Aukštadažnės stimuliacijos poveikis FitzHugh-Nagumo neuronui

Irmantas Ratas, Kęstutis Pyragas

Fizinių ir technologijos mokslų centras, A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius

irmantas.ff.vu@gmail.com

Įvadas

Manoma, jog pagrindinė žmogaus motorikos sutrikimų, tokių kaip Parkinsono liga, priežastis yra sinchronizuota neuronų veikla. Šiai veiklai slopinti naudojama giluminė aukštadažnė smegenų stimuliacija. Pacientui į nustatytas smegenų sritis yra įsmeigiami elektrodai, kuriais perduodami elektriniai generatoriaus virpesiai. Nors minėtas būdas jau taikomas ir praktikoje, tačiau stimuliacijos veikimo mechanizmas nėra visiškai suprastas.

Kaip aiškinta iki šiol?

- Stimuliacija slopina sąveikas tarp neuronų;
- Stimuliacija slopina savaimines neurono osciliacijas;

Kas pasiūlyta šiame darbe?

- Aukštadžnė stimuliacija neleidžia elektriniam impulsui susidaryti ir sklisti neuronu.

Darbo tikslas: kokybiškai ištirti procesus vykstančius neurone, kai jis visas veikiamas aukštadažne stimuliacija.

Modelis

Realaus neurono veikimas paremtas potencialo skirtumo tarp ląstelės membranos vidaus ir išorės kitimu. Šis kitimas vyksta tiek laike tiek erdvėje. Pasirinktas vienas iš paprasčiausių modelių – Fitzhugh-Nagumo neuronas:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v - \frac{v^3}{3} - w + D\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + a\cos(\omega t), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \varepsilon(v + \beta - \gamma w), \quad (1b)$$

kur v – neurono membranos potencialas, w- kompensacinis kintamasis, D - difuzijos koeficientas, a ir ω stimuliacijos amplitudė ir dažnis. Parametras $\varepsilon << 1$, o dydžiai α ir β parinkti taip kad nesant stimuliacijos neuronas būtų sužadinimo rėžime (t.y. neuronas yra rimties būsenos, tačiau bet koks trumpas išorinis poveikis, viršijantis slenkstinę vertę, sužadins potencialo nuokrypio sklidimą).

Analizė

Darbe naudojami du matematiniai metodai:

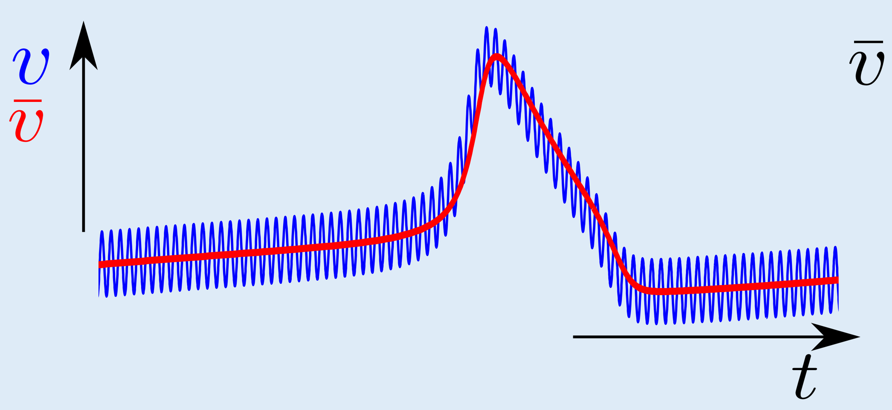
- **Dviejų laikų metodas** [2] – sistema (1) stimuliuojama periodu daug mažesniu už sistemos savuosius laiko mastelius, todėl sprendinį galima užrašyti, kaip sumą lėtai kintančios dalies $\bar{v}$ ir greitai kintančios harmoninės funkcijos:

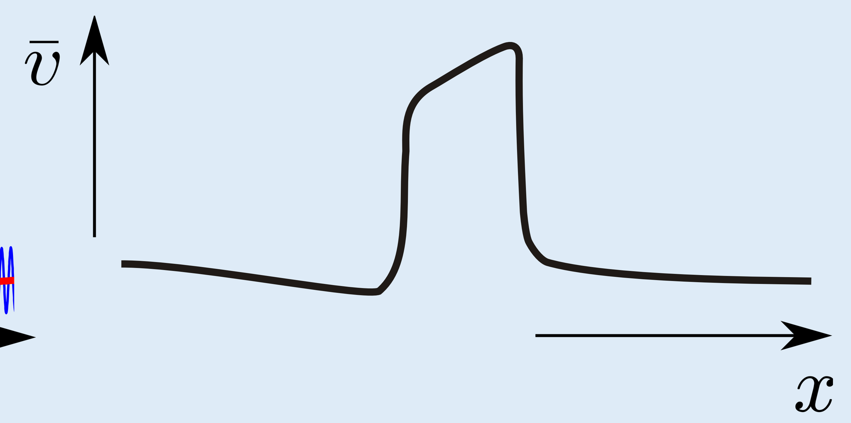
$$v(t) \approx \bar{v}(t) + A\sin(\omega t), \quad (2a)$$

$$w(t) \approx \bar{w}(t). \quad (2b)$$

  Dydis $A = a/\omega$ vadinamas stimuliacijos intensyvumu. Šis metodas leido iš nagrinėjamų lygčių eliminuoti tiesioginę priklausomybę nuo laiko.

- **Singuliarios perturbacijos teorija** [3] – mažas parametras ε impulsą sukaido į priekinį ir galinį frontus, kuriuose potencialas $\bar{v}$ kinta labai greitai, bei lėtos relaksacijos atkarpas, kur potencialo kitimas labai lėtas. Atskirai analizuojant šias atkarpas riboje $\varepsilon \to 0$ surandama impulso greičio c priklausomybė nuo stimuliacijos intensyvumo A.





Literatūra

[1] I. Ratas, K. Pyragas, Nonlinear Dyn. (2011), DOI 10.1007/s11071-011-0197-x

[2] I. Blekhman, *Selected topics in vibrational mechanics*, (Singapore, London, 2004).

[3] A. C. Scott, Reviews of Modern Physics **47**, 487 (1975).

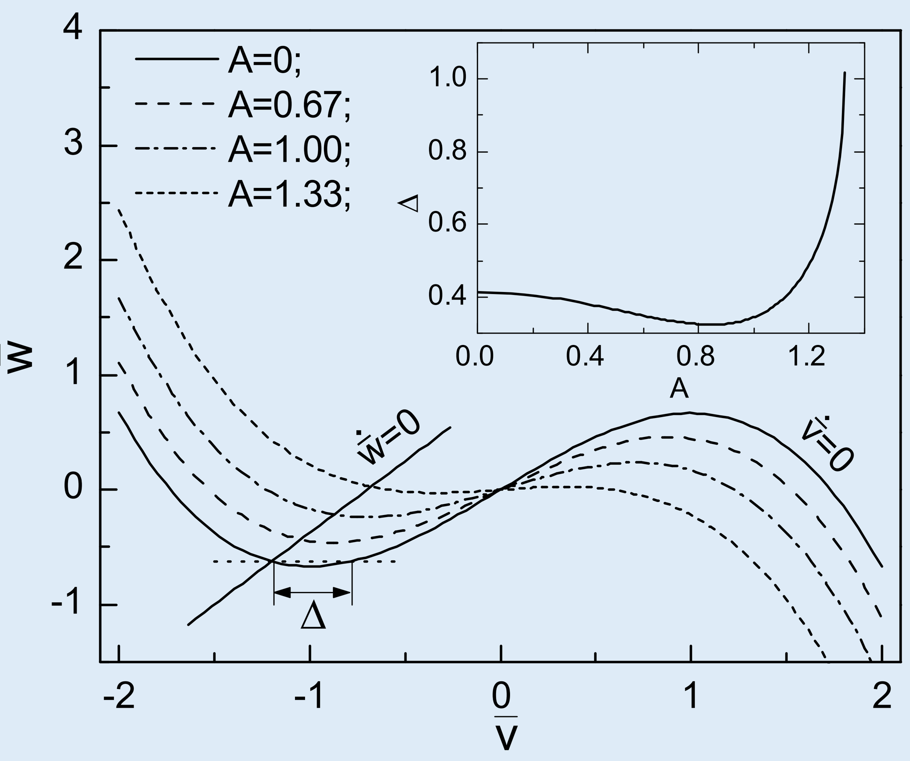
Suvidurkintos lygtys

Panaudojus dviejų laikų metodą randamos suvidurkintos lygtys, kurios aprašo lėtai kintančias sprendinio (2) dedamąsias:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \bar{v}(1 - \frac{A^2}{2}) - \frac{\bar{v}^3}{3} - \bar{w} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = \varepsilon(\bar{v} + \beta - \gamma\bar{w}). \quad (3b)$$

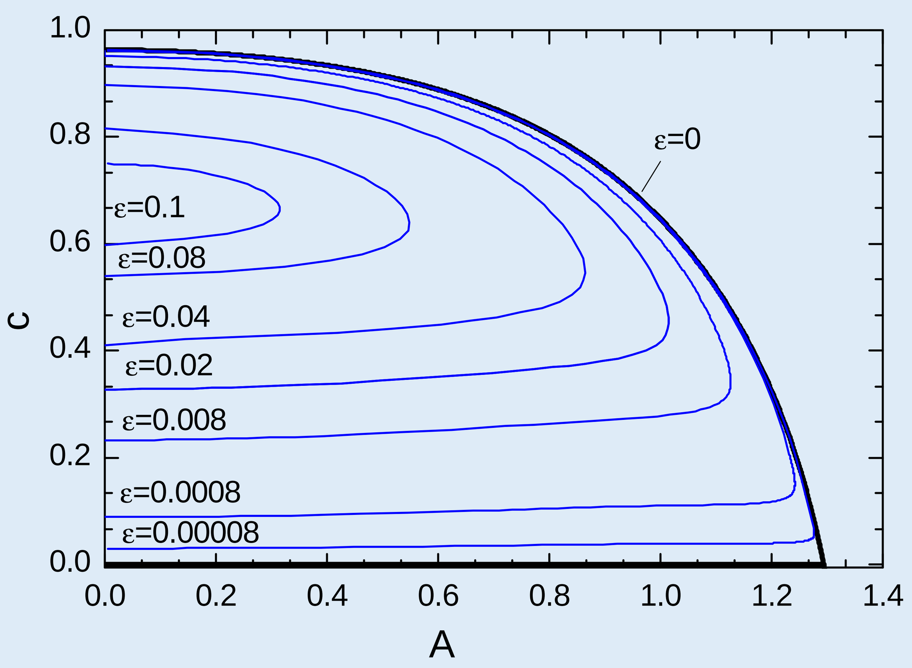
Kai stimuliacija įjungiama lygtyje (3a) atsiranda narys $-\frac{A^2}{2}$, kuris keičia nulinių izoklinių formą, tuo pačiu didindamas sužadinimui reikalingo potencialo slenkstinę vertę Δ (žr. 1pav.).



1 pav. Vidurkintų lygčių (3) nulinių izoklinių pavidalo priklausomybė nuo stimuliacijos intensyvumo A. Mažajame grafike pavaizduotas sužadinimo atstumo Δ kitimas nuo A.

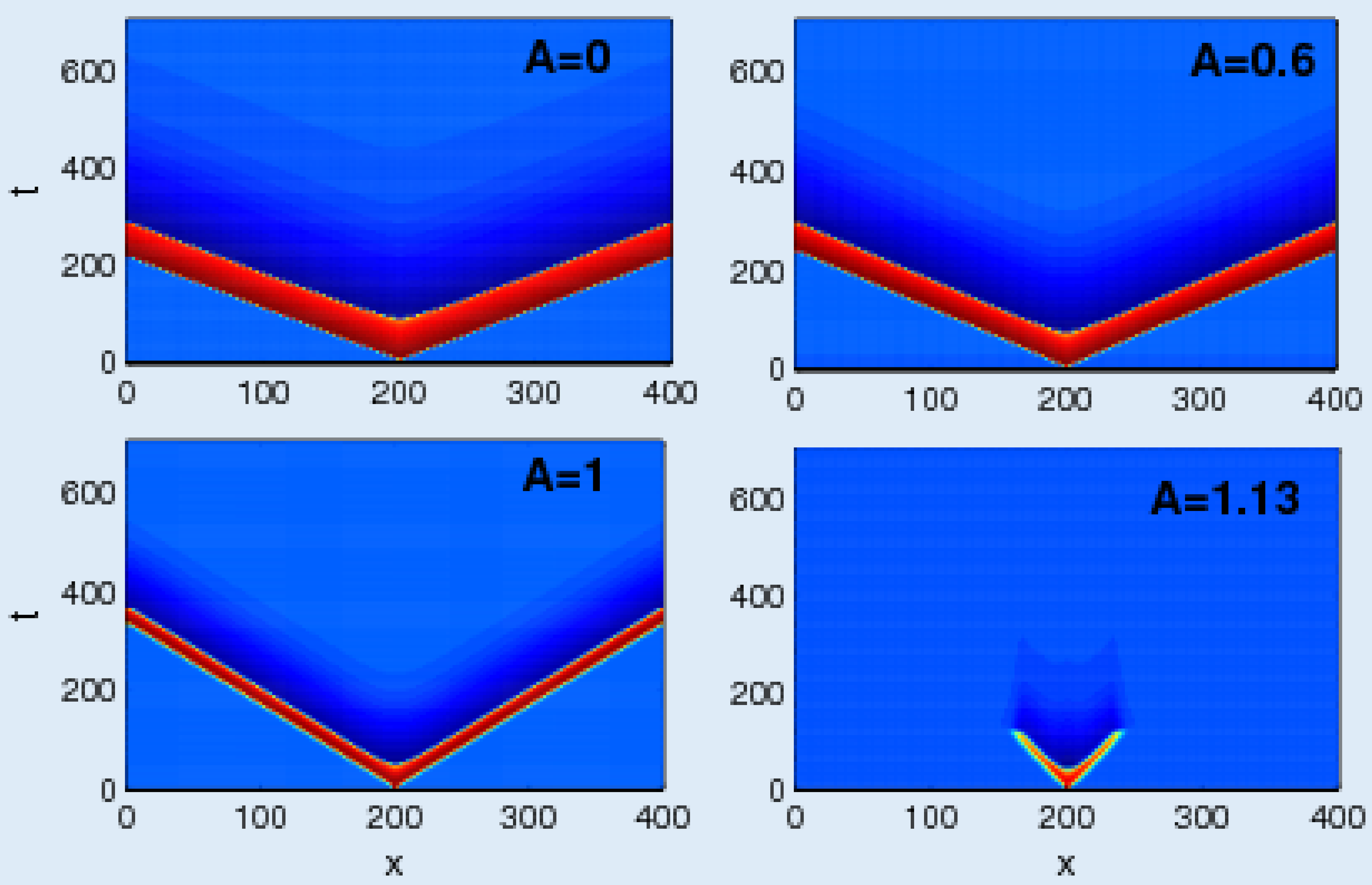
Bėgančio impulso sprendinys

Sistemą (3) tenkina stabilus (didesnio greičio) ir nestabilus (mažesnio greičio) impulsai. Perrašius (3) lygtis judančioje koordinačių sistemoje ir pasinaudojus singuliarios perturbacijos metodu galima įverinti greičio c priklausomybę nuo stimuliacijos intensyvumo A (žr. 2pav.). Kai $\varepsilon > 0$ priklausomybė $c(A)$ nustatinėjama skaitmeniškai.



2 pav. Impulsų greičio priklausomybė nuo stimuliacijos intensyvumo A. Juodos kreivės nustatytos singuliarios perturbacjos metodu, mėlynos – skaitmeniškai.

Pasiekus kritinį stimuliacijos intensyvumą stabilaus ir nestabilaus impulsų greičiai susilygina, o šią vertę viršijus sistemoje impulsai susidaryti nebegali. Kreivių $c(A)$ teisingumą patvirtina ir suvidurkintų lygčių (3) skaitmeninis integravimas (žr. 3pav.).



3 pav. Kol stimuliacijos intensyvumas mažas, sužadinus centrinę neurono dalį, jame susiformuoja ir priešingomis kryptimmis sklinda impulsai. Parametrai: $a = 0.7$, $b = 0.8$, $\varepsilon = 0.008$.

Padėka

Mokslinis tyrimas finansuojamas Europos socialinio fondo lėšomis pagal visuotinės dotacijos priemonę.