

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

ELENA ADOMAITIENĖ

NETIESINIŲ DINAMINIŲ SISTEMŲ PUSIAUSVYROS IR SINCHRONIJOS
VALDYMO METODŲ PLĖTOJIMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2017 metai

Disertacija rengta 2012–2017 metais Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinis vadovas – habil. dr. Arūnas Vytautas Tamaševičius (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Mokslinis konsultantas – doc. dr. Gytis Mykolaitis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje.

Pirmininkas – prof. habil. dr. Kęstutis Pyragas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

prof. habil. dr. Antanas Čenys (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

prof. dr. Celso Grebogi (Aberdyno universitetas, Jungtinė Karalystė, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

prof. habil. dr. Bronislovas Kaulakys (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

dr. Irmantas Ratas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje 2018 m. sausio mėn. 9 d. 14 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro A101 salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, LT-10257 Vilnius.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2017 m. gruodžio mėn. 4 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU svetainėje adresu:

<http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

ELENA ADOMAITIENĖ

DEVELOPMENT OF METHODS FOR CONTROLLING EQUILIBRIUM AND
SYNCHRONY OF NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS

Summary of doctoral dissertation
Physical sciences, physics (02P)

Vilnius, 2017

Dissertation was prepared at the Center for Physical Sciences and Technology from 2012 to 2017.

Scientific supervisor – dr. habil. Arūnas Tamaševičius (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P).

Scientific advisor – associate prof. dr. Gytis Mykolaitis (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P).

Dissertation will be defended at the public meeting of the Defence Council.

Chairman – prof. dr. habil. Kęstutis Pyragas (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P).

Members:

prof. dr. habil. Antanas Čenys (Vilnius Gediminas Technical University, physical sciences, physics – 02P);

prof. dr. Celso Grebogi (University of Aberdeen, United Kingdom, physical sciences, physics – 02P);

prof. dr. habil. Bronislovas Kaulakys (Vilnius University, physical sciences, physics – 02P);

dr. Irmantas Ratas (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P).

The public defence of the dissertation will be held at 2 p.m. on the 9th of January, 2018 in room A101 at the Center for Physical Sciences and Technology.

Address: Saulėtekio al. 3, LT-10257 Vilnius, Lithuania.

Summary of the dissertation was distributed on 4th of December, 2017.

The dissertation is available at the libraries of Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology or at website of Vilnius University:

<http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

TURINYS

Santrumpos	5
Įvadas	6
Autorės straipsniai, įtraukti į disertaciją	8
Konferencijų sąrašas	11
1. Dinaminių sistemų pusiausvyros ir sinchronijos valdymas	13
2. Pyrago nestabiliojo filtro metodas balno pusiausvyrai stabilizuoti	13
3. Sinerginiai valdymo metodai balno pusiausvyrai stabilizuoti	15
4. Pakopiniai grįžtamojo ryšio metodai pusiausvyrai stabilizuoti	19
5. FitzHugh–Nagumo osciliatorių pusiausvyros ir sinchronijos valdymas	21
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	28
Apie autorę	29
Literatūra	30
Main results and conclusions	31
About the author	32

SANTRUMPOS

ADF	– aukštųjų dažnių filtras
DH	– Duffing–Holmes
FHN	– FitzHugh–Nagumo
NP	– nestabili pusiausvyra
SP	– stabili pusiausvyra
VKF	– valdymas kombinuotuoju filtru
VNF	– valdymas nestabilioju filtru
VNFI	– valdymas nestabilioju filtru ir išvestine
VSF	– valdymas stabiliuoju filtru
ŽDF	– žemųjų dažnių filtras

IVADAS

Temos svarba

Natūralių ir dirbtinių sistemų stabilumas yra vertinga, siekiama savybė. Dinaminių sistemų nestabilios pusiausvyros (NP) stabilizavimas yra svarbi problema tiksluosiuose moksluose ir inžinerijoje, kai periodiniai arba chaotiniai svyravimai yra nepageidaujami reiškiniai. Naudojant įprastinius valdymo metodus, pvz., proporcinio grįžtamojo ryšio metodą [Kuo, 1995; Ogata, 2010] reikia žinoti dinaminės sistemos matematinį modelį arba bent tikslias NP koordinates fazinėje erdvėje. Tačiau daugelyje realių sudėtingų sistemų, ypač biologijoje, fiziologijoje, ekonomikoje, sociologijoje ir chemijoje nei tikslūs modeliai, nei tikslios NP koordinatės iš anksto nėra žinomi. Be to, laikui bėgant, NP gali pasikeisti dėl išorinių nežinomų ir nenuspėjamų jėgų poveikio. Todėl tokiais atvejais reikalingi adaptyvūs metodai, nepriklausantys nuo sistemos modelio ir nereikalaujantys NP koordinačių, automatiškai aptinkantys ir stabilizuojantys nežinomas NP būsenas [Rulkov *et al.*, 1994; Namajūnas *et al.*, 1995; Pyragas *et al.*, 2002].

Sinchronizacija yra universalus ir paplitęs reiškinys, dažnai sutinkamas gamtoje, moksle, inžinerijoje ir socialiniame gyvenime [Pikovsky *et al.*, 2003]. Susietieji osciliatoriai ir jų masyvai, kuriuose pasireiškia sinchronizacija, yra labai įvairūs: pradedant švytuokliniais laikrodžiais, elektroniniais generatoriais, lazeriais, cheminėmis sistemomis ir baigiant biologinėmis populiacijomis. Dažniausiai sinchronizacija pasireiškia kaip teigiamas reiškinys, tačiau kartais ji turi neigiamą įtaką, pvz., stipri sinchronizacija žmogaus smegenyse. Manoma, kad impulsų sinchronizacija neuroniniuose masyvuose sukelia Parkinsono ligos simptomus [Rosenblum & Pikovsky, 2004]. Todėl teoriniai ir praktiniai metodai, skirti susietųjų osciliatorių sinchronizacijos slopinimui, ypač taikant juos neuronų masyvams, yra labai svarbūs [Popovich *et al.*, 2005; Pyragas *et al.*, 2007].

Darbo tikslai:

1. Greitų grįžtamojo ryšio metodų plėtojimas, naudojant valdymą nestabiliuoju filtru, stabiliuoju filtru, proporciniu grįžtamoju ryšiu, siekiant stabilizuoti įvairias pusiausvyros būsenas su iš anksto nežinomomis koordinatėmis silpnai ir stipriai slopstančiose dinaminėse sistemose.
2. Valdymo metodų plėtojimas, siekiant desinchronizuoti arba nuslopinti vidutiniu lauku susietus osciliatorius.

Darbo užduotys:

1. Sukurti Duffing–Holmes sistemos elektroninį analogą.
2. Ištirti nestabiliojo filtro metodo galimybes perjungti dinaminę sistemą iš stabiliosios pusiausvyros į nestabilią pusiausvyrą.
3. Sukurti konservatyviojo balno pusiausvyros elektroninį analogą.
4. Sukurti kompleksinius grįžtamojo ryšio metodus, panaudojant:
 - (a) lygiagrečiai veikiančius nestabilųjį ir stabilųjį filtrus,
 - (b) tiesiškai susietus nestabilųjį ir stabilųjį filtrus,
 - (c) nestabilųjį filtrą kartu su išvestinės bloku,
 - (d) netiesinį grįžtamąjį ryšį.
5. Išplėtoti matematinius metodus, skirtus pusiausvyros koordinatėms apskaičiuoti.
6. Sukurti FitzHugh–Nagumo (FHN) osciliatoriaus elektroninio analogo asimetrinę versiją ir FHN osciliatorių, susietų vidutiniu lauku, masyvą.
7. Išplėtoti grįžtamojo ryšio metodus, įgyvendinančius atstumiantįjį susiejimą (*angl.* repulsive coupling) ir vidutinio lauko panaikinimą (*angl.* nullifying).
8. Pritaikyti stabilųjį filtrą susietųjų FHN osciliatorių virpesiams slopinti.

Nauji moksliniai rezultatai:

1. Parodyta, kad valdymas nestabiliuoju filtru gali perjungti sistemą iš stabiliosios pusiausvyros į nestabilią pusiausvyrą nejudančiose (nesvyruojančiose ir nesisukančiose) dinaminėse sistemose.
2. Pademonstruota, kad balno pusiausvyrą konservatyviose ir silpnai slopstančiose sistemose galima stabilizuoti sinerginiais metodais, grįžtamojo ryšio kilpoje kartu su nestabiliuoju filtru panaudojant stabilųjį filtrą arba išvestinės bloką.
3. Išplėtoti valdymo proporciniu grįžtamoju ryšiu metodai, skirti nežinomų pusiausvyros būsenų koordinatėms apskaičiuoti.
4. Pademonstruota, kad dvipoliai grįžtamojo ryšio valdikliai arba desinchronizuoja, arba slopina susietųjų osciliatorių masyvą.

Pagrindiniai moksliniai teiginiai:

1. Nestabilusis filtras invertuoja stabiliąsias ir nestabiliąsias pusiausvyros būsenas, todėl dinaminę sistemą galima perjungti iš nejudančios stabiliosios pusiausvyros į iš anksto nežinomą nestabiliąją pusiausvyrą.
2. Grįžtamojo ryšio kilpa, sudaryta iš nestabiliojo filtro bei stabiliojo filtro arba išvestinės bloko, greitai stabilizuoja balno pusiausvyrą konservatyviose sistemose ir sistemose su mažu slopinimu.
3. Pasitelkiant natūralias arba dirbtinai sukurtas stabiliąsias pusiausvyros būsenas, apskaičiuojamos nežinomų nestabiliųjų pusiausvyros būsenų koordinatės, kurias galima panaudoti proporciniame grįžtamajame ryšyje.
4. Valdikliai su grįžtamoju ryšiu, naudojantys neigiamo impedanso keitiklius, desinchronizuoja arba nuslopina vidutiniu lauku susietus FitzHugh–Nagumo osciliatorius.

Autorės indėlis

Elena Adomaitienė sudarė (vadovaujant moksliniam vadovui) diferencialines lygtis ir matematiškai išanalizavo pusiausvyros būsenų stabilumą. Autorė atliko visus skaitmeninius skaičiavimus, naudodama MATHEMATICA programą, ir kai kurių elektrinių grandinių modeliavimą, naudodama ELECTRONICS WORKBENCH simulatorių.

AUTORĖS STRAIPSNIAI, ĮTRAUKTI Į DISERTACIJĄ

I. Publikacijos, įrašytos *Clarivate Analytics* duomenų bazėje *Web of Science*

- [1] Tamaševičiūtė E., Tamaševičius A., Mykolaitis G., Bumelienė S., Lindberg E., Analogue electrical circuit for simulation of the Duffing–Holmes equation, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2008, V.13, No.2, pp.241–252. ISSN 1392–5113. IF–n/a, Q–n/a.
- [2] Tamaševičius A., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Switching from stable to unknown unstable steady states of dynamical systems, *Physical Review E*, 2008, V.78, No.2, 026205. ISSN 1539–3755. IF=2.508, Q1.
- [3] Tamaševičius A., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Kirvaitis R., Stoop R. Neural spike suppression by adaptive control of an unknown steady state,

- Lecture Notes in Computer Science*, 2009, V.5768, part I, pp.618–627. ISSN 0302–9743. IF–n/a, Q–n/a.
- [4] Tamaševičius A., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Kirvaitis R. Stabilization of saddle steady states of conservative and weakly damped dissipative dynamical systems, *Physical Review E*, 2010, V.82, No.2, 026205. ISSN 1539–3755. IF=2.352, Q1.
- [5] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Tamaševičius A. Analogue modelling an array of the FitzHugh–Nagumo oscillators, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2012, V.17, No.1, pp.118–125. ISSN 1392–5113. IF=0.861, Q2.
- [6] Tamaševičius A., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G. Feedback controller for destroying synchrony in an array of the FitzHugh–Nagumo oscillators, *Applied Physics Letters*, 2012, V.101, No.22, 223703. ISSN 1077–3118. IF=3.794, Q1.
- [7] Tamaševičiūtė E., Tamaševičius A., Stabilizing uncertain steady states of some dynamical systems by means of proportional feedback, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2013, V.18, No.1, pp.86–98. ISSN 1392–5113. IF=0.914, Q2.
- [8] Tamaševičius A., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S. Enhanced control of saddle steady states of dynamical systems, *Physical Review E*, 2013, V.88, No.3, 032904. ISSN 1539–3755. IF=2.326, Q1.
- [9] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Stabilizing saddles, *Physical Review E (Rapid Communication)*, 2013, V.88, No.6, 060901. ISSN 1539–3755. IF=2.326, Q1.
- [10] Tamaševičiūtė E., Tamaševičius A., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tracking and controlling unstable steady states of dynamical systems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, V.19, No.3, pp.649–655. ISSN 1007–5704. IF=2.866, Q1.
- [11] Tamaševičius A., Mykolaitis G., Tamaševičiūtė E., Bumelienė S., Two-terminal feedback circuit for suppressing synchrony of the FitzHugh–Nagumo oscillators, *Nonlinear Dynamics*, 2015, V.81, No.1–2, pp.783–788. ISSN 0924–090X. IF=3.000, Q1.

- [12] Adomaitienė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Adaptive nonlinear controller for stabilizing steady states of dynamical systems, *Nonlinear Dynamics*, 2015, V.82, No.4, pp.1743–1753. ISSN 0924–090X. IF=3.000, Q1.
- [13] Adomaitienė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Suppressing activity of an array of coupled Fitzhugh–Nagumo oscillators, *Acta Physica Polonica A*, 2016, V.129, No.4, pp.562–564. ISSN 0587–4246. IF=0.469, Q4.
- [14] Adomaitienė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Inhibition of spikes in an array of coupled FitzHugh–Nagumo oscillators by external periodic forcing, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2017, V.22, No.3, pp.421–429. ISSN 1392–5113. IF=0.952, Q2 (JCR’2016).
- [15] Adomaitienė E., Bumelienė S., Mykolaitis G., Tamaševičius A., Stabilization of a network of the FitzHugh–Nagumo oscillators by means of a single capacitor based RC filter feedback technique, *Complexity*, 2017, V.2017, 324879. ISSN 1099–0526. IF=4.621, Q1 (JCR’2016).

II. Publikacijos konferencijų darbuose

- [16] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Nežinomų rimties būsenų stabilizavimas Dufingo–Holmsio tipo sistemoje nestabiliuojant valdikliu, *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ (Bioinžinerija ir bioinformatika; Fizika ir fizinė kompiuterija)*, straipsnių rink., 2008 m. balandžio 3–4 d., Vilnius, pp.48–55. Vilnius: Technika, 2008. 192 p. ISBN 978-9955-28-301-0.
- [17] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Adaptive control of steady states and slowly varying states in the Duffing–Holmes type system with unstable high-pass filter, *Proc. 2008 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA’2008*, Sep7–10, 2008, Budapest, Hungary, pp.309–312. ISBN 978-4-88552-234-5 C3055.
- [18] Tamaševičius A., Bumelienė S., Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Kirvaitis R., Lindberg E. Controlling unknown saddle type steady states of dynamical systems with latency in the feedback loop, *Proc. 2009 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA’2009*, Oct18–21, 2009, Sapporo, Japan, pp.70–73. ISBN 978-4-88552-241-3 C3055.

- [19] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Adaptive stabilization of a saddle steady state of a conservative dynamical system: a spacecraft at the Lagrange point L2 of the Sun–Earth system, *Proc. 2010 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2010*, Sep5–9, 2010, Krakow, Poland, pp.442–445. ISBN 978-4-88552-251-2 C3055.
- [20] Tamaševičiūtė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., ‘Three-shot’ technique for stabilizing unknown saddle steady states of dynamical systems, *Proc. 2014 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2014*, Sep14–18, 2014, Lucerne, Switzerland, pp.842–845.
- [21] Adomaitienė E., Mykolaitis G., Bumelienė S., Tamaševičius A., Feedback controller for damping oscillations in arrays of coupled neurons, *Proc. 18th Int. Conf. Biomedical Engineering 2014*, V.18, No.1, Nov27–28, 2014, Kaunas, Lithuania, pp.51–54. ISSN 2029–3380.
- [22] Tamaševičius A., Adomaitienė E., Bumelienė S., Mykolaitis G., Lindberg E., Negative resistance circuit for damping an array of coupled FitzHugh–Nagumo oscillators, *Proc. 22nd Eur. Conf. Circuit Theory and Design, ECCTD'2015*, Aug24–26, 2015, Trondheim, Norway, ISBN 978-1-4799-9877-7. DOI 10.1109/ECCTD.2015.7300082.

KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

(tarptautinės [C1–C20] ir nacionalinės [C21–C28] konferencijos)

- C1. 10th Experimental Chaos Conf., ECC'10, June 3–6, 2008, Catania, Italy (stend.)
- C2. 2008 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2008, September 7–10, Budapest, Hungary (žod.*)
- C3. 17th Int. Workshop Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'2009, June 21–24, Rapperswil, Switzerland (žod.*)
- C4. 19th Int. Conf. Artificial Neural Networks, ICANN'2009, September 14–17, Limassol, Cyprus (žod.)
- C5. 2009 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2009, October 18–21, Sapporo, Japan (žod.)
- C6. 18th Int. Workshop Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'2010, May 26–28, Dresden, Germany (žod.)
- C7. 2010 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2010, September 5–9, Krakow, Poland (žod.*)
- C8. 15th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, WMSCI'2011, July 19–22, Orlando, USA (žod.)

- C9. 5th Int. Scientific Conf. Physics and Control, PhysCon'2011, September 5–8, Leon, Spain (stend.*)
- C10. 2013 IEEE 4th Latin American Symp. Circuits and Systems, LASCAS'2013, February 27 – March 1, Cusco, Peru (žod.)
- C11. 21st Int. Conf. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'2013, July 10–12, Bari, Italy (žod. ir žod.*)
- C12. Experimental Chaos and Complexity Conf. 2014, ECC'2014, August 25–28, Aberdeen, UK (stend. ir stend.)
- C13. 2014 Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'2014, September 14–18, 2014, Lucerne, Switzerland (žod.*)
- C14. 18th Int. Conf. Biomedical Engineering, November 27–28, 2014, Kaunas, Lithuania (žod.*)
- C15. 5th Int. Congress 'Advances in Applied Physics and Materials Science', APMAS'2015, April 16–19, Oludeniz, Turkey (žod.*)
- C16. Eur. Conf. Circuit Theory and Design, ECCTD'2015, August 24–26, Trondheim, Norway (žod.)
- C17. 23rd Int. Conf. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'2015, September 7–11, Como, Italy (žod.)
- C18. 2016 Int. Conf. Systems, Control, Signal Processing and Informatics, May 28–30, Riga, Latvia (žod.)
- C19. Int. Conf. 'Perspectives in Nonlinear Dynamics', PNLD'2016, July 24–29, Berlin, Germany (stend.)
- C20. 25th Int. Workshop Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'2017, June 5–7, Zernez, Switzerland (žod.)
- C21. 10-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija "Mokslas – Lietuvos ateitis" (Bioinžinerija ir bioinformatika; Fizika ir fizinė kompiuterija), 2007 m. balandžio 5–6 d., Vilnius (žod.*)
- C22. 37–oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, 2007 m. birželio 11–13 d., Vilnius (stend.*)
- C23. 11–oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija "Mokslas – Lietuvos ateitis" (Bioinžinerija ir bioinformatika; Fizika ir fizinė kompiuterija), 2008 m. balandžio 3–4 d., Vilnius (žod.*)
- C24. 38–oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, 2009 m. birželio 8–10 d., Vilnius (stend.* ir stend.*)
- C25. 39–oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, 2011 m. spalio 6–8 d., Vilnius, (stend.* ir stend.*)
- C26. 4–oji jaunųjų mokslininkų konferencija "Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai", 2014 m. vasario 11 d., Vilnius (žod.*)
- C27. 57th Scientific Conf. for Young Students of Physics and Natural Sciences "Open Readings'2014", 2014 m. kovo 19–21 d., Vilnius (žod.*)
- C28. 5–oji jaunųjų mokslininkų konferencija "Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai", 2015 m. vasario 10 d., Vilnius (žod.*)

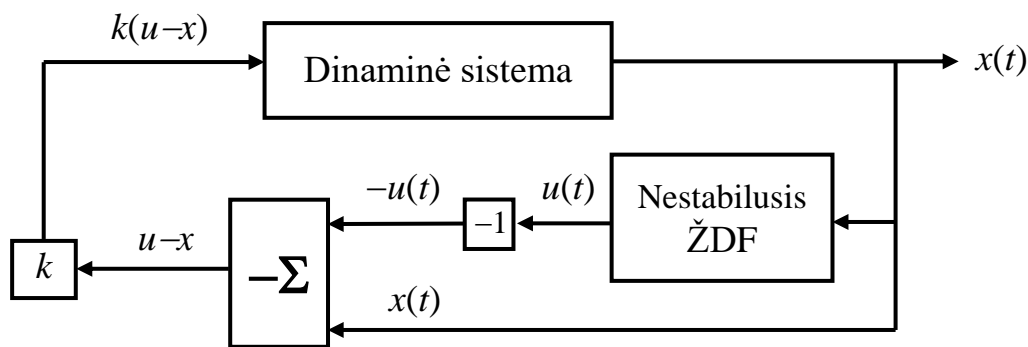
*) autorės asmeniškai pristatyti pranešimai; 8 pranešimai tarptautinėse konferencijose ir 10 – nacionalinėse konferencijose.

1. Dinaminių sistemų pusiausvyros ir sinchronijos valdymas

1-ajame skyriuje apžvelgiama literatūra, trumpai aprašomi nestabilios pusiausvyros valdymo metodai ir jų taikymo ypatumai: valdymas proporcinu grįžtamoju ryšiu, išvestine, stabiliuoju filtru, uždelstuoju grįžtamoju ryšiu, rezonansiniu filtru bei nestabiliuoju filtru. Taip pat pateikiami metodai, naudojami susietųjų osciliatorių sinchronijos valdymui: valdymas išorine periodine jėga, grįžtamojo ryšio metodas – atstumiančioji (*angl.* repulsive) sinchronizacija.

2. Pyrago nestabiliojo filtro metodas balno pusiausvyrai stabilizuoti

2-ajame skyriuje demonstruojamas dinaminės sistemos perjungimas iš stabiliosios pusiausvyros (SP) į iš anksto nežinomą nestabiliąją balno pusiausvyrą, grįžtamojo ryšio kilpoje panaudojant nestabilųjį filtrą (1 pav).



1 pav. Dinaminės sistemos iš anksto nežinomos pusiausvyros valdymo blokinė schema, panaudojant nestabilųjį žemųjų dažnių filtrą (ŽDF).

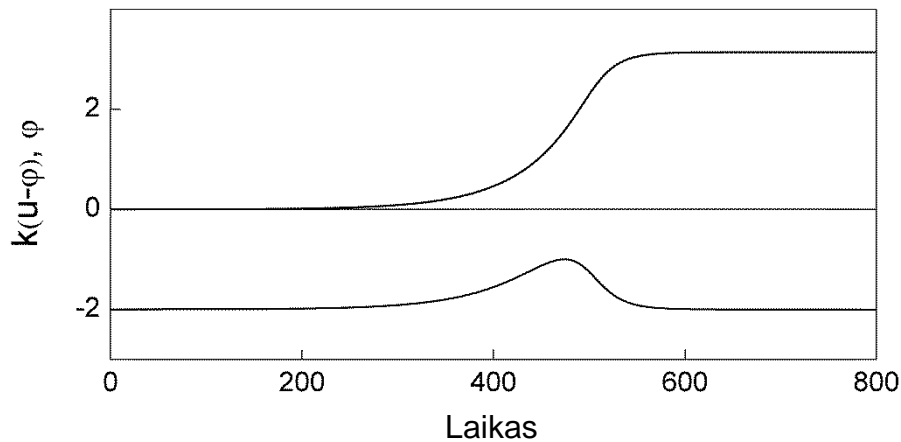
Paprastas vienmatis netiesinis modelis išnagrinėtas analiziškai, sudėtingesnė dvimatė sistema – mechaninė švytuoklė ištirta skaitiškai, o slopstantis Duffing–Holmes (DH) osciliatorius išnagrinėtas analiziškai, skaitiškai ir eksperimentiškai. Mechaninė švytuoklė pasirinkta kaip netiesinės dvimatės sistemos pavyzdys:

$$\ddot{\varphi} + \beta\dot{\varphi} + \sin \varphi = \xi, \quad (1)$$

kur φ yra kampas tarp vertikalės ir švytuoklės, β – slopinimo parametras, ξ – nežinomas sukimo momentas. Perrašome (1) lygtį, pridėdami naują nestabiliojo filtro lygtį:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -\beta\omega - \sin \varphi + \xi + k(u - \varphi), \\ \dot{u} &= \omega_f(u - \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Čia ω_f yra nestabiliojo filtro ribinis dažnis, u – nestabiliojo filtro lygties kintamasis. Skaitiniai rezultatai pateikti 2 pav.

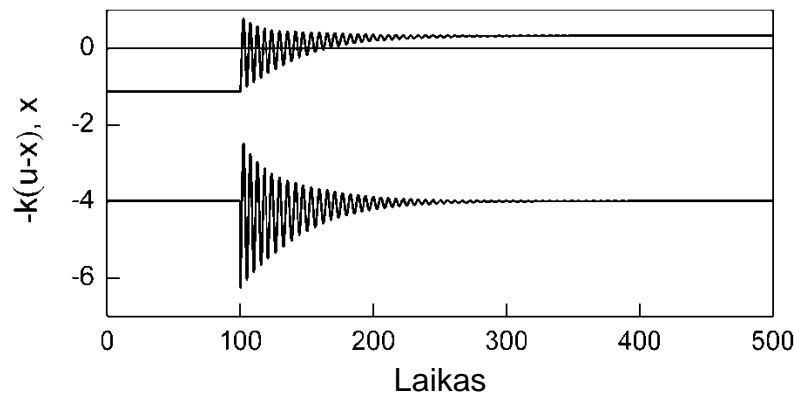


2 pav. Švytuoklės perjungimas iš SP į NP. $\beta = 0.1$, $k = 2.1$, $\omega_f = 0.05$. Viršutinė kreivė – kampas φ , apatinė (dirbtinai pastumta dviem vienetais žemyn) – valdymo narys $k(u - \varphi)$. Valdymas įjungtas laiko momentu $t = 0$.

DH osciliatorius su nestabiliojo filtro valdikliu aprašomas tokia lygčių sistema:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -by + x - x^3 + \xi + k(u - x), \\ \dot{u} &= \omega_f(u - \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

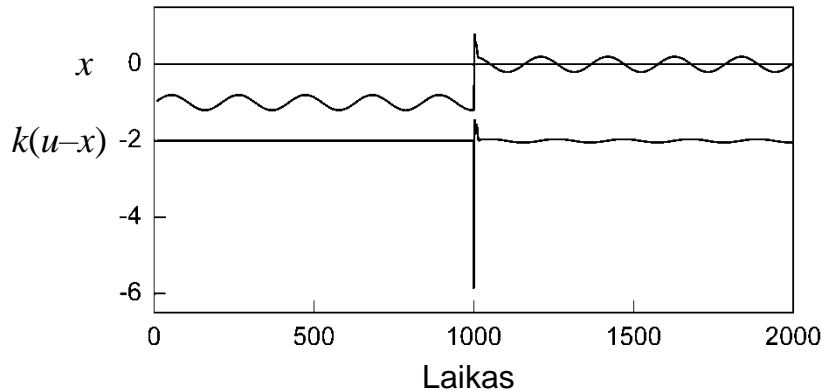
Čia b yra slopinimo koeficientas, ξ – nežinoma jėga. Skaitiniai rezultatai parodyti 3 pav.



3 pav. DH osciliatoriaus perjungimas iš SP į NP. $k = 2$ ir $\xi = -0.3$. $b = 0.1$, $\omega_f = 0.03$. Viršutinė kreivė – kintamasis x ; apatinė (dirbtinai pastumta keturiais vienetais žemyn) – valdymo narys $k(u - x)$. Valdymas įjungtas laiko momentu $t = 100$.

Eksperimentai atlikti panaudojant supaprastintą elektroninės Young–Silva grandinės versiją, imituojančią DH sistemos dinaminę elgesį. Aptariamas perjungimo efekto fizikinis

mechanizmas. Taip pat parodoma, kad nestabilus aukštųjų dažnių filtras sėkmingai suvaldo lėtai kintančią pusiausvyrą (4 pav.).

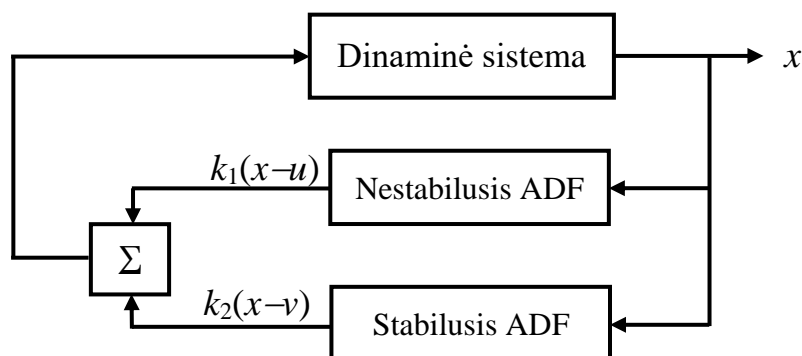


4 pav. DH osciliatoriaus perjungimas iš lėtai kintančios spiralės į lėtai kintantį balną. Valdymo narys $k(u - x)$ dirbtinai pastumtas dviem vienetais žemyn.

Aprašomas adaptyvusis valdiklis, skirtas dinaminių sistemų įvairių nestabiliųjų pusiausvyros būsenų (spiralinių, mazgų ir balnų) stabilizavimui. Pademonstruotas valdiklio atsparumas, kintant pusiausvyros koordinatėms. Aprašytas analoginis elektroninis valdiklis su žemųjų dažnių filtru. Valdiklį lengva perjungti iš stabilaus režimo, norint stabilizuoti spirales ir mazgus, į nestabilų režimą, siekiant stabilizuoti balnus. Pateikti dviejų autonominių sistemų: slopstančio DH osciliatoriaus ir chaotinės Lorenz sistemos skaitiniai bei eksperimentiniai rezultatai.

3. Sinerginiai valdymo metodai balno pusiausvyrai stabilizuoti

3-ajame skyriuje aprašomas adaptyvusis grįžtamojo ryšio metodas, skirtas nežinomų ir/arba lėtai kintančių balno pusiausvyros būsenų aptikimui ir stabilizavimui konservatyviose ir disipatyviose dinaminėse sistemose su mažu slopinimu. Parodyta, kad konservatyviojo balno negalima stabilizuoti nei stabiliuoju, nei nestabiliuoju filtru. Sinerginis valdiklis (5 pav.) naudoja abu filtrus lygiagrečiai (VNF||VSF).



5 pav. Dinaminės sistemos nežinomo balno pusiausvyros valdymo blokinė schema.

Kaip pavyzdys išnagrinėta kūno, pvz., erdvėlaivio, esančio Saulės–Žemės sistemos Lagrange taške L2, dinamika:

$$\mu\ddot{R} + B\dot{R} - \mu\Omega^2(R_0 + R) + \frac{\gamma\mu M}{(R_0 + R)^2} + \frac{\gamma\mu m}{R^2} = P. \quad (4)$$

Čia B – trinties koeficientas ($B \rightarrow 0$), γ – gravitacijos konstanta; M ir m – Saulės ir Žemės masės, R_0 – atstumas tarp Žemės ir Saulės, R – L2 taško atstumas nuo Žemės, P – nežinoma išorinė jėga, Ω – Žemės sukimosi aplink Saulę kampinis greitis ($\Omega^2 = \gamma M / R_0^3$). Įvedame bedimensius dydžius $r = R / R_0$, $\varepsilon = m / M \approx 3 \times 10^{-6}$, $\xi = P / \mu R_0 \Omega^2$ ir prijungiame nestabiliojo bei stabiliojo filtrų lygtis:

$$\begin{aligned} \dot{r} &= v_r, \\ \dot{v}_r &= \Omega^2 F(r, \xi) + K_1(u - r) + K_2(v - r), \\ \dot{u} &= \Omega_1(u - r), \\ \dot{v} &= \Omega_2(r - v). \end{aligned} \quad (5)$$

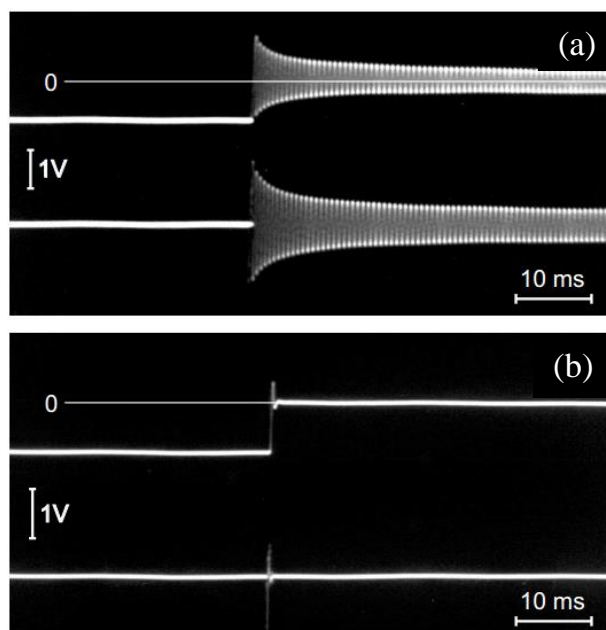
Čia v_r yra radialinis greitis, K_1 ir K_2 – grįžtamojo ryšio koeficientai, Ω_1 ir Ω_2 – filtrų ribiniai dažniai, u ir v – filtrų dinaminiai kintamieji. Du filtrai, veikdami kartu, puikiai stabilizuoja konservatyvųjį balną. Analoginiai eksperimentai atlikti naudojant netiesinę elektrinę grandinę, imituojančią kūno dinamiką išilgai Saulės–Žemės linijos. Siekiant patikrinti valdymo metodo atsparumą buvo panaudotos išorinės chaotinės perturbacijos.

Taip pat aprašytas adaptyvusis valdymo metodas, skirtas nežinomų balnų stabilizavimui, esant inercijai grįžtamojo ryšio kilpoje. Valdiklis sudarytas iš nestabilaus ir stabilaus aukštųjų dažnių filtrų, veikiančių lygiagrečiai:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -F(x) - by + z, \\ \dot{u} &= \omega_1(u - x), \\ \dot{v} &= \omega_2(x - v), \\ \tau \dot{z} &= k_1(u - x) - k_2(v - x) - z. \end{aligned} \quad (6)$$

Čia $F(x)$ yra netiesinė nežinoma funkcija, b – slopinimo koeficientas, u – nestabiliojo filtro dinaminis kintamasis, v – stabiliojo filtro dinaminis kintamasis, ω_1 – nestabiliojo filtro ribinis dažnis, ω_2 – stabiliojo filtro ribinis dažnis, k – valdymo parametras, τ – inercijos parametras. Atlikta (6) lygties matematinė analizė, skaitinis modeliavimas bei eksperimentas. Sudėtinis valdiklis yra atsparus inercijai grįžtamojo ryšio grandinėje. Be

to, nejautilus sistemos slopinimo parametrus ir yra palyginti greitas. Eksperimentai buvo atlikti, panaudojant supaprastintą elektroninės Young–Silva grandinės versiją, imituojančią DH dvigubo slėnio osciliatoriaus dinamiką (6 pav.).

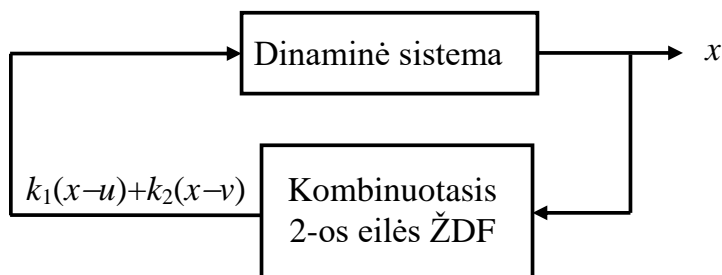


6 pav. DH osciliatoriaus eksperimentinis valdymas (a) tik VNF; (b) VNF||VSF. Viršutinės oscilogramos abiejose nuotraukose – osciliatoriaus išėjimo signalai, apatinės oscilogramos – valdymo signalai.

Taip pat pasiūlytas valdymas kombinuotaisiais filtrais (VKF) balnų stabilizavimui. Jis gaunamas modifikuojant VNF||VSF metodą. Slopstančioji DH sistema, pritaikant VKF, aprašoma tokiomis lygtimis:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= y, \\
 \dot{y} &= x - x^3 - by + k_1(u - x) + k_2(v - x) + p, \\
 \dot{u} &= \omega_1[(u - x) + k_2(v - x)], \\
 \dot{v} &= \omega_2(x - v).
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Nestabilusis filtras (u kintamasis) susietas su stabiliuoju (v kintamasis), o grįžtamasis ryšys sudarytas iš dviejų narių $k_1(u-x)$ ir $k_2(v-x)$. Blokinė schema pavaizduota 7 pav.



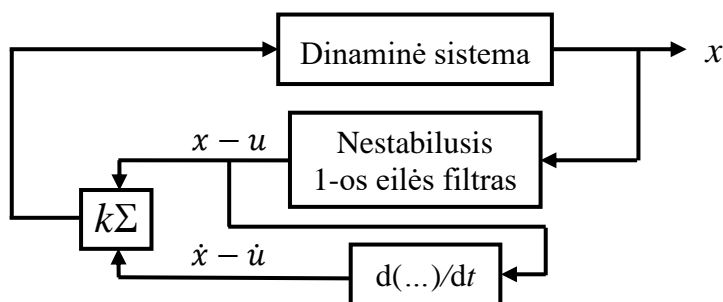
7 pav. Nežinomos pusiausvyros stabilizavimo blokinė schema, panaudojant VKF.

Yra du pagrindiniai skirtumai tarp VKF ir paprasto VNF metodų. Pirmas, pereinamieji vyksmai, taikant VKF, yra daug trumpesni. Antra, x kintamojo neigiamas kritimas pereinamojoje fazėje yra 10 kartų mažesnis nei VNF atveju. Be to, VKF tinka balnų stabilizavimui konservatyviose sistemose ir aktyviuose osciliatoriuose su neigiamu slopinimu.

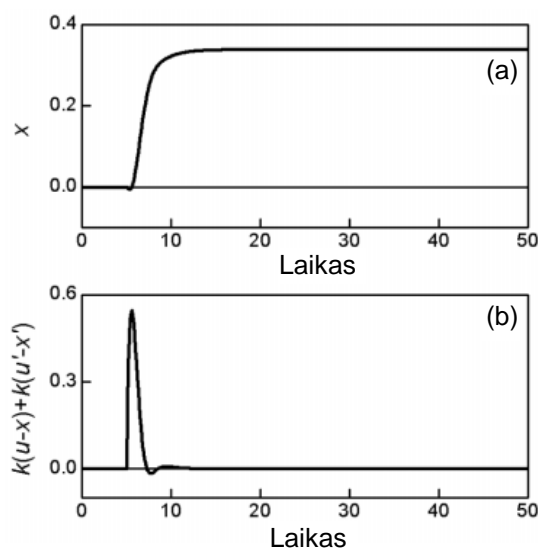
Šiame skyriuje aprašytas dar vienas sinerginis metodas nežinomų balnų stabilizavimui: valdymas nestabiliuoju filtru ir išvestine (VNFI). Slopinimo parametras b neriboja filtro ribinio dažnio ω , todėl jis gali būti gana aukštas. Tai žymiai padidina pusiausvyros nusistovėjimo greitį. Šis metodas yra atsparus išorinėms nežinomoms jėgoms, kurios gali pakeisti pusiausvyros koordinates. VNFI pritaikome DH sistemai:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= x - x^3 - by + k(u + \dot{u} - x - \dot{x}) + p, \\ \dot{u} &= \omega(k-1)(u-x). \end{aligned} \quad (8)$$

Čia p – nežinoma perturbacija. Blokinė schema pavaizduota 8 pav., o skaitinio modeliavimo rezultatai – 9 pav.



8 pav. Balno stabilizavimo blokinė schema, panaudojant sinerginį VNFI.

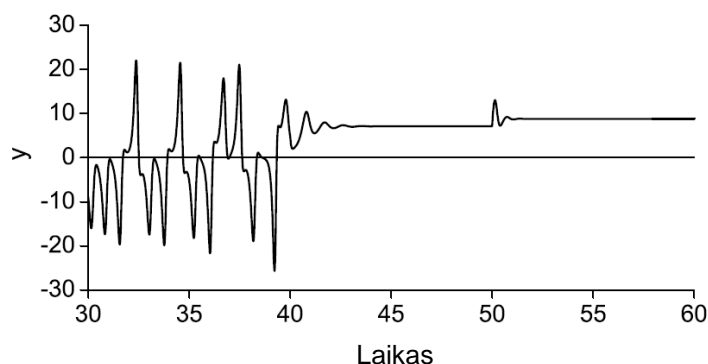


9 pav. Balno stabilizavimas, panaudojant sinerginį VNFI. $b = 0.1$, $\omega = 0.6$. (a) x kintamasis. (b) valdymo narys. $k = 10$, $p = -0.3$ įjungama, kai $t = 5$.

Skaitinis modeliavimas ir eksperimentas buvo atlikti tik su DH osciliatoriumi, tačiau VNFI gali būti taikomas ir kitoms dinaminėms sistemoms. Pasiūlytasis VNFI yra daug greitesnis už VNF versiją. Taip pat jis tinkamas balnų stabilizavimui sistemose su nuliniu ir neigiamu slopinimu.

4. Pakopiniai grįžtamojo ryšio metodai pusiausvyrai stabilizuoti

4-ajame skyriuje aprašomas nulinės eilės stabilus proporcinio grįžtamojo ryšio metodas, naudojantis dirbtinai sukurtas arba natūralias stabilios pusiausvyros (SP) būsenas nežinomos nestabilios pusiausvyros (NP) koordinatėms rasti. Metodas pritaikytas 1-os eilės tiesinei sistemai, 1-os eilės netiesinei sistemai, 2-os eilės mechaninei švytuoklei, 2-os eilės DH osciliatoriui, 2-os eilės van der Pol osciliatoriui ir 3-ios eilės chaotinei Lorenz sistemai. Skaitiniai rezultatai, gauti tiriant Lorenz sistemą, parodyti 10 pav.

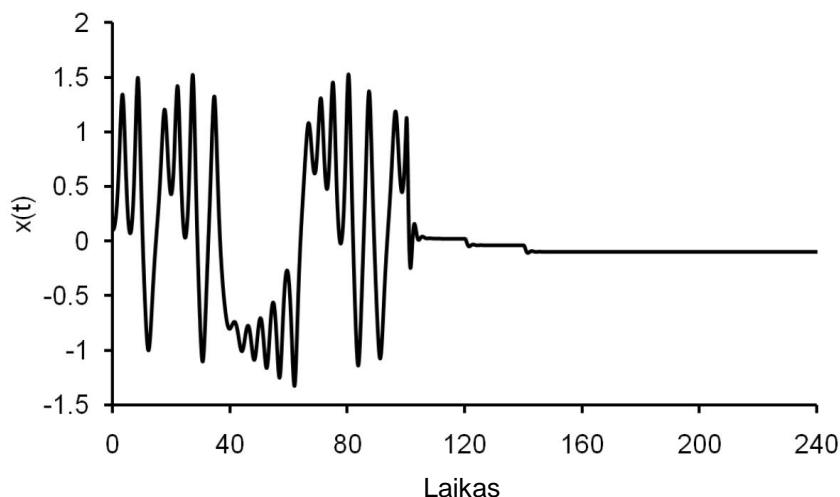


10 pav. Dvipakopis Lorenz sistemos nestabilios spiralės stabilizavimas. Pirma pakopa įjungžiama, kai $t=40$, antra – kai $t=50$.

Taip pat sukurtas trijų pakopų balnų stabilizavimo metodas. Pirmojoje ir antrojoje pakopose, panaudojant laisvai pasirenkamus atramos taškus r_1 ir r_2 , sukuriamos dvi skirtingos dirbtinės SP būsenos, kurių koordinatės x_1 ir x_2 . Paskutinėje trečioje pakopoje šie taškai ir koordinatės panaudojami nežinomai balno koordinatei apskaičiuoti:

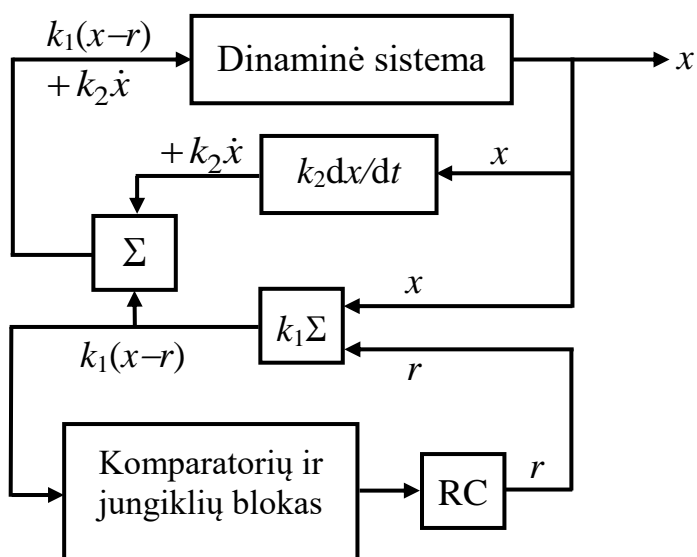
$$x_0 = \frac{r_1 x_2 - r_2 x_1}{(r_1 - x_1) - (r_2 - x_2)}, \quad (9)$$

kuri panaudojama NP stabilizavimui proporcinio grįžtamojo ryšio metodu. Šis metodas pritaikytas 1-os ir 2-os eilės matematinėms sistemoms, 2-os eilės mechaninei švytuoklei bei 3-ios eilės Duffing–Lindberg chaotiniam osciliatoriui [Lindberg *et al.* 2009]. Skaitiniai rezultatai pademonstruoti 11 pav.



11 pav. Duffing–Lindberg osciliatoriaus balno pusiausvyros stabilizavimas. Valdymas įjungiamas, kai $t=100$.

Šiame skyriuje aprašytas netiesinis valdiklis balno stabilizavimui – adaptyvus grįžtamojo ryšio metodas, kuriame netiesiškumas yra atkarpomis pastovi laiptelinė Heaviside funkcija. Blokinė schema pavaizduota 12 pav. Valdymas pritaikytas DH osciliatoriui ir Lorenz sistemai.

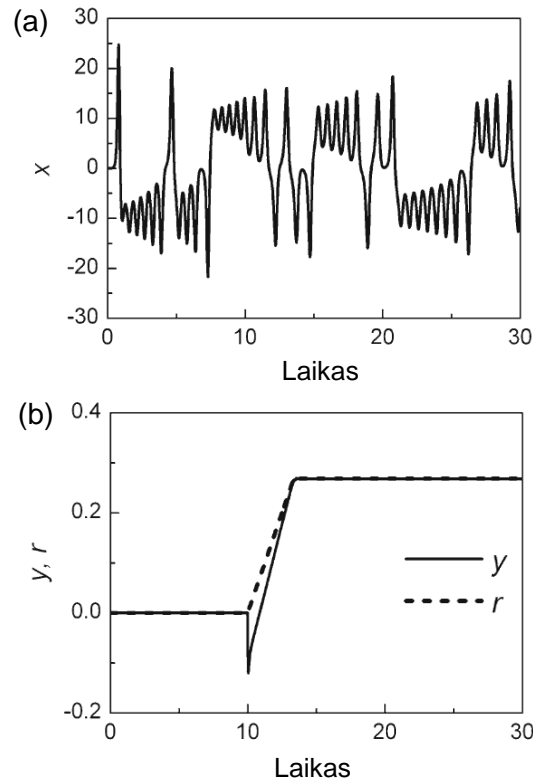


12 pav. Balno stabilizavimo blokinė schema, panaudojant netiesinį valdiklį.

Lorenz sistemos balno stabilizavimo atveju:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -\sigma x + \sigma y, \\
 \dot{y} &= -xz + \rho x - y - p + k_1(r - x) + k_2(r - y), \\
 \dot{z} &= xy - bz, \\
 \dot{r} &= v \operatorname{sgn}(r - y) H(|r - y| - \varepsilon / k_2).
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Čia p yra iš anksto nežinoma perturbacija, r – kintantis atramos taškas, $\text{sgn}(u)$ – ženklų (lot. signum) funkcija, H – Heaviside funkcija, v – pastovus „greitis“, 2ε – iš anksto pasirinkta tolerancija. Skaitiniai rezultatai pateikti 13 pav.



13 pav. (a) Nevaldomos ir neperturbutos Lorenz sistemos chaotiniai virpesiai. (b) Balno stabilizavimas, $k_1=70$, $k_2=70$, $\varepsilon=0.05$, $v=0.08$, $\sigma=10$, $\rho=38$, $b=8/3$. Perturbacija $p=10$ įjungta, kai $t=10$.

5. FitzHugh–Nagumo (FHN) osciliatorių pusiausvyros ir sinchronijos valdymas

5-ajame skyriuje nagrinėjamas FHN neuronų modelis su asimetrine aktyvacijos funkcija:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax - f(x) - y - \xi, \\ \dot{y} &= x - by, \end{aligned} \tag{11}$$

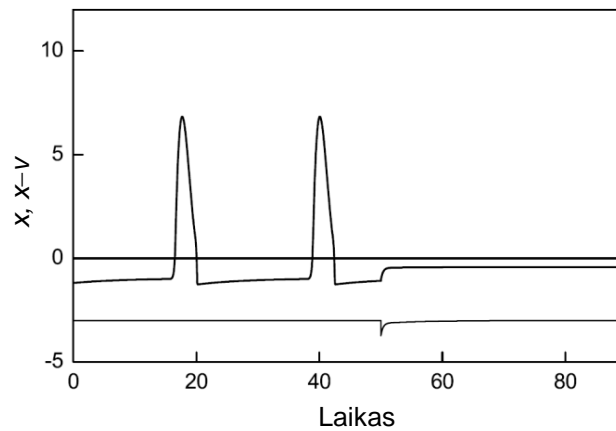
$$f(x) = \begin{cases} d(x+1), & x < -1 \\ 0, & -1 \leq x \leq 1 \\ g(x-1), & x > 1. \end{cases} \tag{12}$$

Čia koeficientai yra teigiami ir pastovūs, išskyrus parametą ξ , kuris yra nežinomas ir/ar lėtai kintantis laike. Nors koeficientai d ir g yra laisvai pasirenkami (vienintelis reikalavimas, kad $d, g > a$), mes nagrinėjame atvejį su stipria asimetrija $d \gg g$. Klasikinė

aktyvacijos funkcija $x-x^3$ pakeičiama asimetrine funkcija $ax-f(x)$. Sistema turi NP – nestabilų mazgą. Prie (11) lygčių pridedame trečiąją lygtį, aprašančią stabilųjį filtrą:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax - f(x) - y - \xi - k(x - v), \\ \dot{y} &= x - by, \\ \dot{v} &= \omega_f(x - v).\end{aligned}\tag{13}$$

Čia k yra grįžtamojo ryšio koeficientas, ω_f – filtro ribinis dažnis. Filtras neįtakoja FHN sistemos pusiausvyros padėties, bet gali pakeisti jos stabilumo savybes. Įjungus valdymą, impulsai visiškai nuslopinami, t.y. stabilizuojama sistemos NP x_0 , o valdymo narys $x-v$ išnyksta (14 pav.).



14 pav. Kintamasis $x(t)$ (viršuje) ir valdymo narys $x-v$ (apačioje). Valdymo narys pastumtas į apačią. $a=6$, $b=0.1$, $\xi=1.7$, $d=60$, $g=7$, $\omega_f=0.1$, $k=9$.

Taip pat atliktas analoginis eksperimentas su elektrine grandine, imituojančia FHN modelio dinamiką. Eksperimento rezultatai gerai sutampa su skaitiniais rezultatais.

FHN osciliatorių masyvas aprašomas $2N$ tiesiškai susietų paprastųjų netiesinių diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{aligned}\frac{dx_i}{dt} &= ax_i - f(x_i) - y_i - c_i + k(x_m - x_i), \\ \frac{dy_i}{dt} &= x_i - by_i, \quad i = 1, 2, \dots, N.\end{aligned}\tag{14}$$

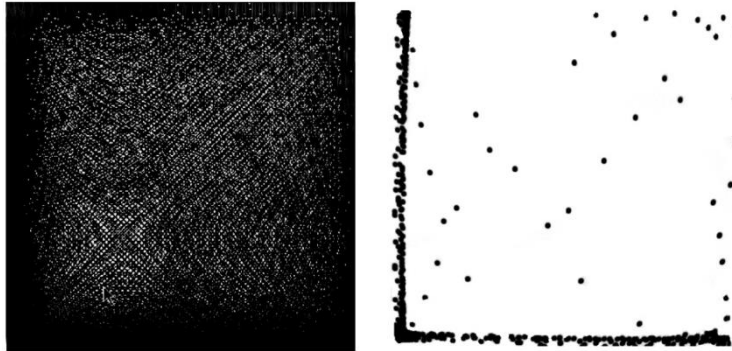
Čia k yra susiejimo koeficientas, N – osciliatorių skaičius, $f(x_i)$ – atkarpomis tiesinė funkcija, tokia pat kaip ir vieno osciliatoriaus atveju (12):

$$f(x_i) = \begin{cases} d(x_i + 1), & x_i < -1 \\ 0, & -1 \leq x_i \leq 1 \\ g(x_i - 1), & x_i > 1. \end{cases}\tag{15}$$

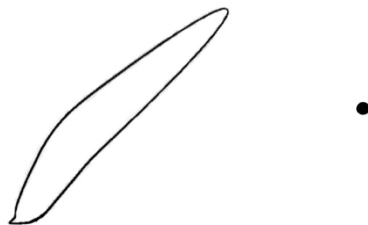
(14) lygtyje x_m yra kintamųjų x_i vidutinė reikšmė:

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (16)$$

Pastovūs parametrai c_i (14) lygtyje specialiai nustatyti skirtingi kiekvienam osciliatoriui, nes nagrinėjame neidentišku osciliatorių sistemą. Skaitmeniniai rezultatai pateikti 15 pav. ir 16 pav.



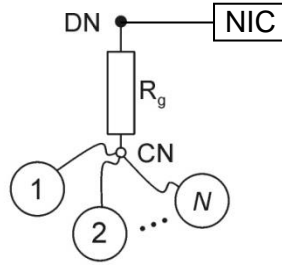
15 pav. Nesinchronizuotas atvejis ($k=0$). (Kairėje) fazinis portretas $x_i(t)$ vs. $x_j(t)$, $i \neq j$. (Dešinėje) Poincaré kirtimas, $x_i(t)$ vs. $x_j(t)$ esant $x_l(t)=1$, $dx_l(t)/dt < 0$, $i \neq j \neq l$. $N=30$, $a=3.4$, $b=0.15$, $c_i=3-0.05(i-1)$, $d=60$, $g=3.4$.



16 pav. Sinchronizuotas atvejis ($k=0.7$). (Elipsė) fazinis portretas $x_i(t)$ vs. $x_j(t)$, $i \neq j$. (Taškas) Poincaré kirtimas $x_i(t)$ vs. $x_j(t)$, esant $x_l(t)=1$, $dx_l(t)/dt < 0$, $i \neq j \neq l$. Kiti parametrai tokie patys, kaip 15 pav.

Eksperimentas buvo atliktas su analogine elektrine grandine, jungiančia 30 FHN osciliatorių.

5-me skyriuje pateiktos dvi grįžtamojo ryšio metodo versijos, skirtos susietųjų osciliatorių masyvui valdyti. Pirmoji versija vidutinį lauką dirbtinai panaikina, o antroji – vidutinį lauką gražina į masyvą su neigiamu ženklu. Ištirtas vidutiniu lauku susietųjų FHN osciliatorių masyvas (17 pav.).



17 pav. Vidutiniu lauku susietų osciliatorių $1, 2, \dots, N$ masyvas. NIC yra neigiamo impedanso keitiklis. Tariaama, kad susiejimo mazgas CN neprieinamas tiesiogiai iš išorės, bet per tam tikrą pasyvių rezistorių tinklą, čia pakeistą vienu ekvivalentišku rezistoriumi R_g . DN yra prieinamas slopinimo mazgas.

Vidutiniu lauku susietų FHN (simetrinė versija) neidentiškų osciliatorių masyvas aprašomas tokia lygčių sistema:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= x_i - x_i^3/3 - y_i + c_i + k(x_m - x_i), \\ \dot{y}_i &= \varepsilon(x_i - by_i).\end{aligned}\quad (17)$$

Čia $i=1, 2, \dots, N$. x_i ir y_i atitinka neurono membranos potencialą ir atsistatymo kintamąjį [FitzHugh, 1961], k – susiejimo koeficientas. Pažymėtina, kad parametras c_i yra skirtingas kiekvienam individualiam osciliatoriui, todėl osciliatoriai yra neidentiški. (17) lygtyje x_m aprašomas (16) formule. Naudojant vidutinio lauko valdymą, galima arba panaikinti individualių osciliatorių sinchroniją, arba žymiai sumažinti jų vidutinį lauką. (17) lygtyje x_m pakeičiame valdomu vidutiniu lauku x_m^* , apskaičiuojamu iš lygties

$$k \sum_{i=1}^N (x_i - x_m^*) - \Gamma x_m^* = 0, \quad (18)$$

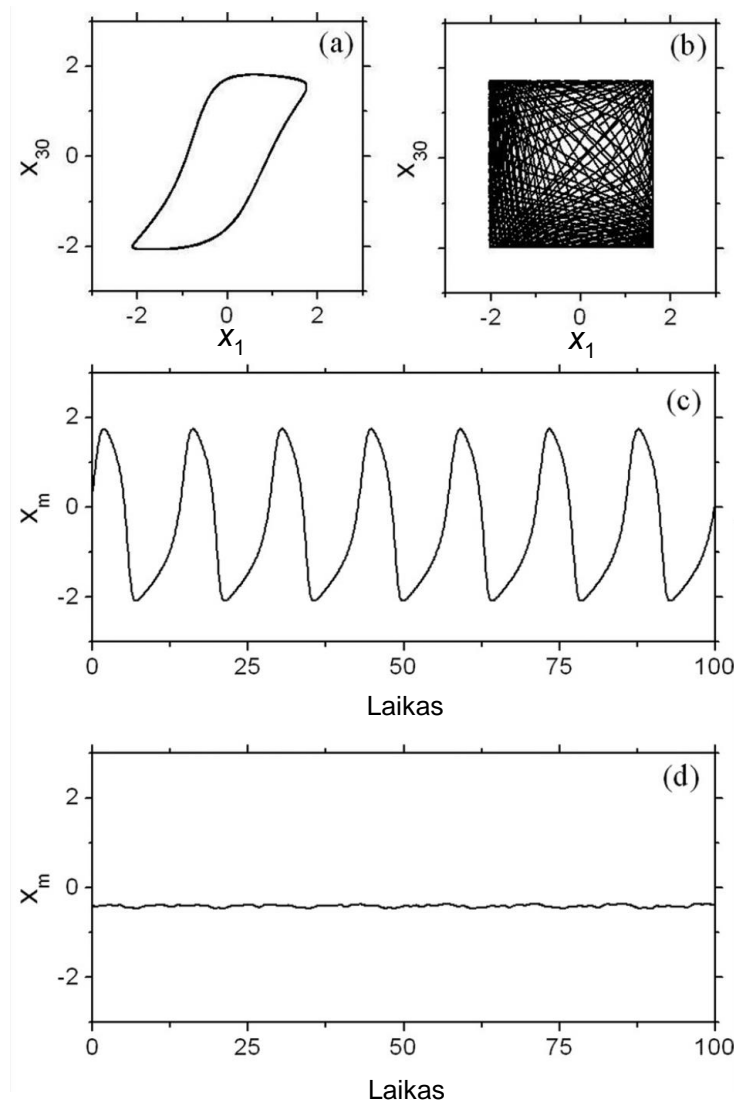
kur Γ yra valdymo parametras (gali būti teigiamas arba neigiamas). Iš (18) lygties seka:

$$x_m^* = \frac{kN}{kN + \Gamma} x_m. \quad (19)$$

Be valdymo ($\Gamma=0$), $x_m^* = x_m$, kaip tikėtasi. Yra du specialūs valdymo atvejai.

1 atvejis – vidutinio lauko panaikinimas. Jei $|\Gamma| \gg kN$, tuomet valdomas vidutinis $x_m^* \approx 0$, t. y. pritraukiantysis (*angl.* attractive) susiejimas panaikinamas. Pabrėžiame skirtumą tarp nesusietų osciliatorių ($k=0$) ir panaikinto susiejimo ($x_m^* = 0$). Pastaruoju atveju išlieka nariai $-kx_i$. Tačiau, kai $k < 1$, šie nariai tik silpnai slopina osciliatorius, bet jų nesinchronizuoja.

2 atvejis – atstumiantysis susiejimas (angl. repulsive coupling). Jei $\Gamma < -kN$, tuomet vidutinis laukas $x_m^* < 0$, pvz., kai $\Gamma = -2kN$, $x_m^* \approx -x_m$. Šis specialus atvejis ($x_m^* \approx -x_m$), vadinamas atstumiančiu susiejimu, kitų autorių ištirtas analiziškai ir skaitiškai paprastų fazinių osciliatorių masyve (Kuramoto modelis) [Tsimring *et al.*, 2005, Hong *et al.*, 2011]. Disertacijoje gauti skaitiniai (18 pav.) ir eksperimentiniai rezultatai sudėtingesniajam modeliui – dvimačių FHN osciliatorių masyvui.



18 pav. Susietųjų FHN osciliatorių masyvas, $N=30$. (a) ir (b) faziniai portretai x_{30} vs. x_1 . (c) ir (d) vidutinio lauko osciliacijos $x_m(t)$. (a) ir (c) nevaldomas masyvas ($\Gamma=0$). (b) ir (d) valdomas masyvas ($\Gamma=-6$). $\varepsilon=0.3$, $b=0.1$, $k=0.1$, $c_{i+1}=c_i+0.05$, $c_1=-5$.

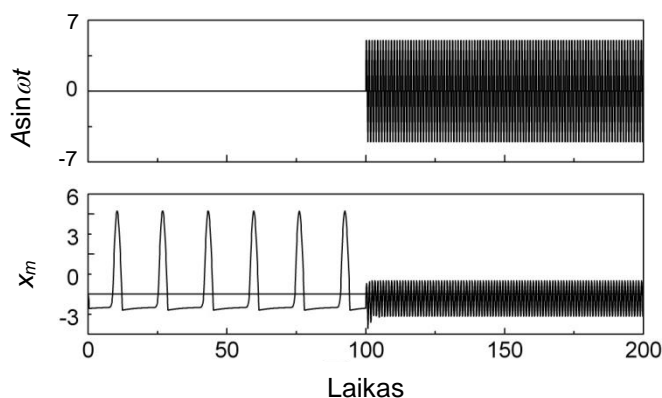
Fazinis portretas (x_1, x_{30}) (18a pav.) ir visi kiti faziniai portretai ($x_i, x_{j \neq i}$), nepavaizduoti 18a pav., demonstruoja visų osciliatorių sinchronizacijos efektą nevaldomame masyve ($k \neq 0, x_m > 0$). Sudėtingas fazinis portretas, parodytas 18b pav., rodo,

kad valdomi osciliatoriai ($k \neq 0$, $x_m^* \approx -x_m$) nesinchronizuoti. Didelė vidutinio lauko amplitudė (18c pav.), stebima sinchronizuotų osciliatorių atveju ($\Gamma=0$), žymiai sumažėja – daugiau nei 10 kartų (18d pav.), kai taikomas valdymas ($\Gamma = -2kN = -6$).

Išorinė periodinė jėga taip gali nuslopinti neuroninio osciliatoriaus impulsus [Pyragas *et al.*, 2013]. Disertacijoje nagrinėjama $2N$ susietųjų neautonominių diferencialinių lygčių sistema (14) su papildomu išoriniu periodiniu žadinimu:

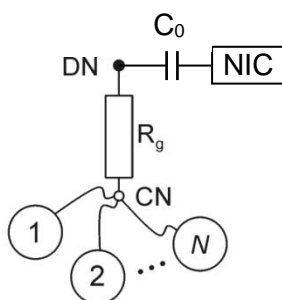
$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= ax_i - f(x_i) - y_i + c_i + k(x_m - x_i) + A \sin \omega t, \\ \dot{y}_i &= x_i - by_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (20)$$

Čia $f(x_i)$ aprašoma (15) formule. Skaitiniai rezultatai pavaizduoti 19 pav., kurie gerai sutampa su eksperimentiniais rezultatais. Vidurkis x_m nekonverguoja į pusiausvyrą, bet osciliuoja aplink ją išorinio žadinimo dažniu ω .



19 pav. Slopinimo narys $A \sin(\omega t)$ ir vidurkis x_m , $N=30$, $A=5.1$, $\omega=6.28$, $a=3.4$, $b=0.16$, $c_i = -44/(24+i)$, $i=1,2,\dots, N$, $d=60$, $g=3.4$, $k=3.4$. $A \sin(\omega t)$ įjungiamas, kai $t=100$.

Šiame skyriuje taip pat aprašytas susietųjų FHN osciliatorių masyvo NP stabilizavimas, panaudojant valdymą stabiliuoju filtru (VSF). Šiuo metodu visiškai nuslopinami FHN osciliatorių virpesiai; o būtent stabilizuojamos jų pusiausvyros būsenos. Ištirtas masyvas, sudarytas iš N osciliatorių (20 pav.).

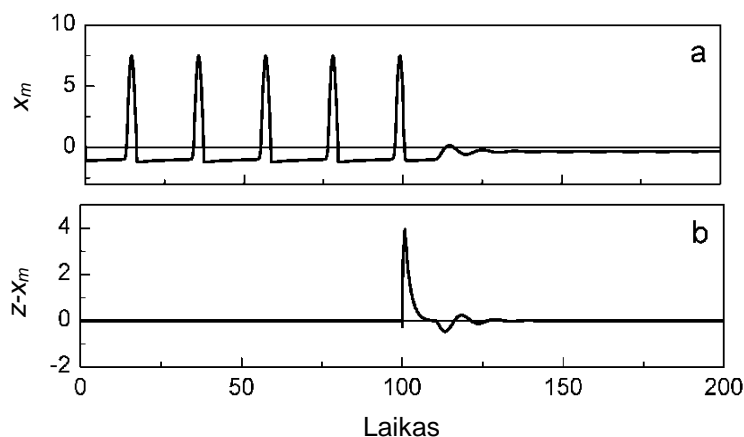


20 pav. Susietųjų osciliatorių su prijungtu neigiamo impedanso keitikliu (NIC) blokinė schema.

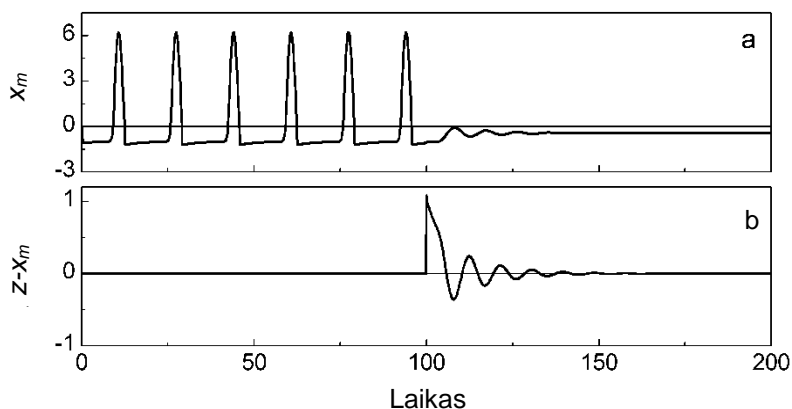
Vidutiniu lauku susietų FHN osciliatorių masyvas su valdikliu aprašomas lygtimis:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= ax_i - f(x_i) - y_i - c_i + k(z - x_i), \\ \dot{y}_i &= x_i - by_i, \quad i = 1, \dots, N, \\ \dot{z} &= \omega_f(x_m - z).\end{aligned}\tag{21}$$

Čia z yra bedimensė valdiklio kondensatoriaus C_0 įtampa, ω_f – filtro, sudaryto iš FHN osciliatorių išėjimo varžų R^* ir valdiklio talpos C_0 , ribinis dažnis. Kai valdiklis atjungtas (formaliai $C_0=0$, t.y. $\omega_f \rightarrow \infty$): $z=x_m$. Skaitiniai rezultatai pateikti 21 pav. ir 22 pav.



21 pav. Nestabilios pusiausvyros stabilizavimas susietųjų FHN osciliatorių masyve $N=3$. $a=4$, $b=0.1$, $c_1=3.4$, $c_2=3.2$, $c_3=3.0$, $d=70$, $g=4$, $k=5$, $\omega_f=0.04$. (a) Vidurkis x_m . (b) Valdymo narys $z-x_m$. Valdymas įjungiamas, kai $t=100$.



22 pav. Nestabilios pusiausvyros stabilizavimas susietųjų FHN osciliatorių masyve $N=24$. $a=3.4$, $b=0.16$, $c_i=43.5/(24+i)$, $d=60$, $g=3.4$, $k=3.4$, $\omega_f=0.15$. (a) Vidurkis x_m . (b) Valdymo narys $z-x_m$. Valdymas įjungiamas, kai $t=100$.

Disertacijos prieduose (A1–A5) aprašytos principinės analoginių grandinių ir valdiklių schemas. A1 priede pateiktas DH sistemos elektroninis analogas, A2 – Lorenz sistemos elektroninis analogas, A3 – kūno, esančio Saulės–Žemės sistemos Lagrange taške L2, elektroninis analogas, A4 – FHN osciliatoriaus elektroninio analogo asimetrinė versija, A5 – elektroniniai valdikliai.

PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Pademonstruotas Pyrago valdymo nestabiliuoju filtru metodo efektyvumas, perjungiant nejudančią dinaminę sistemą iš stabiliosios pusiausvyros, pvz., spiralės arba mazgo, į nežinomą nestabilią pusiausvyrą, pvz., balną.
2. Sukurtas adaptyvusis valdiklis nežinomai ir lėtai kintančiai balno pusiausvyrai aptikti ir stabilizuoti. Valdiklis remiasi nestabiliuoju aukštųjų dažnių filtru. Naudojant aukštųjų dažnių filtrą vietoje įprasto žemųjų dažnių filtro valdiklis tampa techniškai paprastesnis.
3. Panaudojant instrumentinius stiprintuvus vietoje įprastinių operacinių stiprintuvų sukurtas ir sumontuotas analoginis elektroninis valdiklis įvairioms pusiausvyros būsenoms stabilizuoti. Valdiklį lengva perjungti iš stabiliojo režimo, skirto nestabilioms spiralėms ir mazgams stabilizuoti, į nestabilų režimą, tinkantį balnams stabilizuoti.
4. Aprašytas sinerginis valdymo metodas, naudojantis nestabilų ir stabilų filtrus, veikiančius lygiagrečiai. Valdiklis stabilizuoja nežinomus ir lėtai kintančius balnus konservatyviose ir silpnai slopstančiose disipatyviose dinaminėse sistemose.
5. Stabilų ir nestabilų filtrus, veikiančius lygiagrečiai, pasiūlyta balnams stabilizuoti, esant signalo inercijai grįžtamojo ryšio grandinėje.
6. Aprašytas sinerginis nežinomo balno pusiausvyros stabilizavimo metodas, atsparus išorinėms nežinomoms jėgoms, naudojantis tarpusavyje tiesiškai sujungtus stabilų ir nestabilų žemųjų dažnių filtrus.
7. Pasiūlytas sinerginis metodas, skirtas nežinomo balno pusiausvyrai stabilizuoti, naudojantis valdymą nestabiliuoju filtru kartu su išvestinės grįžtamojo ryšiu.
8. Pasiūlytas nulinės eilės proporcinio grįžtamojo ryšio metodas, skirtas pusiausvyros būsenoms stabilizuoti sistemose su iš dalies žinoma dinamika. Nestabilios pusiausvyros koordinačių nustatymui naudojama arba dirbtinai sukurta stabilioji pusiausvyra, arba natūrali stabilioji pusiausvyra.
9. Pasiūlytas trijų pakopų adaptyvusis proporcinis grįžtamojo ryšio metodas nežinomiems balnams stabilizuoti. Nestabiliosios pusiausvyros koordinatės apskaičiuojamos, panaudojant dvi dirbtinai sukurta stabiliosios pusiausvyros būsenas.
10. Aprašytas adaptyvusis grįžtamojo ryšio metodas nežinomai balno pusiausvyrai stabilizuoti, naudojantis Heaviside laiptinę funkciją. Elektroniniame valdiklyje pritaikyti įtampos komparatoriai.

11. Ištirtas FitzHugh–Nagumo (FHN) neurono modelis su asimetrine aktyvacijos funkcija. Stabilusis pirmos eilės filtras, prijungtas prie sistemos, slopina impulsus, o būtent stabilizuoja nestabilią pusiausvyrą.
12. Suprojektuotas, sumontuotas ir ištirtas masyvas, jungiantis 30 FHN osciliatorių. Pademonstruota vidutiniu lauku susietų osciliatorių sinchronija.
13. Aprašytas analoginis grįžtamojo ryšio valdiklis, panaudojantis neigiamo impedanso keitiklį ir skirtas vidutiniu lauku susietųjų FHN osciliatorių sinchronijai valdyti. Jei vidutinis laukas dirbtinai panaikinamas (*angl.* nullified mean field), osciliatorių sinchronija išyra. Jei vidutinis laukas grąžinamas su neigiamu ženklu, t. y. įgyvendinamas atstumiantysis sujungimas (*angl.* repulsive coupling), vidutinio lauko dydis žymiai sumažėja.
14. Ištirtas impulsų slopinimas išorine periodine jėga 30-ies vidutiniu lauku susietų FHN osciliatorių masyve.
15. Valdymo stabiliuoju filtru metodas pritaikytas nestabiliosios pusiausvyros būsenoms stabilizuoti susietųjų FHN osciliatorių masyve.

Apie autorę

Elena Adomaitienė (Tamaševičiūtė) gimė 1987 m. Vilniuje. 2005 m. baigusi Mykolo Biržiškos gimnaziją, įstojo į Vilniaus universiteto Fizikos fakultetą. 2009 m. baigė Modernių technologijų fizikos ir vadybos bakalauro studijų programą. 2011 m. baigė Šveicarijos federalinio technologijos instituto Ciuriche magistrantūrą. 2012 m. priimta į Fizinių ir technologijos mokslų centro fizinių mokslų srities, fizikos krypties (02P) doktorantūros studijas.

LITERATŪRA

- H. Hong and S. H. Strogatz, ‘Kuramoto model of coupled oscillators with positive and negative coupling parameters: an example of conformist and contrarian oscillators,’ *Phys. Rev. Lett.* **106**, 054102 (2011).
- B. C. Kuo, *Automatic Control Systems* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995).
- A. Namajūnas, K. Pyragas, and A. Tamaševičius, ‘Stabilization of an unstable steady state in a Mackey–Glass system,’ *Phys. Lett. A* **204**, 255 (1995).
- E. Lindberg, E. Tamaševičiūtė, G. Mykolaitis, S. Bumelienė, T. Pyragienė, A. Tamaševičius, and R. Kirvaitis, ‘Autonomous third-order Duffing–Holmes type chaotic oscillator,’ *Proc. Eur. Conf. Circuit Theory and Design*, 663 (IEEE, Piscataway, New Jersey, 2009).
- K. Ogata, *Modern Control Engineering*, (Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (2010).
- A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- O. V. Popovych, C. Hauptmann, and P. A. Tass, ‘Effective desynchronization by nonlinear delayed feedback,’ *Phys. Rev. Lett.* **94**, 164102 (2005).
- K. Pyragas, V. Pyragas, I. Z. Kiss, and J. L. Hudson, ‘Stabilizing and tracking unknown steady states of dynamical systems,’ *Phys. Rev. Lett.* **89**, 244103 (2002).
- K. Pyragas, O. V. Popovych, and P. A. Tass, ‘Controlling synchrony in oscillatory networks with a separate stimulation-registration setup,’ *Europhys. Lett.* **80**, 40002 (2007).
- K. Pyragas, V. Novičenko, and P. A. Tass, ‘Mechanism of suppression of sustained neuronal spiking under high-frequency stimulation,’ *Biol. Cyber.* **107**, 669 (2013).
- M. G. Rosenblum and A. S. Pikovsky, ‘Controlling synchronization in an ensemble of globally coupled oscillators,’ *Phys. Rev. Lett.* **92**, 114102 (2004).
- N. F. Rulkov, L. S. Tsimring, and H. D. I. Abarbanel, ‘Tracking unstable orbits in chaos using dissipative feedback control,’ *Phys. Rev. E* **50**, 314 (1994).
- L. S. Tsimring, N. F. Rulkov, M. L. Larsen, and M. Gabbay, ‘Repulsive synchronization in an array of phase oscillators,’ *Phys. Rev. Lett.* **95**, 014101 (2005).

MAIN RESULTS AND CONCLUSIONS

1. The efficiency of the Pyragas' unstable filter control to switch the motionless dynamical systems from the stable equilibrium states, e.g. spirals or nodes, to unknown unstable equilibrium states, specifically the saddles, has been demonstrated.
2. An adaptive control technique for tracking and stabilizing unknown and slowly varying saddle equilibrium has been developed. The technique employs an unstable high-pass filter. Using high-pass filter instead of common low-pass filter makes the controller technically simpler.
3. An analogue electronic controller using the instrumentation amplifiers instead of the operational amplifiers for stabilization of equilibrium states has been designed and built. It can be easily switched between a stable and an unstable modes of operation for stabilizing either unstable spirals/nodes or saddles, respectively.
4. A synergetic control method, using unstable and stable filters operating in parallel, has been proved to stabilize unknown and slowly varying saddles of conservative and weakly damped dissipative dynamical systems.
5. Stabilization of saddles under influence of inertia in the feedback loop by means of stable and unstable filters operating in parallel has been described.
6. A synergetic method, robust to the influence of unknown external forces, for stabilizing unknown saddle equilibrium by means of linearly combined unstable and stable low-pass filter techniques, has been described.
7. A synergetic technique for stabilizing unknown saddle equilibrium by means of unstable filter control, supported by the derivative control, has been suggested.
8. Zeroth-order proportional feedback technique for stabilizing equilibrium of systems with uncertain dynamics has been proposed. The technique employs either artificially created stable equilibrium or natural stable equilibrium to find the coordinates of the unstable equilibrium.
9. Three-step adaptive proportional feedback method for stabilizing unknown saddles has been proposed. The technique makes use of the artificially created two stable equilibrium states to find the coordinates of the inherent unstable equilibrium state.
10. An adaptive feedback method for stabilizing unknown saddle equilibrium, employing Heaviside nonlinear function has been described. The analogue electronic controller uses a comparator as a nonlinear unit.

11. The FitzHugh–Nagumo (FHN) type spiking neuron model, equipped with an asymmetric activation function has been investigated. The first-order stable filter, coupled to a system, has been demonstrated to inhibit spikes, more specifically to stabilize the unstable equilibrium.

12. An electrical network, consisting of 30 FHN oscillators, has been designed, built and investigated. Synchrony in the array of the mean-field coupled oscillators has been demonstrated.

13. An implementation of an analogue feedback controller, using negative impedance converter, for controlling synchrony of the mean-field coupled FHN oscillators has been described. If the mean field is artificially nullified, then synchrony is broken up. If the mean field is fed back with a negative sign (repulsive coupling), its value is essentially decreased.

14. Inhibition of spikes in an array of 30 mean-field coupled FHN oscillators by external periodic forcing has been studied.

15. The stable filter control technique has been developed for stabilizing unstable equilibrium in an array of mean-field coupled FHN oscillators.

About the author

Elena Adomaitienė (Tamaševičiūtė) was born in Vilnius, Lithuania, in 1987. She graduated from the Mykolas Biržiška gymnasium in 2005 and was admitted to the Faculty of physics at the Vilnius University. Elena successfully completed the bachelor program of the Physics and management of modern technology in 2009. She obtained the master's degree from the Swiss Federal Institute of Technology Zurich in 2011. Elena started her doctoral studies in physics (02P) at the Center for Physical Sciences and Technology in 2012.