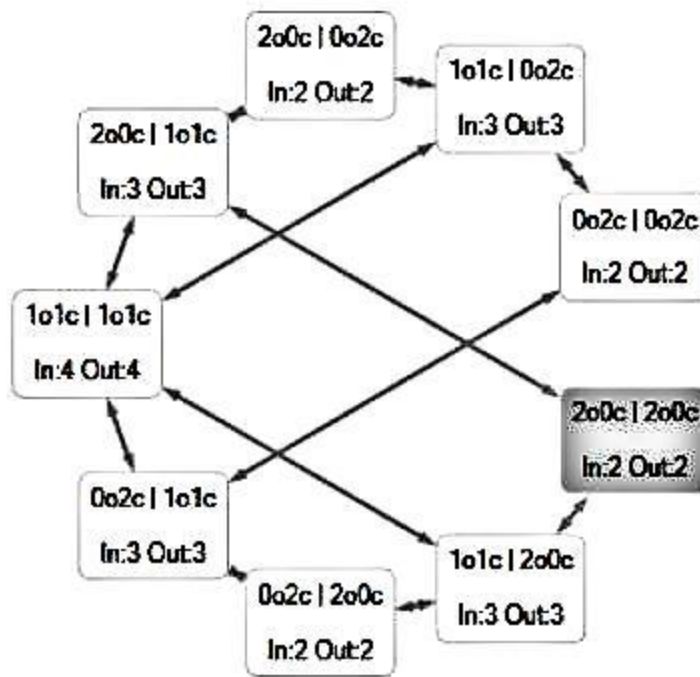
Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.3 pav.)



**3.3 pav.** Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas. Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

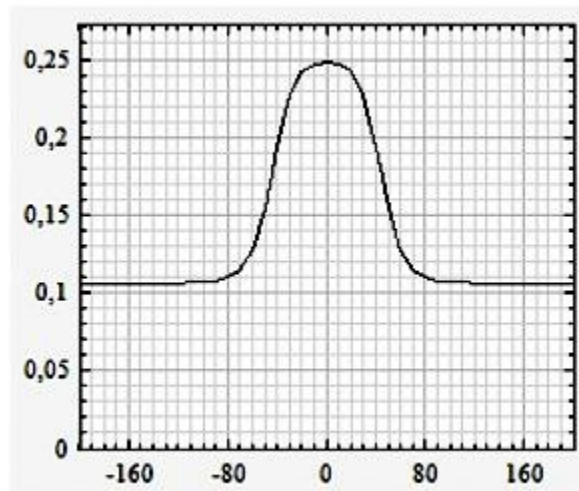
### 3.2.2 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSINŲ 2 BŪSENŲ II MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.4 pav.). Šis grafas turi 9 viršūnes ir 24 lankus.



3.4 pav. 4 koneksinų 2 būsenų (II) modelio būsenų grafas

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.5 pav).

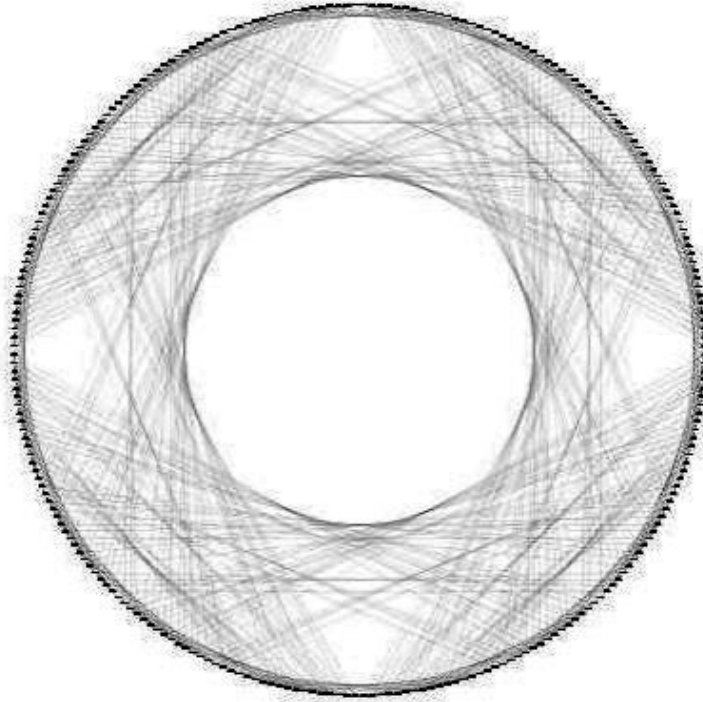


3.5 pav. Plyšinės jungties 4 koneksinų kanalo laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas.

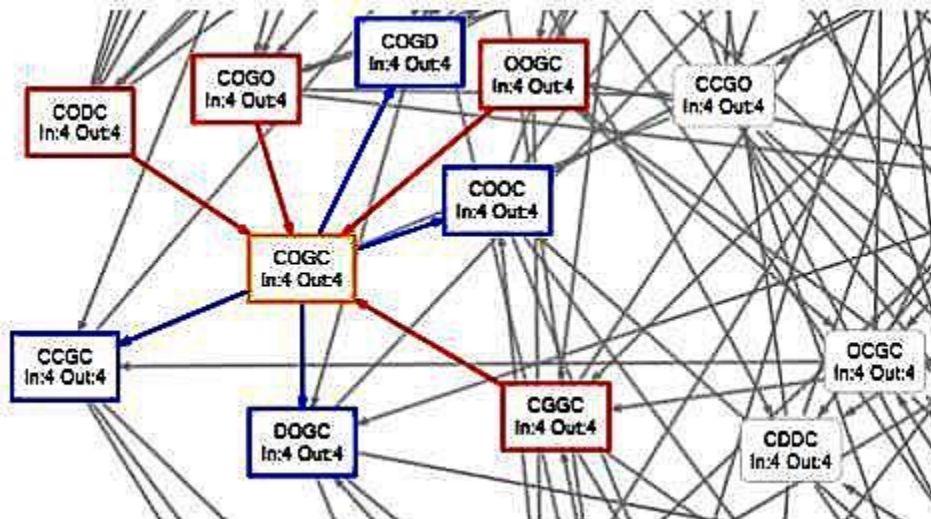
Koneksinas modeliuojamas dviem būsenom

### 3.2.3 PLYŠINĖS JUNGTIES 4 KONEKSIŲ 3 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS

Šio modelio sugeneruotas grafas yra pavaizduotas (3.6 pav). Šis grafas turi 256 viršūnes ir 1024 lankus.

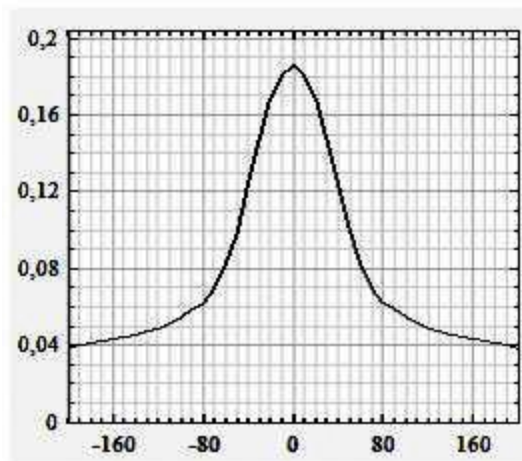


3.6 pav. 4 koneksinų 3 būsenų modelio grafas



3.7 pav. 4 koneksinų trijų būsenų grafo fragmentas

Modelio laidžio priklausomybės nuo įtampos grafikas pavaizduotas (3.8 pav.).



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

### 3.3 PLYŠINĖS JUNGTIOS 12 KONEKSIŲ MODELIO TYRIMAS

#### 3.3.1 PLYŠINĖS JUNGTIOS 12 KONEKSIŲ 2 BŪSENŲ MODELIO TYRIMAS

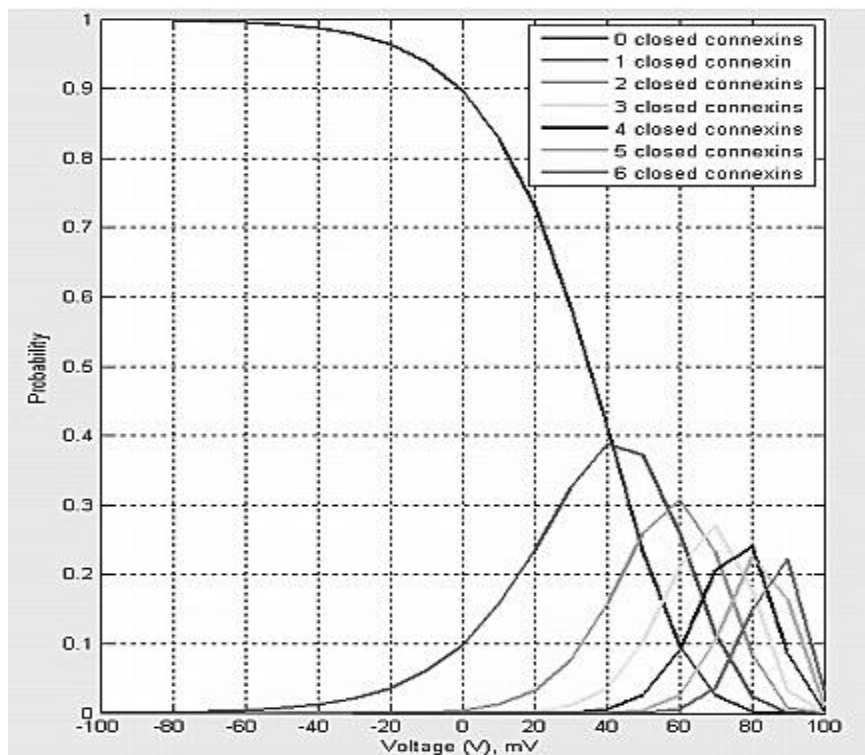
Tiriant šį modelį naudojama taip pat 3.3 lentelė ir gauti Markovo modelio rezultatai:

**3.3 lentelė.** Markovo modelių 12 konekسيų 2 būsenų rezultatai, naudojami 3.1 lentelėje.

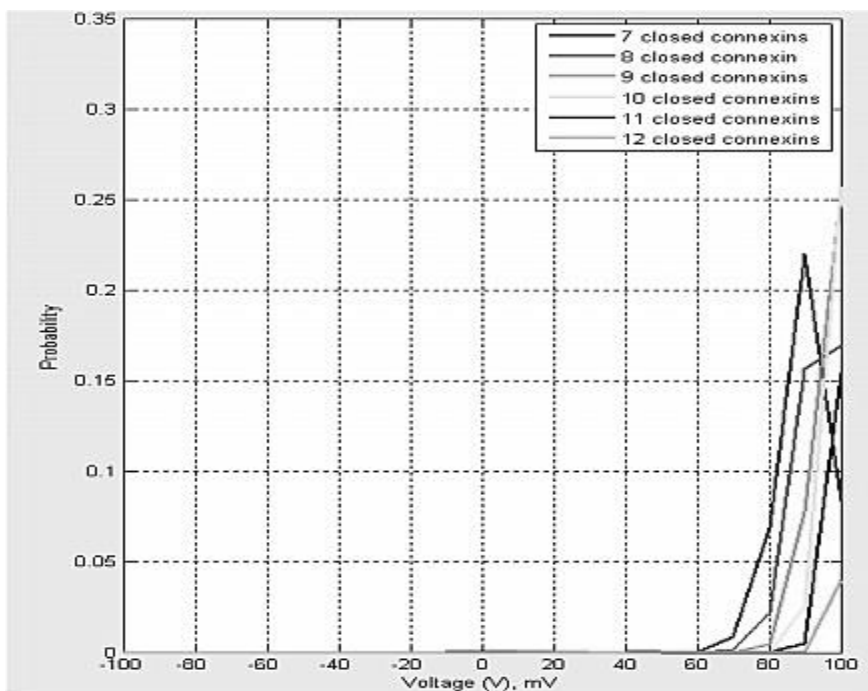
ĮTAMPA, mV	LAIDIS, pS		SANTYKINĖ PAKLaida (%)
	SIMULIACIJOS REZULTATAI (t=1000 ms)	MARKOVO MODELIO REZULTATAI	
-100	5,1712	5,2844	2,14
-80	5,1778	5,3860	3,87
-60	5,1930	5,4885	5,38
-40	5,2082	5,5902	6,83
-20	5,2232	5,6863	8,14
0	4,9405	5,7621	14,26
20	4,9600	5,7761	14,13
40	4,9796	5,6183	11,37
60	4,9988	5,0694	1,39
80	4,7245	4,0063	17,93
100	1,7444	1,8641	6,42

Reikšmės yra artimos, bet skirtumai didesni. Šiame modelyje nagrinėjama 12 konekسيų - užsidariusių 0-12 konekسيų tikimybių priklausomybė nuo įtampos ( žr. 3.8-3.9 paveikslus). Pagal numeravimą kreivės eina iš kairės į dešinę.





3.9 pav. 12 (nuo 0 iki 6 užsidariusių) koneksinų 2 būsenų tikimybių priklausomybės nuo įtampos grafikas



3.10 pav. 12 (nuo 7 iki 12 užsidariusių) koneksinų 2 būsenų tikimybių priklausomybės nuo įtampos grafikas

Aukščiau pateiktuose grafikuose galime matyti, kad didėjant įtampai tikimybė, kad užsidarys 0 koneksinų. Tai reiškia, kad visi koneksinai bus atviri ir mažėja nuo 1 esant įtampai -100 mV, iki 0, esant 100 mV įtampai. Kai įtampa didėja tikimybė, kad užsidarys 12 koneksinų, didėja nuo 0, kai įtampa yra 0 mV, iki ~0,05, kai įtampa yra 100 mV. Tikimybės, kad užsidarys nuo 1 iki 6 koneksinų, yra atitinkamai lygios apie 0,4 (kai įtampa yra 40 mV) ir 0,2 (kai įtampa yra 90 mV). Tikimybės, kad užsidarys nuo 7 iki 11 koneksinų (taip pat ir aukščiau minėtų 12 koneksinų), yra nedidelė, esant 90- 100 mV įtampai.

### **3.4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA**

Buvo tiriama su Matlab 2012b ir Maple. Šias programas pasirinkau todėl, kad atliekami veiksmai su matricomis Matlab ir Maple programose tam tikros procedūros, tokios kaip lygčių sistemų sprendimas ir taip pat sprendžiamas matricine forma.

## IŠVADOS

Darbe pateikiama PJ Markovo modelių metodika, būsenų grafų generatorių metodai, perėjimo tikimybių skaičiavimas prie skirtingų būsenų grafų, kurių dėka galima skaičiuoti plyšinės jungties laidumo priklausomybę nuo įtampos.

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

Taipogi, kaip galima pastebėti iš modelio vykdymo laiku, 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.

Sukurti plyšinės jungties modeliai adekvačiai atvaizduoja elektrofiziologinius procesus plyšinėje jungtyje.

## 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. Abascal F, Zardoya R. Evolutionary analyses of gap junction protein families. *Biochim Biophys Acta* 2012;1828(1):4-14.
5. Scemes E, Spray DC, Meda P. Connexins, pannexins, innexins: novel roles of "hemi-channels". *Pflugers Arch* 2009;457(6):1207-26.
6. Rackauskas M, Neverauskas V, Skeberdis VA. Diversity and properties of connexin gap junction channels. *Medicina (Kaunas)* 2010;46(1):1-12.
7. 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.
8. The electrophysiology of gap junctions and gap junction channels and their mathematical modelling. Rolf Vogel, Robert Weingart. *Biology of the Cell*, No. 94, p. 501-510, 2002.
9. Henrikas Pranevičius SUDĖTINIŲ SISTEMŲ FORMALIZAVAIS IR ANALIZĖ Kauno Technologijos Universitetas, 2008. pages 13-110, ISBN 978-9955-591-51- 1
10. Opposing gates model for voltage gating of gap junction channels. Ye Chen-Izu, Alonso P. Moreno, Robert A. Spangler. *Am J Physiol Cell Physiol*, No. 281, p. C1604-C1613, 2001.
11. Paulauskas N, Pranevicius M, Pranevicius H, Bukauskas FF. A stochastic four-state model of contingent gating of gap junction channels containing two "fast" gates sensitive to transjunctional voltage. *Biophys J* 2009;96(10):3936-48.