

## Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

# INTRAVENINIO GLIUKOZĖS TOLERANCIJOS TESTO METABOLINĖS P SISTEMOS ĮGYVENDINIMAS APIBENDRINTUOJU KOMBINACINIU BŪDU

Darius KULAKOVSKIS\*

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2019 m. kovo 8 d.; priimta 2019 m. kovo 13 d.

**Santrauka.** Metabolinė P (MP) sistema yra naujos infobiotikos mokslo srities dalis. Intraveninio gliukozės tolerancijos testo (IVGTT) MP sistema modeliuojama gliukozės ir insulino sąveika. MP sistemų įgyvendinimas programinėmis priemonėmis yra gerai ištirtas, tačiau trūksta MP sistemoms įgyvendinti aparatinėje įrangoje, konkrečiai – lauku programuojamose loginėse matricose (LPLM), skirtų metodų. Šiame straipsnyje iš pradžių aptariami taikytini žinomi įgyvendinimo būdai: kombinacinis, vieno skaitmeninio signalų apdorojimo elemento ir srautinis. Vėliau nagrinėjamos šešios skirtingos IVGTT MP sistemos ir nustatomi jų ypatumai. Atsižvelgiant į bendras IVGTT MP sistemų savybes, pasiūlomas naujas apibendrintas kombinacinis IVGTT MP sistemų įgyvendinimo būdas, kuris sujungia visas minėtas sistemas vienoje LPLM. Palyginus apibendrintą sistemą su atskiromis IVGTT MP sistemomis, nustatyta, kad apibendrinta sistema naudoja 36 % mažiau skaitmeninių signalų apdorojimo elementų ir 49 % mažiau peržvalgos lentelių visoms šešioms žinomoms IVGTT MP sistemoms apskaičiuoti.

**Reikšminiai žodžiai:** lauku programuojama loginė matrica, metabolinė P sistema, infobiotika, intraveninis gliukozės tolerancijos testas, lygiagrečiai skaičiavimai, fiksuoto kablelio aritmetika.

### Įvadas

Sparčiai vystantis elektronikos mokslo sričiai, daug dėmesio skiriama lygiagrečiųjų skaičiavimų įgyvendinimui. Tai patvirtina reikšmingai išaugusios kompanijų, tokių kaip „Intel“, investicijos į šią sritį (Byrne, 2016). Viena iš aparatinio lygiagrečiųjų skaičiavimų įgyvendinimo krypčių – lauku programuojamos loginės matricos (LPLM). Šių lustų gamybos procesai jau kurį laiką buvo sėkmingai vystomi kartu su kitomis lustų gamybos technologijomis. Taigi šiuo metu LPLM pasižymi dideliais skaičiavimo pajėgumais ir palyginti prieinama kaina (Trimberger, 2018; Mamejanov et al., 2015).

Kartu su elektronikos sritimi sparčiai vystomos biologijos ir gamtinių skaičiavimų mokslo sritys. Tai skatina naujų intelektualinių elektroninių sistemų kūrimą (Siddique ir Adeli, 2015). Nauja infobiotikos mokslo sritis (Manca, 2013) taip pat yra paremta gamtiniais skaičiavimais bei tokiais sritimis, kaip dirbtinė gyvybė ir skaitinės sintezės biologija. Čia susijungia ir atranda sinergiją tokie žmonijos lūkesčiai, kaip noras sukurti naujos kartos

kompiuterius, veikiančius remiantis gamtoje egzistuojančiais dėsniais ar elgsena, *in silico* imituoti ir tirti gamtą bei jos reiškinius, panaudoti gamtinius išteklius ir gamtoje vykstančius procesus skaičiavimams atlikti.

P sistema, atliekant gamtinius skaičiavimus, užima svarbią vietą (Paun, Rozenberg ir Salomaa, 2010). Viena iš jos nepriklausomai vystomų mokslo šakų – metabolinė P (MP) sistema – tai infobiotikos teorija ir diskrečiąja matematika grįstas metabolinio proceso aprašas. MP sistemos jau buvo pritaikytos įvairiose gamtiniuose skaičiavimais grįstose srityse. Vienas iš MP sistemų taikymų – intraveninis gliukozės tolerancijos testas (IVGTT) – modeliuoja gliukozės ir insulino sąveiką (Manca, Marchetti ir Pagliarini, 2011). Šios MP sistemos buvo kurtos naudojant seniau sukurtus ir gerai ištirtus programinės įrangos įrankius.

Problema kyla norint MP sistemas įgyvendinti ne programinėje, o aparatinėje įrangoje. Pirminė teorinė analizė ir MP sistemų tinkamumui įgyvendinti aparatinėje įrangoje įrodymas jau yra pateikti (Guiraldelli ir Manca, 2015), tačiau nėra tinkamai ištirtų metodų šiam įgyvendinimo uždaviniui spręsti, ypač daugelio lygiagrečiųjų MP sistemų

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [darius.kulakovskis@vgtu.lt](mailto:darius.kulakovskis@vgtu.lt)

atveju. Šių sistemų LPLM įgyvendinimas suteiktų galimybę, susiejant elektronikos ir MP sistemų teorijos žinias ir pasitelkus naują požiūrį, našiau spręsti įvairias taikomąsias problemas. Siekiant šio tikslo būtina sukurti naujus daugelio MP sistemų transformavimo į LPLM struktūrinius elementus metodus.

Šiame straipsnyje žinių apie daugelio našių metabolinių P sistemų įgyvendinimo metodus trūkumo problema sprendžiama pasiūlant naują apibendrintą kombinacinio IVGTT MP sistemos LPLM įgyvendinimo būdą. Tai atliekama straipsnio pradžioje aptariant taikytinus žinomus įgyvendinimo būdus: kombinacinį, vieno skaitmeninio signalų apdorojimo elemento ir srautinį. Vėliau nagrinėjamos šešios skirtingos IVGTT MP sistemos, nustatomi jų ypatumai ir bendrosios savybės. Pristatomas naujasis IVGTT MP sistemų įgyvendinimo būdas ir pateikiami imitacinių eksperimentų metu gauti lyginamųjų – apibendrinto kombinacinio ir pavienių IVGTT MP sistemų – tyrimų rezultatai.

## 1. Esamų pavienių IVGTT MP sistemų įgyvendinimo būdų analizė

MP sistemos gali būti taikomos daugelyje sričių (Bao et al., 2017; Bollig-Fischer et al., 2014), tam reikia jas įgyvendinti kokiame nors įrenginyje, gebančiame atlikti kompiuterinius skaičiavimus. Iki šiol visi MP sistemos įgyvendinimai buvo atlikti programinėje įrangoje (Bianco, Manca, Marchetti ir Petterlini, 2007; Castellini ir Manca, 2009), kuri gali būti vykdoma naudojant palyginti galingus bendrosios paskirties kompiuterius. Vis dėlto šis sprendimas ne visuomet yra tinkamas, ypač tada, kai MP skaičiavimus reikia atlikti mažesniame, labiau specializuotame įrenginyje. Įgyvendinus MP sistemas įterptiniame įrenginyje būtų sudaryta galimybė atlikti realiojo laiko MP skaičiavimus nešiojamajame įrenginyje.

Metabolinėms P sistemoms LPLM įgyvendinti gali būti pasitelkiami keli skirtingi metodai, kurie turi vienkovių ar kitokių trūkumų, priklausančių nuo konkretaus taikymo. MP sistemų specifika taip pat turi įtakos pasirenkant konkretų įgyvendinimo metodą. Į tai būtina atsižvelgti vertinant metodo tinkamumą. Vienos MP sistemos įgyvendinimas LPLM jau buvo nagrinėtas ankstesniuose darbuose, kur buvo pristatyti keli skirtingi įgyvendinimo būdai.

Nauja originalaus dizaino JSON (angl. *Javascript object notation*) formato duomenų struktūra buvo sukurta siekiant palengvinti MP sistemų užrašymą programine logika (Kulakovskis ir Navakauskas, 2016). JSON formatas buvo pasirinktas dėl nesudėtingo konvertavimo ir suderinamumo su daugeliu šiuolaikinių programavimo kalbų. Duomenų struktūra yra glaudžiai susijusi su MP sistemų struktūra, atvaizduota MP grafo išraiška. Ši struktūra suteikia galimybę, panaudojus programinės įrangos įrankius, automatizuoti MP sistemų pertvarką iš JSON formato į kombinacinio LPLM įgyvendinimo kodą.

Kombinacinis įgyvendinimo būdas pasitelkia įprastą nuoseklaus sinchronizuoto veikimo procesą. Naudojami LPLM elementai, tokie kaip peržvalgos lentelės ir skaitmeninių signalų apdorojimo (SSA) elementai, sukurti nuoseklią loginių operacijų grandinę. Konkretus LPLM elementų išdėstymas nustatomas optimizacijos ir sintezės fazėje, kurią atlieka LPLM lusto gamintojo pateiktas kodo sintezatorius.

Pagrindinis kombinacinio įgyvendinimo privalumas tas, kad sistemos vėlinimas visada yra lygus vieno taktinio dažnio takto trukmei. Tai reiškia, kad visos skaičiavimo operacijos atliekamos nuosekliai vieno takto metu. Antra vertus, tai taip pat sukelia maksimalaus įgyvendinimo veikimo dažnio sumažėjimą, nes vieno takto metu atliekama daug operacijų. Tai ypač pastebima įgyvendinant sudėtingas MP sistemas, turinčias daugiau nei keletą skirtingų kintamųjų (medžiagų). Į šią kombinacinio įgyvendinimo būdo savybę būtina atkreipti dėmesį taikant jį MP sistemoms.

Dauguma šiuolaikinių LPLM turi dedikuotus SSA elementus sparčioms aritmetinėms operacijoms įgyvendinti. Toks SSA elementas gali būti naudojamas duomenims apdoroti iš skirtingų šaltinių ir gali būti dinamiškai perkonfigūruotas, įgyvendinant kitokias duomenų apdorojimo komandas (Xilinx, 2014). SSA elementai specialiai sukurti maksimaliam srautinio duomenų apdorojimo našumui pasiekti.

Sistemą įgyvendinant vieno SSA elemento metodu (Kulakovskis, Sledevič, Gedminas ir Navakauskas, 2016), visos aritmetinės operacijos atliekamos tik vienu LPLM SSA elementu. Taip užtikrinamas mažiausias LPLM išteklių naudojimas ir pasiekiamas didelis skaičiavimo greitis (Sledevič ir Navakauskas, 2015). Antra vertus, gali labai padidėti vėlinimas, ypač kai įgyvendinama palyginti sudėtinga MP sistema, nes visiems skaičiavimams atlikti reikia daugiau taktų. Taip pat dėl SSA architektūros ribojamas maksimalus žodžio, kurį galima vartoti vienam aritmetinės operacijos nariui išreikšti, ilgis.

Srautinis įgyvendinimo metodas (Kulakovskis, Sledevič, Gedminas ir Navakauskas, 2016) skiriasi nuo kombinacinio įgyvendinimo metodo tuo, kad visi skaičiavimai trunka ilgiau nei vieną taktą. Skaičiuojama lygiagrečiai, vieno takto metu atliekant kuo daugiau nepriklausomų operacijų. Šis įgyvendinimo metodas išnaudoja MP sistemos sandaros lygiagretumo savybę. Daugeliu atvejų MP sistemos skaičiavimai gali būti atliekami keliais lygiagrečiais žingsniais, ypač kai MP sistema yra sudaryta iš kelių skirtingų medžiagų.

Aptarti bendri įgyvendinimo metodai yra tinkami vienai MP sistemai LPLM įgyvendinti. Vis dėlto dažniausiai naudoti LPLM tik vienai MP sistemai nėra efektyvu. Egzistuoja taikymai, kuriuose dėl didesnio patikimumo arba dėl naudojamų skirtingų tyrimo objektų būtina vienu metu skaičiuoti daugiau nei vieną MP sistemą. Tokiu atveju bendrų įgyvendinimo būdų LPLM išteklių naudojimas tiesiškai priklauso nuo įgyvendinamų MP sistemų skaičiaus.

## 2. Siūlomas apibendrintas kombinacinis IVGTT MP sistemų įgyvendinimo būdas

Kelių įgyvendinimo atvejų sujungimo metodas gali būti taikomas našumui didinti, kai įgyvendinamos kelios tokio paties tipo MP sistemos atmainos. Skirtingose IVGTT MP sistemose skiriasi tik reguliatorių išraiškos ir koeficientų reikšmės, priklausančios nuo pasirinktų duomenų rinkinio. Šis dėsningumas išliktų nepakitęs sudarius IVGTT MP sistemą ir pagal naujus tyrimų duomenis. Šešių skirtingų IVGTT MP sistemų reguliatorių išraiškos, panaudotos šiame įgyvendinime, pavaizduotos 1 lentelėje. Visos minėtos IVGTT MP sistemos turi po keturis reguliatorius, kurių matematinės išraiškos yra labai skirtingos.

Nors skirtingų IVGTT sistemų MP gramatika nėra identiška, pačių sistemų struktūra yra tokia pati:

$$G_n = \phi_1 - \phi_2(G_{n-1}, I_{n-1}),$$

$$I_n = \phi_3(G_0, \dots, G_{n-1}) - \phi_4(I_{n-1}),$$

čia  $G_n$  – gliukozės koncentracija laikui  $n$  einant;  $I_n$  – insulino koncentracija laikui  $n$  einant;  $\phi$  – MP sistemos reguliatoriai.

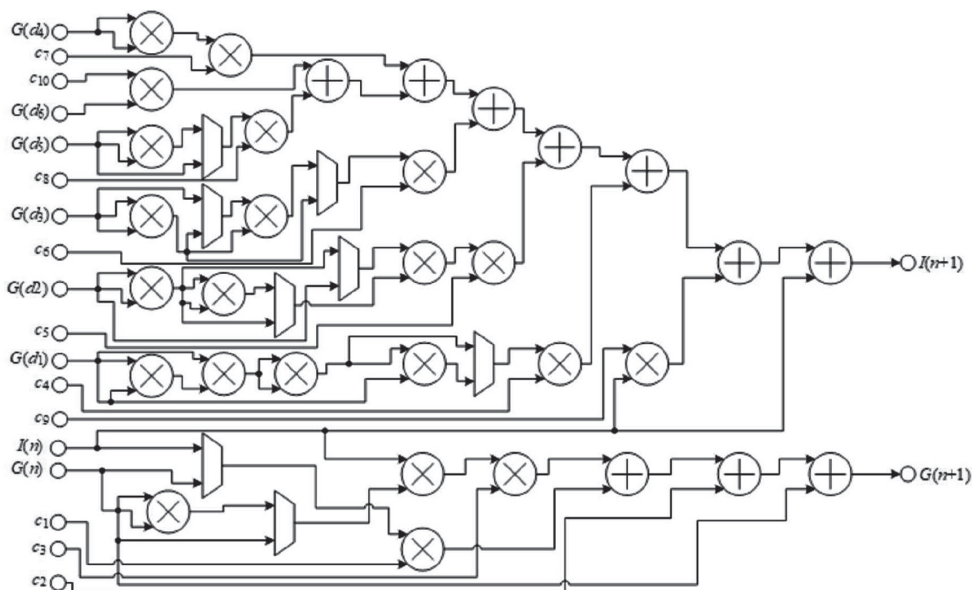
Pagrindinis apibendrinto MP sistemų įgyvendinimo tikslas – sudaryti bendrą MP sistemos išraišką, kuri aprėpia visas tam tikro MP sistemos tipo atmainas. Šios atmainos gali turėti skirtingus koeficientus arba skirtingas aritmetines operacijas reguliatorių išraiškose. Nesikeičiantys parametrai yra taisyklių ir medžiagų skaičiai. Kombinacinio įgyvendinimo būdas gali būti pritaikytas apibendrintam visų šešių IVGTT MP sistemų įgyvendinimui.

Apibendrintam įgyvendinimui pasirinkta IVGTT MP sistema turi kelias skirtingas MP gramatikos atmainas. IVGTT MP sistemos sudaromos aproksimuojant skirtingų pacientų tyrimų duomenų rinkinius. Šešios skirtingos MP sistemos panaudotos apibendrintam įgyvendinimui (1 paveikslas).

1 lentelė. Visi žinomi IVGTT MP sistemos tipai (Manca, Marchetti ir Pagliarini, 2011)

Table 1. All known types of IVGTT MP system (Manca, Marchetti, & Pagliarini, 2011)

MP tipas	Regulatoriai
IVGTT-1	$\phi_1 = 0,6$ $\phi_2 = 0,12G + 1,6 \cdot 10^{-6}G^2I$ $\phi_3 = 49,9 + 0,1G^3$ $\phi_4 = 0,84I$
IVGTT-2	$\phi_1 = 0,6$ $\phi_2 = 0,12G + 1,6 \cdot 10^{-6}G^2I$ $\phi_3 = 1,5 \cdot 10^{-5}G^6 + 0,25G_{-6}^2 + 0,17G_{-8}^2 + 2,65G_{-16} + 3,6G_{-26}$ $\phi_4 = 0,65I$
IVGTT-3	$\phi_1 = 0,011$ $\phi_2 = 6,6 \cdot 10^{-5}GI$ $\phi_3 = 0,5G_{-4}^2$ $\phi_4 = 0,16I$
IVGTT-4	$\phi_1 = 0,056$ $\phi_2 = 5,2 \cdot 10^{-4}I + 8,1 \cdot 10^{-5}GI$ $\phi_3 = 3,76 \cdot 10^{-6}G^7 + 0,74G_{-8}^2 + 0,02G_{-20}^3 + 0,21G_{-40}^2 + 10^{-4}G_{-68}^5$ $\phi_4 = 0,49I$
IVGTT-5	$\phi_1 = 0,12$ $\phi_2 = 0,02G + 1,9 \cdot 10^{-4}GI$ $\phi_3 = 0,04(G_{-2}^3 + G_{-24}^3) + 3,3 \cdot 10^{-5}G_{-6}^6 + 0,44G_{-20}^2$ $\phi_4 = 0,5I$
IVGTT-6	$\phi_1 = 0,11$ $\phi_2 = 6,2 \cdot 10^{-4}GI$ $\phi_3 = 0,1G_{-2}^2 + 0,9G_{-6} + 1,07G_{-10} + 2,4 \cdot 10^{-4} \times G_{-24}^4 + 5,4 \cdot 10^{-7}G_{-32}^6 + 5,3 \cdot 10^{-8}G_{-34}^7$ $\phi_4 = 0,4I$



1 paveikslas. Apibendrintas kombinacinis IVGTT MP sistemų įgyvendinimas: G, I – gliukozės ir insulino reikšmės;  $n$  – diskretusis laikas; d – pavėlintos reikšmės postūmio registre; c – reguliatorių koeficientai

Figure 1. Unified combinative IVGTT MP system implementation: G, I – glucose and insulin values;  $n$  – discrete time; d – delayed values from the register; c – coefficients of the regulators

Skirtingos IVGTT MP sistemos atmainos pasižymi panašiais įvesties parametrais ir aritmetinių operacijų eiliškumu. Dėl šios priežasties atskiros apibendrinto įgyvendinimo šakos gali būti įjungiamos, išjungiamos arba naudojamos kelioms skirtingoms IVGTT MP sistemoms. Skaičiuojama IVGTT MP sistema pasirenkama nustatant reikiamą įėjimo signalą. Tokiu būdu vienoje LPLM įgyvendinant kelias IVGTT MP sistemas, apibendrintas įgyvendinimo būdas įgauna pranašumą lyginant su atskirų pavienių sistemų įgyvendinimo būdais.

Svarbus apibendrinto įgyvendinimo aspektas yra tai, kad visi įmanomi koeficientai turi būti aprašyti visiems sistemų tipams, net jei tos sistemos regulatoriaus išraišką sudaro mažesnis operacijų skaičius. Esant nenaudojamos operacijoms, jų koeficientams priskiriamos 0 vertės, praleidžiant nereikalingas operacijas. Patys koeficientai saugomi „fixed“ formatu, kuris nurodo, kad naudojama fiksuoto kablelio aritmetika su ženklo bitu.

Kartu su koeficientų reikšmėmis taip pat nustatomos multiplekserių, 1 paveiksle pavaizduotų keturkampiais, reikšmės. Apibendrintam įgyvendinimui jie naudojami reikiamai skaičiavimo šakai pagal IVGTT MP sistemos tipą parinkti. Leidžiamos naudoti reikšmės 1 ir 0 nustato multiplekserio būseną ir nurodo, kuri schemos šaka turi būti naudojama. Reikšmė X naudojama norint pažymėti, kad tam tikras multiplekseris nėra naudojamas konkrečiai IVGTT MP sistemai skaičiuoti. Multiplekserių būsenų loginių reikšmių vektorius yra atskiras kiekvienam sistemos tipui ir nustatomas tokiu pačiu būdu kaip ir sistemų koeficientai. Šio vektoriaus ilgis atitinka bendrą įgyvendinti naudojamų multiplekserių skaičių.

Apibendrintam įgyvendinimui taip pat gali būti naudojami postūmio registrai. Jie reikalingi tada, kai MP sistemos skaičiavimuose naudojamos senesnės nei ankstesnio ciklo medžiagų koncentracijų reikšmės, pvz., IVGTT-2–IVGTT-6 sistemose (1 lentelė). Šios pavėlintos reikšmės saugomos postūmio registruose, juos atnaujinant kiekvieno ciklo pabaigoje.

Visas aptartas apibendrintos IVGTT MP sistemos veikimas pagrįstas bendrų LPLM išteklių dalijimusi skirtingoms sistemoms skaičiuoti. Norimas skaičiuoti sistemos tipas gali būti keičiamas kiekvieno takto metu. Tai reiškia, kad, įgyvendinus apibendrintą sistemą, atsiranda galimybė skaičiuoti visų tipų IVGTT MP sistemas, išvengiant poreikio kiekvieną iš jų įgyvendinti atskirai.

### 3. IVGTT MP sistemų, įgyvendintų apibendrintu kombinaciniu būdu, tyrimo rezultatai

Tyrimui naudotos 1 lentelėje pavaizduotos IVGTT MP sistemos. Jos įgyvendintos LPLM apibendrintu kombinaciniu būdu. Įgyvendinimui pasirinktas *Xilinx Zynq-7000 XC7Z020-1* LPLM lustas, o programinis kodas kompiliuotas naudojant *Xilinx ISE Design Suite* programinę įrangą.

Visos atskiros IVGTT MP sistemos įgyvendintos kombinaciniu būdu, o apibendrinta sistema įgyvendinta siūlomu apibendrintu kombinaciniu būdu. Įgyvendinant sistemas naudojamas 32 bitų žodžio ilgis. Pasirinkus šį

žodžio ilgį, visų minėtų IVGTT MP sistemų skaičiavimo vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 13 %. 2 lentelėje pateikiami visų įgyvendintų sistemų maksimalaus veikimo dažnio ( $f_{max}$ ) ir LPLM išteklių naudojimo (SSA elementų ir peržvalgos lentelių (angl. *look-up table*, LUT) rezultatai.

Iš gautų rezultatų matyti, kad apibendrintos IVGTT MP sistemos maksimalus veikimo dažnis yra vidutiniškai perpus mažesnis nei atskirų sistemų. Taip yra todėl, kad apibendrinta sistema, kuri geba imituoti visas šešias IVGTT MP sistemas, yra sudėtingesnė nei atskiros sistemos, gebančios imituoti tik vieną konkrečią IVGTT MP sistemą.

2 lentelė. Pavienių IVGTT MP sistemų įgyvendinimo palyginimas su apibendrintu įgyvendinimu  
Table 2. Comparison of single IVGTT MP system implementation with the unified implementation

MP sistema	$f_{max}$ , MHz	SSA elem.	P. lentelės
IVGTT-1	22	14	1044
IVGTT-2	29	16	1553
IVGTT-3	35	12	938
IVGTT-4	25	20	1420
IVGTT-5	21	26	1667
IVGTT-6	26	26	1872
Iš viso:		114	8494
Apibendrinta IVGTT	13	84	4317

Atskirų sistemų greitaveika taip pat skiriasi ir kinta nuo 21 iki 35 MHz. Greičiausiai veikia IVGTT-3 sistema, kurios regulatoriams apskaičiuoti reikalingas mažiausias aritmetinių operacijų skaičius. Jei visos atskiros IVGTT MP sistemos būtų įgyvendintos vienoje LPLM, bendra sistema veiktų lėčiausios IVGTT-5 sistemos 21 MHz dažniu. Tokiu atveju apibendrintos IVGTT MP sistemos greitaveika būtų mažesnė tik 38 %.

Atskirų sistemų LPLM išteklių naudojimas labai priklauso nuo pasirinktos sistemos tipo. Greitaveikos ir LPLM išteklių naudojimo atžvilgiu IVGTT-3 sistema yra našiausia. Daugiausia SSA elementų naudoja IVGTT-5 ir IVGTT-6 sistemos (po 26 elementus), o daugiausia peržvalgos lentelių (1872) naudoja IVGTT-6 sistema.

LPLM išteklių naudojimo požiūriu apibendrinta IVGTT MP sistema yra pranašesnė, kai įgyvendinami visi IVGTT sistemos tipai. Naudojant atskiras IVGTT MP sistemas, norint gauti visų sistemų rezultatus, reikėtų visas šias sistemas įgyvendinti LPLM. Tokiu atveju būtų panaudoti 114 SSA elementai ir 8494 peržvalgos lentelės. Apibendrinta sistema tokiu atveju labai sutaupo LPLM išteklių, nes naudojant tik 84 SSA elementus ir 4317 peržvalgos lentelių gaunami tie patys skaičiavimo rezultatai.

### Išvados

1. Pasiūlytas originalus intraveninio gliukozės tolerancijos testo metabolinės P sistemos įgyvendinimo būdas,

apibendrinantis šešis skirtingus sistemos tipus vienu kombinaciniu įgyvendinimu ir leidžiantis bet kurią iš šių sistemų imituoti lauku programuojama logine matrica.

2. Nauja kombinacinė LPLM sistema, esant tam pačiam skaičiavimų tikslumui, reikalauja 36 % mažiau SSA elementų ir 49 % mažiau peržvalgos lentelių višoms IVGTT MP sistemoms apskaičiuoti, lyginant su šešiomis atskiriomis sistemomis.

Atliekant tolesnius tyrimus verta palyginti apibendrintas IVGTT MP sistemas, įgyvendintas su skirtingais žodžio ilgiais. Taip pat verta atsižvelgti į kitus LPLM įgyvendinimo kokybės parametrus, pvz., galios suvartojimą.

## Literatūra

- Bao, B., Mitrea, C., Wijesinghe, P., Marchetti, L., Girsch, E., Farr, R. L., Boerner, J. L., Mohammad, R., Dyson, G., Terlecky, S. R., & Bollig-Fischer, A. (2017). Treating triple negative breast cancer cells with erlotinib plus a select antioxidant overcomes drug resistance by targeting cancer cell heterogeneity. *Scientific Reports*, 7, 44125. <https://doi.org/10.1038/srep44125>
- Bianco, L., Manca, V., Marchetti, L., & Petterlini, M. (2007). Psim: a Simulator for Biomolecular Dynamics Based on P Systems. *IEEE Congress on Evolutionary Computation. CEC 2007*, Singapore (pp. 883-887). <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424563>
- Bollig-Fischer, A., Marchetti, L., Mitrea, C., Wu, J., Kruger, A., Manca, V., & Draghici, S. (2014). Modeling time-dependent transcription effects of HER2 oncogene and discovery of a role for E2F2 in breast cancer cell-matrix adhesion. *Bioinformatics*, 30(21), 3036-3043. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu400>
- Byrne, M. (2016). Intel Bets \$16.7 Billion on the massively parallel future of computing. Retrieved from [https://motherboard.vice.com/en\\_us/article/nz7vmd/intel-bets-167-billion-on-the-massively-parallel-future](https://motherboard.vice.com/en_us/article/nz7vmd/intel-bets-167-billion-on-the-massively-parallel-future)
- Castellini, A., & Manca, V. (2009). MetaPlab: a Computational Framework for Metabolic P Systems. *Membrane Computing*. Springer Berlin Heidelberg (pp. 157-168). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-95885-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-540-95885-7_12)
- Guiraldelli, R. H. G., & Manca, V. (2015). Automatic translation of MP+V systems to register machines. *International Conference on Membrane Computing* (pp. 185-199). Valencia, Spain. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28475-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28475-0_13)
- Kulakovskis, D., Sledevic, T., Gedminas, A., & Navakauskas, D. (2016). Alternative implementations of metabolic P system in FPGA. 2016 *IEEE 4<sup>th</sup> workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Vilnius (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2016.7821816>
- Kulakovskis, D., & Navakauskas, D. (2016). Automated metabolic P system placement in FPGA. *Electrical Control and Communication engineering*, 10(1), 5-12. <https://doi.org/10.1515/ecce-2016-0001>
- Mametjanov, A., Balaprakash, P., Choudary, C., Hovland, P. D., Wild, S. M., & Sabin, G. (2015). Autotuning FPGA design parameters for performance and power. *2015 IEEE 23rd Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, Vancouver, Canada (pp. 84-91). <https://doi.org/10.1109/FCCM.2015.54>
- Manca, V. (2013). *Infobiotics: information in biotic systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36223-1>
- Manca, V., Marchetti, L., & Pagliarini, R. (2011). MP modeling of glucose-insulin interactions in the intravenous glucose tolerance test. *International Journal of Natural Computing Research (IJNCR)*, 2(3), 13-24. <https://doi.org/10.4018/jncr.2011070102>
- Paun, G., Rozenberg, G., & Salomaa, A. (2010). *The Oxford handbook of membrane computing*. Oxford University Press, Inc.
- Siddique, N., & Adeli, H. (2015). Nature inspired computing: An overview and some future directions. *Cognitive Computation*, 7(6), 706-714. <https://doi.org/10.1007/s12559-015-9370-8>
- Sledevič, T., & Navakauskas, D. (2015). Towards optimal FPGA implementation of lattice-ladder neuron and its training circuit. 2015 *IEEE 3<sup>rd</sup> workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Riga, Latvia (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2015.7367311>
- Trimberger, S. M. (2018). Three ages of FPGAs: A retrospective on the first thirty years of FPGA technology. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 10(2), 16-29. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2392104>
- Xilinx. (2014). 7 Series FPGA DSP48E1 slice, user guide. Retrieved from <https://www.xilinx.com/support/documentation/selection-guides/7-series-product-selection-guide.pdf>

## INTRAVENOUS GLUCOSE TOLERANCE TEST METABOLIC P SYSTEM IMPLEMENTED USING UNIFIED COMBINATIVE TECHNIQUE

D. Kulakovskis

Abstract

Metabolic P (MP) systems are a part of the infobiotics research field. The intravenous glucose tolerance test (IVGTT) MP system models glucose-insulin interactions. MP system implementation in software is well researched, although there is a lack of techniques for hardware implementation, specifically with field programmable gate arrays. In this article the existing techniques are examined first, including combinative, single digital signal processor element, and pipelined. Then the specifics of six different IVGTT MP systems are analyzed. Having in mind these specifics, a new unified combinative IVGTT MP system implementation in field programmable gate arrays is proposed. Carried out experimental investigation results confirm, that the proposed unified system in comparison with single IVGTT MP systems, uses 36% less digital signal processor and 49% less look-up table resources of the field programmable gate arrays.

**Keywords:** field programmable gate array, metabolic P system, infobiotics, intravenous glucose tolerance test, parallel computation, fixed point arithmetic.