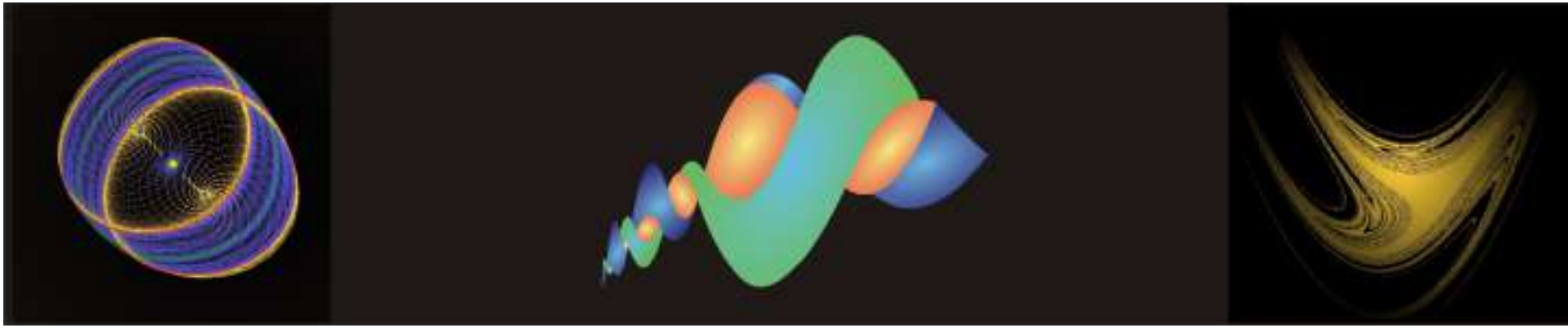


Международная исследовательская лаборатория динамики негладких систем
International Research Laboratory for Dynamics of Non-Smooth Systems

Ошский государственный университет (ОшГУ),
Ош, Кыргызская Республика (КР)
Институт математики, физики, техники и информационных технологий ОшГУ

Руководитель и основатель лаборатории



Научный руководитель и основатель лаборатории: доктор технических наук, профессор, почетный работник сферы образования РФ, главный научный сотрудник, проф. каф. прикладной математики, информатики и графического дизайна Института математики, физики, техники и информационных технологий ОшГУ ***Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич***.
Проф. Жусубалиев Ж.Т. — признанный в мире ведущий специалист по нелинейной динамике, теории бифуркаций негладких систем в приложениях к силовой электронике, электромеханике, теории автоматического управления, эндокринологии, механике и биологии.

- **Награждён** серебряной медалью ВДНХ СССР (1987 г.) за разработку и внедрение в промышленную эксплуатацию систем управления тяговыми электроприводами первого в СССР высокоскоростного электропоезда ЭР200.
- **Награждён** Почетной грамотой города Курска.
- **Награждён** Почетной грамотой Министерства образования и науки Российской Федерации.
- **Награждён** Почетной грамотой Комитета образования и науки Курской области.
- **Награждён** Почетной грамотой Министерства цифрового развития и связи Курской области.
- **Присвоено** почетное звание «Почетный работник сферы образования Российской Федерации».
- **Включен в Корпус** экспертов по естественным наукам и математике как высокоцитируемый российский ученый в изданиях, которые индексируются в Web of Science.
- **Являлся приглашенным ученым** Датского технического университета (Дания): Центр изучения турбулентности и хаоса, Центр моделирования и необратимой термодинамики, Центр биофизики и сложных систем, факультета физики (1999 – 2017 гг.).
- В настоящщее время – **приглашенный ученый** Института теории систем и автоматического управления Штутгардского университета, Германия и Факультета информационных технологий Уппсальского университета, Швеция. **Избран приглашенным профессором** Факультета информационных технологий Уппсальского университета.
- **Индекс Хирша** в Scopus и Web of Science составляет 22 , а в РИНЦ –26.

Зам. руководителя и координатор работы лаборатории



Сопуев Уланбек Адахимжанович, зав. каф. высшей математики и инновационных технологий Института математики, физики, техники и информационных технологий ОшГУ, к.ф.-м.н., доцент. Являлся зам. научного руководителя грантов ОшГУ (№14-22, №19-24), которые реализовывались в рамках договора о сотрудничестве с Юго-Западным государственным университетом (ЮЗГУ, Курск, РФ). С 2018 года по 2024 год был деканом факультета математики и информационных технологий ОшГУ.

Имеет богатый опыт в теории и практике управляемых преобразователей энергии. Хорошо знает современное экспериментальное оборудование, имеет опыт в создании и проектировании управляемых преобразовательных устройств систем энергообеспечения мехатронных, робототехнических объектов. Обладает организаторскими способностями в проведении научных исследований. Имеет более 30 совместных с научным руководителем работ.

Цели и задачи

Международная исследовательская лаборатория динамики негладких систем ОшГУ, является единственной в странах СНГ (России, Кыргызстана, Казахстана, Узбекистана и др.) лабораторией мирового уровня по теории негладких динамических систем.

- Привлечение талантливых студентов и аспирантов в науку, создание реальных условий для их интеграции в мировой научный рынок.
- Повышение образовательного уровня студентов путем привлечения к научным исследованиям по приоритетным направлениям теории негладких систем.
- Реализация программ внутригосударственной и международной академической мобильности научно-педагогических кадров, обучающихся в целях проведения совместных научных исследований и подготовки кадров высшей квалификации.
- Формирование научных и образовательных конкурентоспособных заделов на базе фундаментальных научных исследований мирового уровня, заданных программой и стратегией развития Ошского государственного университета (ОшГУ) в мировом научно-образовательном рынке.
- Создание высокотехнологичной среды для проведения прорывных фундаментальных научных исследований мирового уровня, результаты которых являются основой реализуемых и новых наукоемких образовательных программ ОшГУ в интересах научно-технологического развития КР.
- Совершенствование системы подготовки научно-педагогических кадров ОшГУ путем доведения защищаемых диссертаций до мирового уровня за счет опубликования результатов диссертаций в высокорейтинговых международных отечественных, зарубежных специализированных журналах и обнародование результатов на авторитетных международных конференциях.
- Популяризация наукоемких образовательных программ по математике, физике, информационным технологиям путем демонстрации на экспериментальных установках нелинейных явлений в природе и технике школьникам на фестивалях науки, днях открытых дверей.
- Закрепление молодых талантливых ученых-педагогов в научно-образовательной сфере путем формирования исследовательских команд, которые впоследствии могут стать основой новых научно-образовательных лабораторий ОшГУ и других университетов КР.

Партнеры

Лаборатория изначально была создана в 2020 г. как подразделение Юго-Западного государственного университета (Курск, РФ). Создание лаборатории поддержали ученые ведущих университетов Европы, Латинской Америки, Индии и России, каждый из которых является крупнейшим и признанным в мире специалистом по нелинейной динамике и хаосу, теории бифуркаций и теории негладких динамических систем:

- 1. Prof. Laura Gardini, University of Urbino Carlo Bo (основан в 1506 г.), Italy.
- 2. Prof. Mario di Bernardo, University of Naples Federico II (основан в 1224 г.), Italy.
- 3. Prof. Alexander Medvedev, Uppsala University (основан в 1477 г.), Sweden.
- 4. Prof. Nikolay V. Kuznetsov, Санкт-Петербургский государственный университет (основан в 1724 г.), Математико-механический факультет, Visiting Professor, University of Jyväskylä (основан в 1863 г.), Finland.
- 5. Prof. Anton V. Proskurnikov, Professor, Polytechnic University of Turin (основан в 1859 г.), Italy.
- 6. Prof. Petri Piiroinen, Chalmers University of Technology Gothenburg (основан в 1829 г.), Sweden.
- 7. Prof. Viktor Avrutin, University of Stuttgart (основан в 1829 г.), Germany.
- 8. Prof. Abdelali El Aroudi, Universitat Rovira i Virgili (основан в 1991 г.), Spain.
- 9. Prof. Soumitro Banerjee, Indian Institute of Science Education and Research–Kolkata (основан в 2006 г.), India.
- 10. Prof. Gerard Olivar Tost, University of Aysén (основан в 2015 г.), Chile.

Исследовательская лаборатория динамики негладких систем ОшГУ











Направления научных исследований

- 1. Автоматическое управление дозированием миорелаксанта для поддержания уровня нейромышечной блокады при общей анестезии.
- 2. Глобальная динамика негладких систем: гомоклинические бифуркации, «border-collisions», кризисы хаотических аттракторов.
- 3. Негладкие отображения с большим числом многообразий переключения в приложениях силовой электроники: возобновляемые источники энергии, электромобили, робототехнические системы, светодиодное освещение, корректоры коэффициента мощности для систем энергообеспечения вычислительной техники и медицинского оборудования.
- 4. Бифуркации коразмерности два в непрерывных негладких отображениях, связанные с сильными резонансами.
- 5. Математическое моделирование регуляции уровня тестостерона в мужском организме.
- 6. Разрывные отображения окружности в моделях систем управления, электроники и механики.
- 7. Квазипериодичность, бифуркации замкнутых инвариантных кривых.
- 8. Мультистабильность и скрытые аттракторы.

Доклады на конференциях

Результаты научных исследований докладывались на крупнейших международных конференциях по нелинейной динамике, теории управления, силовой электронике, механике, биологии и медицине: Россия, Дания, Англия, Ирландия, Германия, Швеция, Нидерданды, США, Франция, Италия, Южная Африка, Испания, Япония, Польша, Индия, Швейцария, Австрия.

Публикации

По результатам исследований опубликовано более 100 статей в ведущих высокорейтинговых международных журналах издательств World Scientific, Elsevier, Springer, AIP (American Institute of Physics), APS (American Physical Society), IFAC, IEEE по нелинейной динамике, автоматическому управлению, силовой электронике, физике, математике, биологии и медицине: **IEEE Transactions on Circuits and Systems-I; IEEE Transactions on Power Electronics; Chaos; Physical Review E; Physica D; International Journal of Bifurcation and Chaos; IEEE Transactions on Industrial Informatics; Chaos, Solitons and Fractals; Nonlinear Dynamics; Mathematics and Computers in Simulation; Nonlinear Analysis:Hybrid Systems; Physics Letters A; Computer Methods and Programs in Biomedicine и др.**

Визит проф. Жусубалиева Ж.Т. в Реймский университет (Франция).



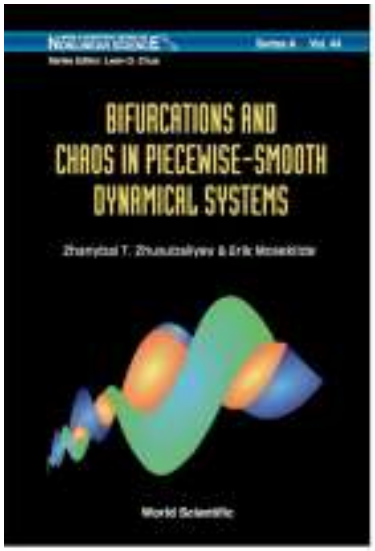




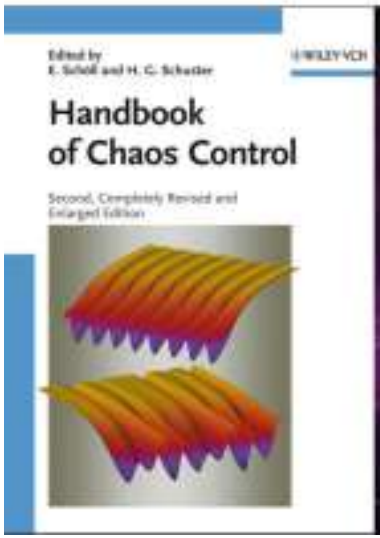
Подготовка кадров высшей квалификации

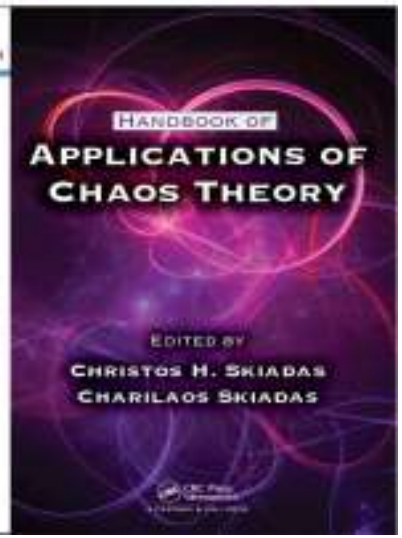
- **Под руководством проф. Жусубалиева Ж.Т. защищены одиннадцать кандидатских диссертаций**:
  - Бабковский А. Г., 1998 г.
  - Косчинский С. Л., 1998 г.
  - Рудаков В. Н., 1998 г.
  - Пинаев С. В., 1999 г.
  - Емельянова Е. Ю. 2000 г.
  - Иванова Е. Н., 2003 г.
  - Сухотерин Е.А., 2004 г.
  - Чевычелов С.Ю., 2009 г.
  - Яночкина О. О., 2011 г.
  - Гольцов Ю. А., 2021 г.
  - Абдирасулов А. З., 2025 г.
- **Проф. Жусубалиев Ж.Т. участвовал в подготовке четырех PhD диссертаций**:
  - Laugesen J.L., 2011 г., аспирант факультета физики Технического университета Дании.
  - Silva M. M., 2014 г., аспирантка факультета информационных систем и систем управления Уппсальского университета (Швеция). Диссертация Margarida M. Silva отмечена премией Bjurzons за лучшую работу в области естественных наук (Bjurzons premium award for an excellent thesis in Natural Sciences).
  - Mattsson P., 2016 г., аспирант факультета информационных систем и систем управления Уппсальского университета (Швеция).
  - Yamalova D., 2019 г., аспирантка факультета информационных систем и систем управления Уппсальского университета (Швеция).

Основные монографии и учебные пособия





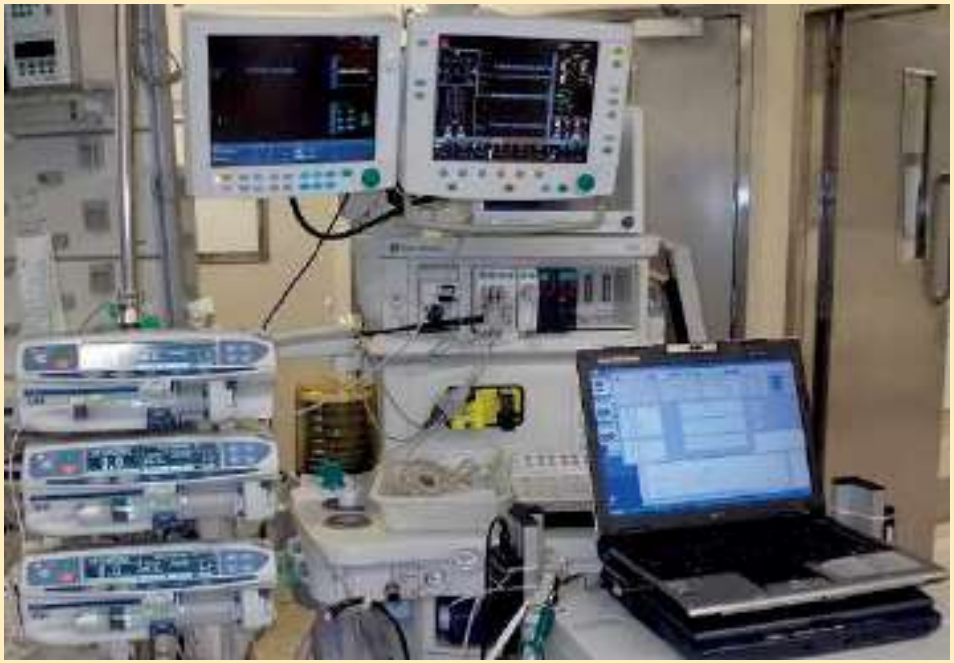




- Zh. T. Zhusubaliyev and Erik Mosekilde. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. New Jersey, London, Singapore, Hong-Kong: World Scientific, 2003.
- Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Chaos in Pulse-Width Modulated Control Systems. *Handbook of Chaos Control*, 2nd Edition, Sholl and Schuster (Eds.). Weinheim: Wiley – VCH, 2008. (глава справочника по управлению хаосом). (Индексируется в Scopus)
- Mosekilde E., Laugesen J.L, Zhusubaliyev Zh.T. On the Transition to Phase Synchronized Chaos. *Handbook of Applications of Chaos Theory*, Christos H. Skiadas, Charilaos Skiadas (Eds.). Boca Raton, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. (глава справочника по приложениям теории хаоса). (Индексируется в Scopus)
- Churilov A.N., Medvedev A., Zhusubaliyev Zh. T. Complex Dynamics and Hidden Attractors in Delayed Impulsive Systems. 399 – 427. *Chaotic Systems with Multistability and Hidden Attractors*, X. Wang, N. V. Kuznetsov, G. Chen (Eds.). New York: Springer, 2022, 699. (глава книги по хаотическим системам с мультистабильностью и скрытыми аттракторами).

Рецензии на книгу Zh. T. Zhusubaliyev and Erik Mosekilde. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. New Jersey, London, Singapore, Hong-Kong: World Scientific, 2003. https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/5313:
1. *"This book is an important guide for engineers and all scientists working with non-smooth models."* Mathematical Reviews
2. *"The book contains interesting examples of piecewise-smooth dynamical systems and its bifurcation phenomena with direct applications ... it will certainly be a useful tool for many scientists and engineers."* Zentralblatt MATH

Совместные исследования с Уппсальским университетом, Швеция (Department of Information Technology, Uppsala University, Sweden)

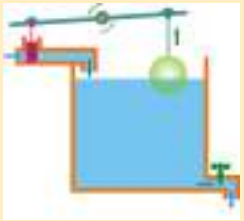


Оборудование на платформе Galeno (из PhD диссертации Margarida M. Silva [1])

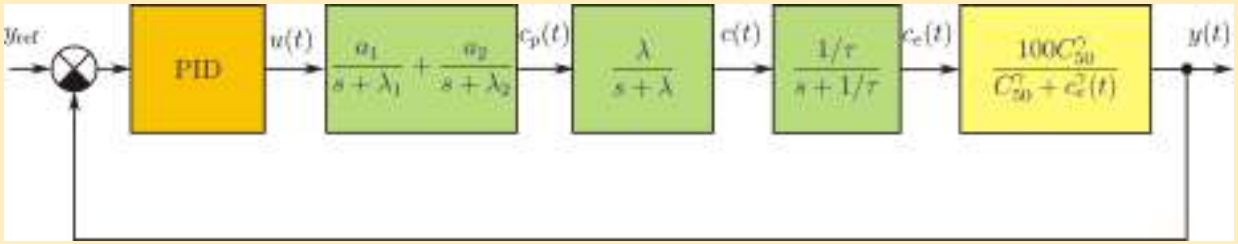


Измерение уровня нейромышечной блокады (Hospital de Santo António, Porto, из PhD диссертации Margarida M. Silva [1]).

[1] Silva M. M. Nonlinear Modeling and Feedback Control of Drug Delivery in Anesthesia. PhD thesis, Department of Information Technology, Division of Systems and Control, Uppsala University, Sweden, 2014.



(а)



(б)

Рис.1.1. (а) Пример системы автоматического управления. (б) Структурная схема ПИД регулятора системы автоматического управления НМБ

Стандартные физиологически обоснованные модели, описывающие взаимосвязь между введенной дозой анестетика $u(t)$ и его эффектом, можно разделить на четыре каскадных блока, показанных на рис.1.1.

- **Первый блок связывает дозу анестетика $u(t)$ с его концентрацией $c_p(t)$ в плазме крови. Это составляет модель фармакокинетики PK (PK – pharmacokinetics).**
- **Второй блок связывает концентрацию препарата в плазме крови $c_p(t)$ с концентрацией препарата на месте его действия $c(t)$: в случае миорелаксантов – нервномышечном соединении, а в случае снотворных и анальгетиков – в головном мозге.**
- **Третий блок описывает взаимосвязь между концентрацией $c(t)$ и наблюдаемым эффектом $c_e(t)$. Эти два блока представляют динамическую часть и описывают фармакодинамику (PD – pharmacodynamics), т.е. распределение лекарств в организме, которое зависит от нескольких транспортных и метаболических процессов.**
- **Четвертый блок на рис. 1.1 представляет нелинейность PD и связывает концентрацию эффекта $c_e(t)$ с эффектом препарата в количественном выражении по измеренному уровню $y(t)$ нейромышечной блокады NMB. Параметры этой функции необходимо оценить на основе клинических данных.**

Управляющий сигнал $u(t)$ формирует ПИД регулятор (PID) (рис. 1.1) $u(t) = K\left(\varepsilon(t) + T_i\int\varepsilon(s)ds + T_d\frac{d\varepsilon}{dt}\right)$,

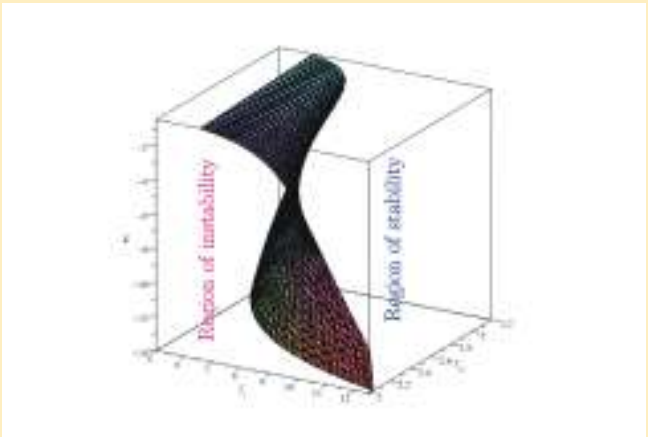
$\varepsilon(t) = y_{\text{ref}} - y(t)$. **При наличии надежных моделей фармакокинетики (PK) и фармакодинамики (PD) можно избежать недодозировки или передозировки, запрограммировав шприцевые насосы на целевые значения эффективности препарата. Существует несколько моделей, одна из них, называемая «минимально параметризованная» (minimally parameterized), имеет вид** $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T$, **где**

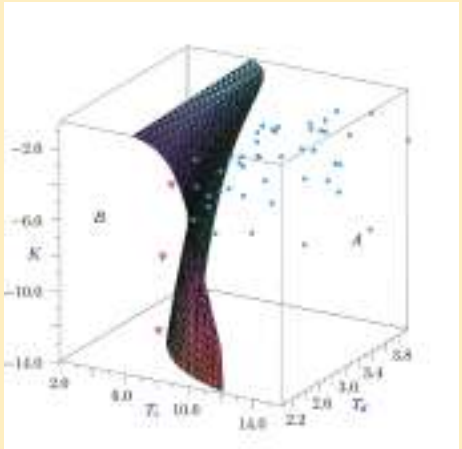
$$f_1 = -\alpha k_3 x_1 - \alpha^2 k_1 k_3 K T_d \Phi'(x_3)(x_2 - x_3) + \alpha k_3 K(y_{\text{ref}} - \Phi(x_3)) + \frac{\alpha k_3 K}{T_i}x_4, \quad \Phi(x_3) = \frac{100\, C_{50}^{\gamma}}{C_{50}^{\gamma} + x_3^{\gamma}};$$

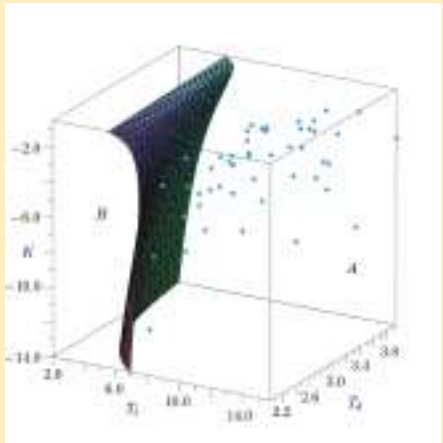
$$f_2 = \alpha k_2(x_1 - x_2); \quad f_3 = \alpha k_1(x_2 - x_3); \quad f_4 = y_{\text{ref}} - \Phi(x_3).$$

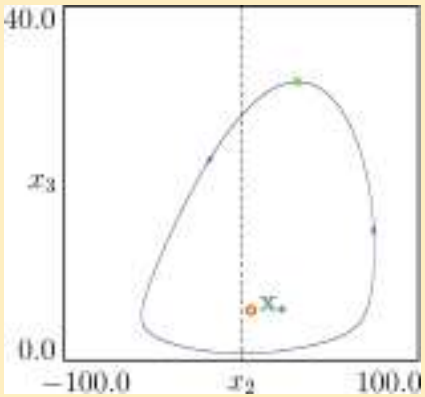
Здесь физический смысл переменных x_1, x_2, x_3, x_4 и параметров пояснены в наших публикациях [2–6].

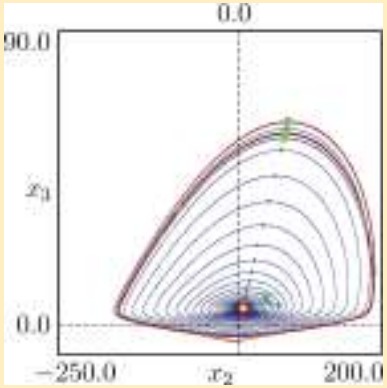
1.2. Бифуркационный анализ

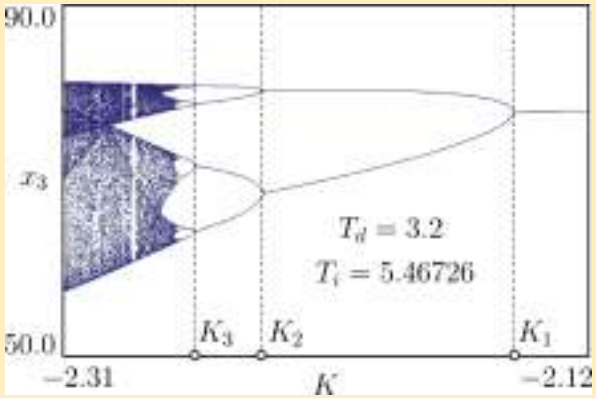












Публикации результатов исследований

2. Zh. T. Zhusubaliyev, A. Medvedev, M. Silva, Bifurcation Analysis for PID-controller Tuning Based on a Minimal Neuromuscular Blockade Model in Closed-loop Anesthesia// 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Firenze, Italy, 2013.

3. Zh.T. Zhusubaliyev, A. Medvedev, M. Silva, Nonlinear Dynamics in Closed-loop Anesthesia: Pharmacokinetic/Pharmacodynamic Model under PID-feedback//The 2014 American Control Conference (ACC 2014), Portland, Oregon, USA.

4. Zh. T. Zhusubaliyev, M. Silva, A. Medvedev, Automatic Recovery From Nonlinear Oscillations in PID-Controlled Anesthetic Drug Delivery// European Control Conference (ECC 2015), Linz, Austria, 2015.

5. Zh. T. Zhusubaliyev, A. Medvedev, M. Silva M, Bifurcation Analysis of PID Controlled Neuromuscular Blockade in Closed-loop Anesthesia//Journal of Process Control, 25, 152-163, 2015, (Impact Factor 3.666, квартиль Q1).

6. A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, O. Rosen, M. M. Silva, Oscillations-free PID control of anesthetic drug delivery in neuromuscular blockade//Computer Methods and Programs in Biomedicine, 171 119–131, 2019, (Impact Factor 5.428, квартиль

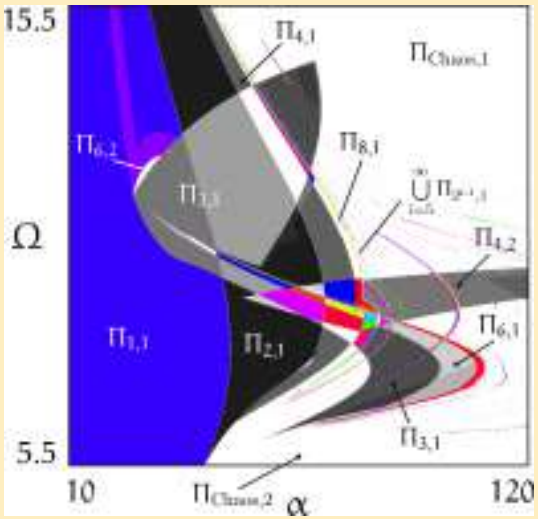
Совместные исследования с Техническим университетом Дании (Technical University of Denmark), Технологическим институтом Индии (Indian Institute of Technology), Штуттартским университетом, Германия (University of Stuttgart, Germany)

$$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{pmatrix} = F(x_k, y_k),$$

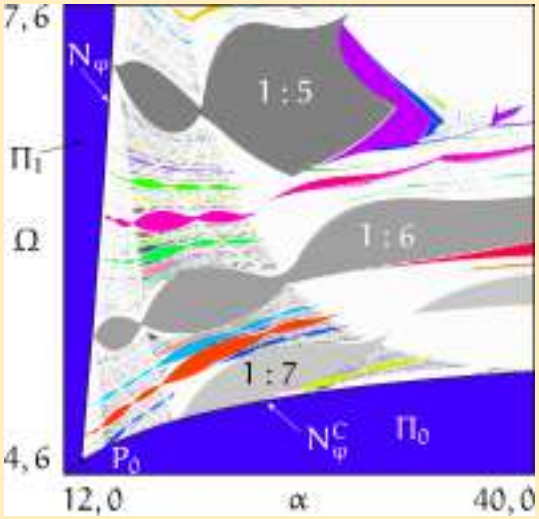
$$F(x,y) = \begin{cases} F_{\mathcal{L}}(x,y), & (x,y) \in \mathcal{I}_{\mathcal{L}}; \\ F_{\mathcal{M}}(x,y), & (x,y) \in \mathcal{I}_{\mathcal{M}}; \\ F_{\mathcal{R}}(x,y), & (x,y) \in \mathcal{I}_{\mathcal{R}}. \end{cases}$$

$$F,\ \mathcal{I}_{\mathcal{L}},\ \mathcal{I}_{\mathcal{M}},\ \mathcal{I}_{\mathcal{R}} \in \mathbb{R}^2.$$

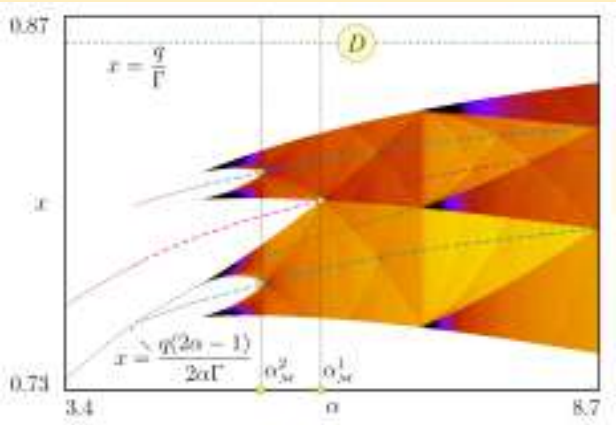
Кусочно-гладкое отображение



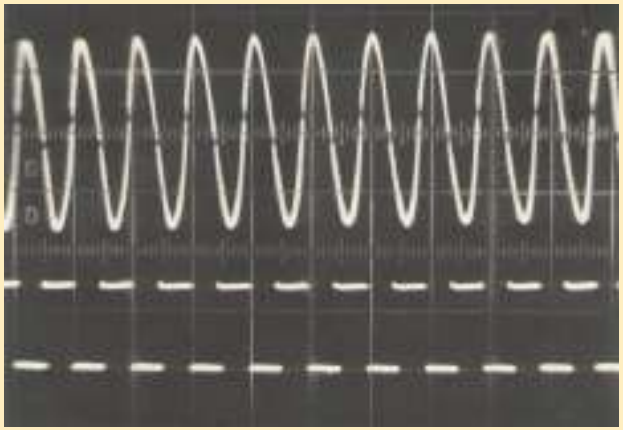
Мультистабильность, классические и «border collisions» бифуркации



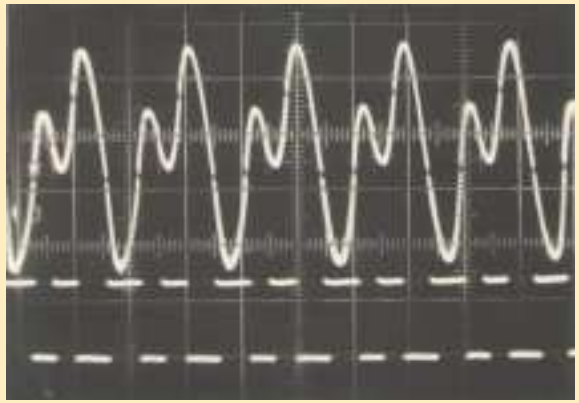
Квазипериодичность, «border collisions», резонансны на замкнутой инвариантной кривой



Бифуркации хаотических аттракторов (merging bifurcation)

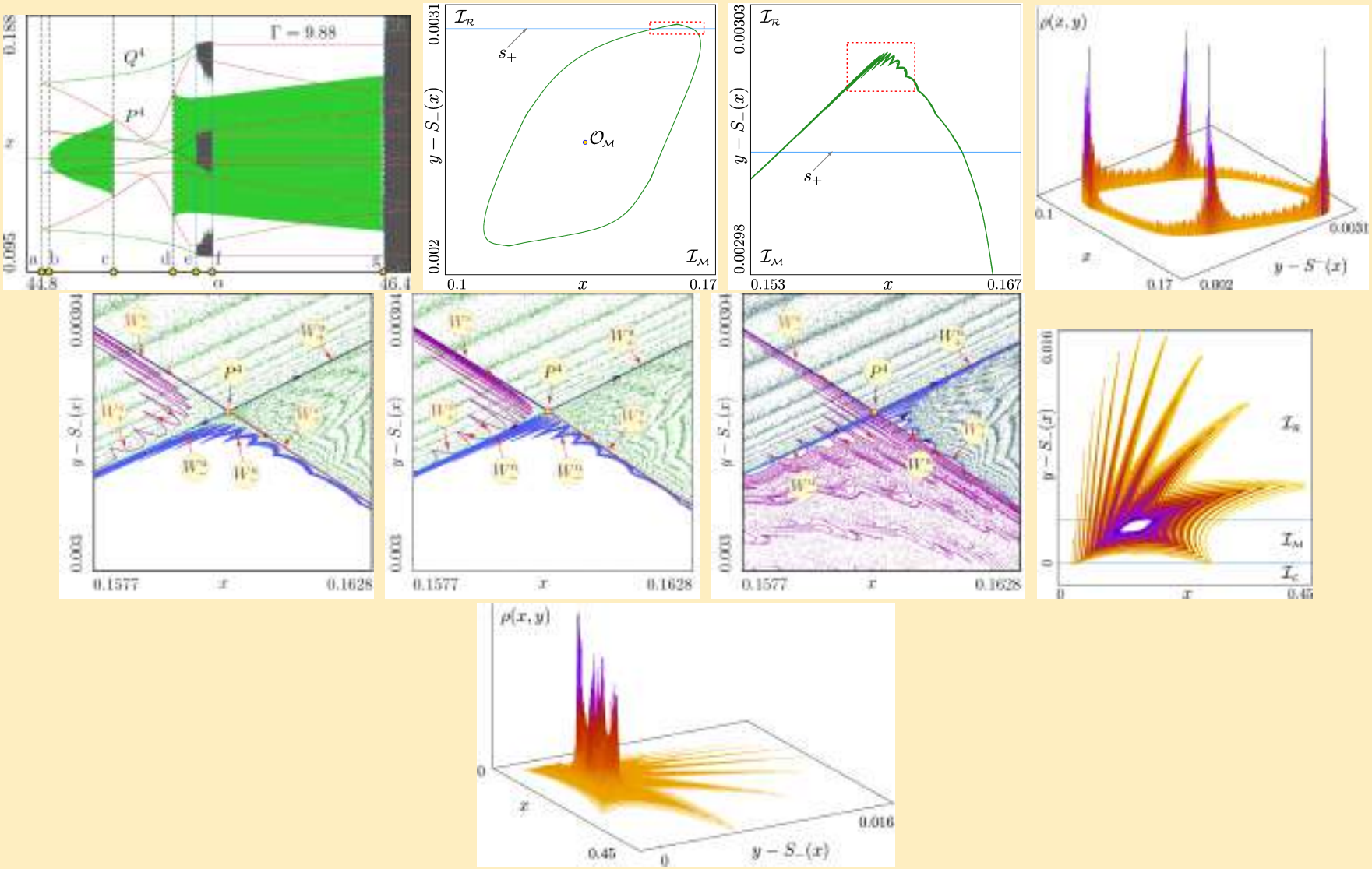


Классическая бифуркация удвоения периода колебаний



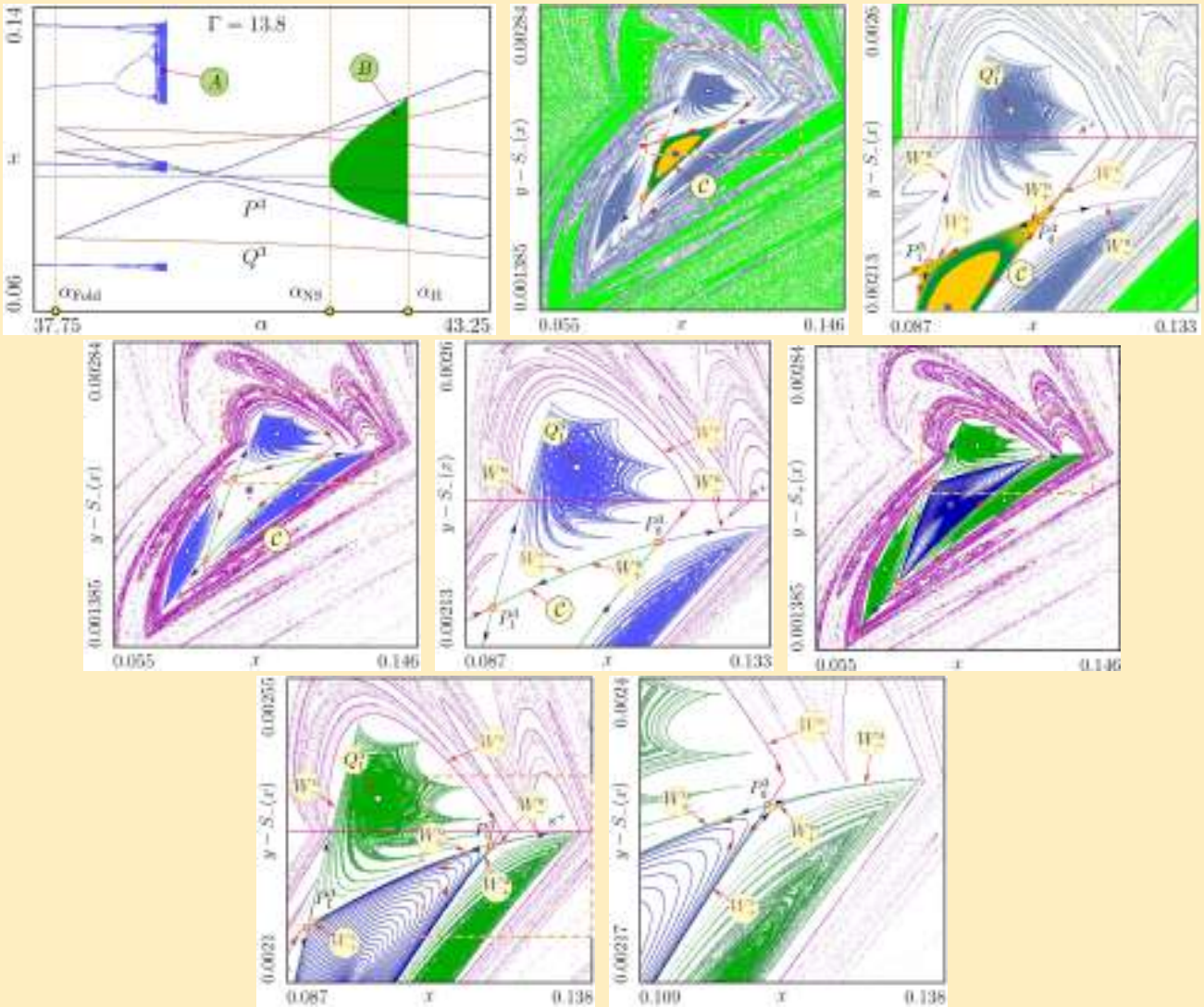
(из статьи Алейников О.А., Баушев В.С. и др., Электричество, 1991.)

2.1. Кризис хаотического аттрактора



Механизмы внезапного изменения размера хаотического аттрактора через гомоклиническую бифуркацию (expansion bifurcation, interior crisis) [11]

2.2. Бифуркации коразмерности два замкнутой инвариантной кривой, связанные с сильными резонансами



Резонанс 1:3 [11]

Основные публикации по результатам исследований

1. Zh. T. Zhusubaliyev, E. A. Soukhoterin and E. Mosekilde, Border-collision Bifurcations and Chaotic Oscillations in a Piecewise-Smooth Dynamical System// International Journal of Bifurcation and Chaos, 11(12), 2977-3001, 2001 (Impact Factor 2.836, квартиль Q1).
2. Zh. T. Zhusubaliyev, E. A. Soukhoterin and E. Mosekilde, Border-Collision Bifurcations on a Two-Dimensional Torus//Chaos, Solitons and Fractals, 13(9), 1889-1915, 2002 (Impact Factor 5.944, квартиль Q1).
3. Zh. T. Zhusubaliyev, E. A. Soukhoterin and E. Mosekilde, Quasi-Periodicity and Border-Collision Bifurcations in a DC–DC Converter With Pulsewidth Modulation// IEEE Trans. Circuits and Systems I, 50(8), 1047-1057, 2003 (Impact Factor 3.605, квартиль Q1).
4. Zh. T. Zhusubaliyev and E. Mosekilde, Torus Birth Bifurcation in a DC/DC Converter// IEEE Trans. Circuits and Systems I, 53(8), 1839-1850, 2006 (Impact Factor 3.605, квартиль Q1).
5. Zh. T. Zhusubaliyev and E. Mosekilde, Birth of Bilayered Torus and Torus Breakdown in Piecewise-Smooth Dynamical system// Physics Letters A, 351, 167-174, 2006 (Impact Factor 2.654, квартиль Q1).
6. Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, S. Maity , S. Mohanan and S. Banerjee, Border Collision Route to Quasiperiodicity: Numerical Investigation and Experimental Confirmation// Chaos. An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 16, 023122, 1-11, 2006 (Impact Factor 3.642, квартиль Q1).
7. Zh. T. Zhusubaliyev and E. Mosekilde, Direct Transition From a Stable Equilibrium to Quasiperiodicity in Non-Smooth Systems// Physics Letters A, 372, 2237-2246, 2008 (Impact Factor 2.654, квартиль Q1).
8. Zh. T. Zhusubaliyev , Mosekilde, S. De and S. Banerjee, Transitions From Phase-Locked Dynamics to Chaos in a Piecewise-Linear Map// Physical Review E, 77 (2) , 026206, 1-9, 2008 (Impact Factor 2.529, квартиль Q1).
9. Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, E. Pavlova, Multistability and Torus Reconstruction in a DC-DC Converter with Multilevel Control// IEEE Trans. on Industrial Informatics, 9. 1936-1946. 2013 (Impact Factor 10.215, квартиль Q1).
10. Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, A.I. Andriyanov, V.V. Shein, Phase Synchronized Quasiperiodicity in Power Electronic Inverter Systems// Physica D, 14-24, 2014,(Impact Factor 2.3, квартиль Q1).
11. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, F. Bastian, Transformations of closed invariant curves and closed-invariant-curve-like chaotic attractors in piecewise smooth systems//International Journal of Bifurcation and Chaos, 31(2), 2130009 (15 pages), 2021 (Impact Factor 2.836, квартиль Q1). Avrutin V.,
12. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, I. Sushko, L.Gardini, Border Collision Bifurcation of a Resonant Closed Invariant Curve // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 32, 043101 (2022). (Impact Factor 2.9, квартиль Q1) https://doi.org/10.1063/5.0086419
13. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, A.S. Kucherov, R. Haroun, A. El Aroudi, Period adding with symmetry breaking/recovering in a power inverter with hysteresis control//Physica D: Nonlinear Phenomena, 444, 2023, 133600 (16 pages). (Impact Factor 4.0, квартиль Q1). https://doi.org/10.1016/j.physd.2022.133600
14. Zhusubaliyev Zh. T., Mandal K., Bastian F., Aroudi A. El. Minimal model for investigation of noise-induced bubbling // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2025. 472. 134475. https://doi.org/10.1016/j.physd.2024.134475 (Импакт фактор 2.7, квартиль Q1)
15. Avrutin V., Weik F., Zhusubaliyev Zh.T., Akyuz Y, Roggenbuck K. Period-Incrementing, Sausage-String- Like Structures, and Multistability in a Power Converter with Hysteresis Control: An Archetypal Map Approach // Chaos, Solitons and Fractals . 2025. 192. 115951. Импакт-фактор 5.3, квартиль Q1) https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115951
16 Avrutin V., Zhusubaliyev Zh.T. Discontinuous invariant curves and their bifurcations // Int. J. Bifurcat. Chaos. – 2026. – V. 36(01). – P. 2630001(1)- 2630001(20), (Impact Factor 2.3, квартиль Q1) https://doi.org/10.1142/S0218127426300016.

Совместные исследования с Техническим университетом Дании, Штуттартским университетом (Германия), университетом Урбино (Италия), университетом Rovira i Virgili (Испания)

Однофазный инвертор с широтно-импульсным управлением

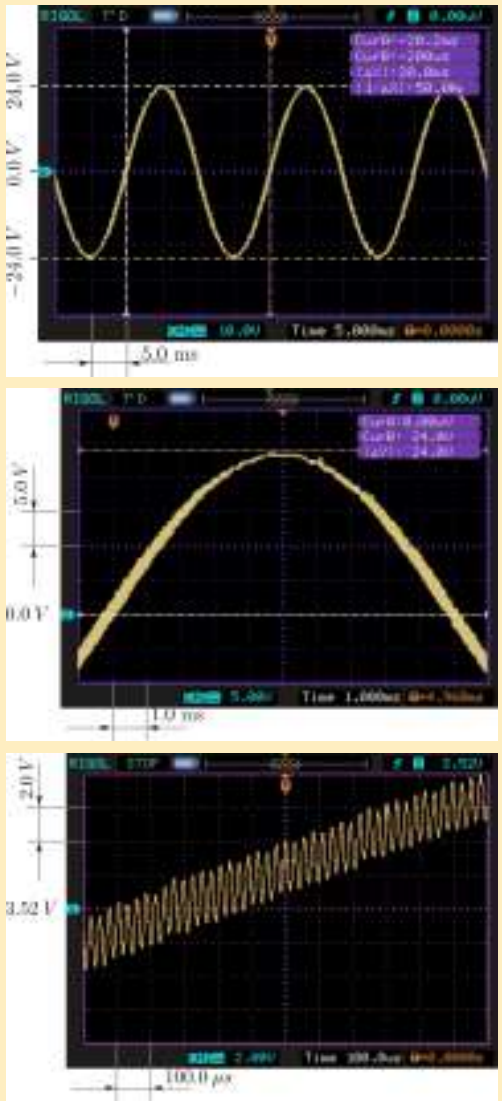


Частоты

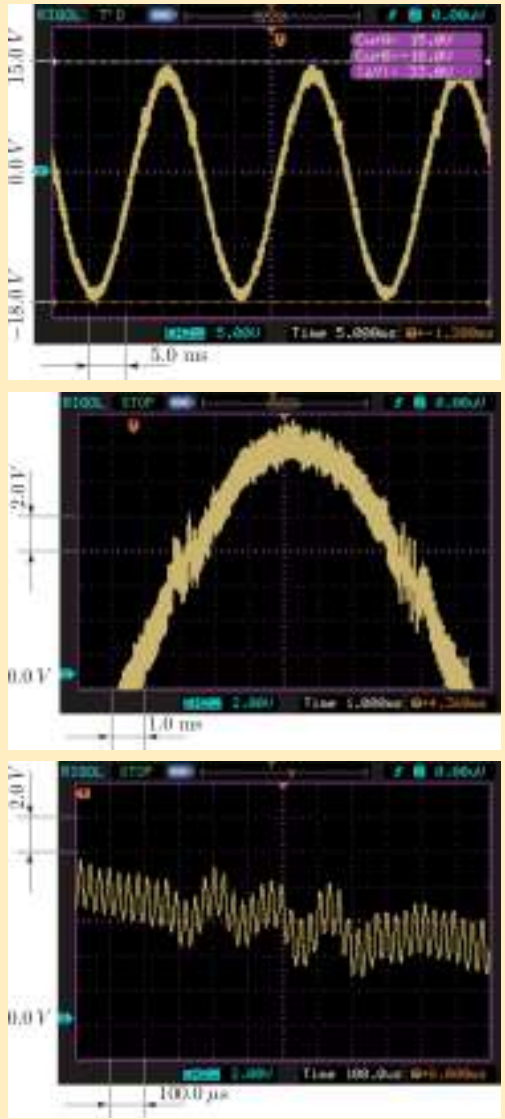
- Опорная частота: $f_{\mathrm{ref}} = 50$ Гц
- Частота работы ключей: $f_{\mathrm{sw}} \lessapprox 250$кГц

Здесь 50 Гц / 40 кГц

Регулярная динамика

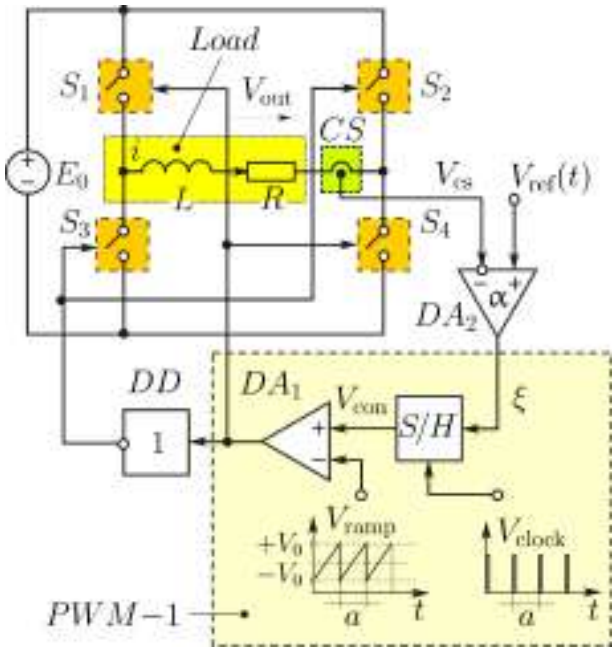


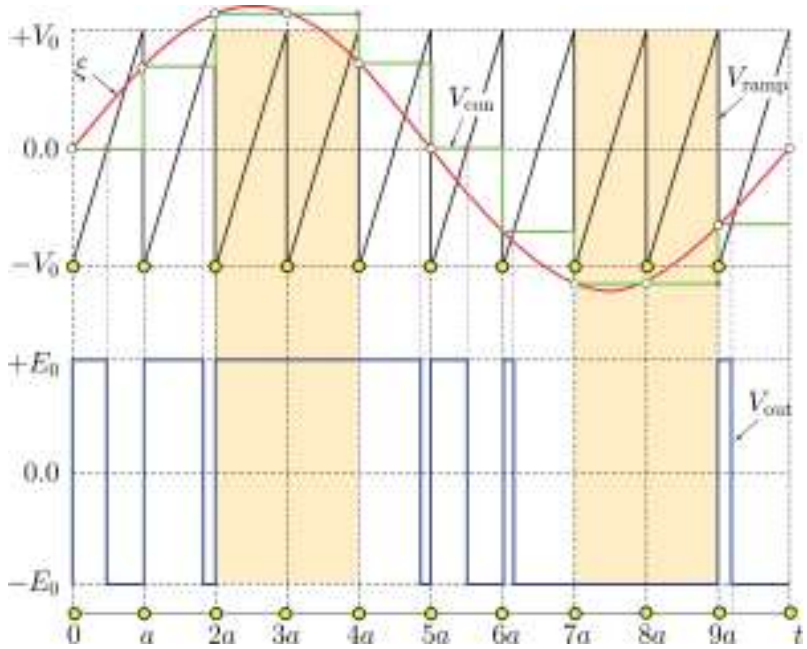
Хаотическая динамика



3.1. Математическая модель инвертора с непрерывным временем

$$\frac{dx}{d\bar{t}} = \begin{cases} \lambda(x-1), & x(\bar{t})\big|_{\bar{t}=\lfloor\bar{t}\rfloor} < \dfrac{q}{\Gamma}\cos\left(\dfrac{2\pi\lfloor\bar{t}\rfloor}{m}\right) - \dfrac{2P}{\alpha\Gamma}\left(\bar{t}-\lfloor\bar{t}\rfloor-\frac{1}{2}\right) \\ \lambda(x+1), & x(\bar{t})\big|_{\bar{t}=\lfloor\bar{t}\rfloor} > \dfrac{q}{\Gamma}\cos\left(\dfrac{2\pi\lfloor\bar{t}\rfloor}{m}\right) - \dfrac{2P}{\alpha\Gamma}\left(\bar{t}-\lfloor\bar{t}\rfloor-\frac{1}{2}\right) \end{cases}$$





$x = \dfrac{Ri}{E_0}$, $\bar{t} = \dfrac{t}{a}$, $P = \dfrac{R}{\beta E_*}V_0$, $q = \dfrac{R}{\beta E_*}V_m$, $\lambda = -\dfrac{R}{L}a$, $\Gamma = \dfrac{E_0}{E_*}$.

Кратность частот $m = \dfrac{f_{\text{sw}}}{f_{\text{ref}}}$

$50 \lessapprox m \lessapprox 5\,000.$

3.2. Математическая модель инвертора с дискретным временем

$$x_{k+1} = F(x_k, k), \quad k = 0, 1, 2, \ldots,$$

$$F(x_k, k) = \begin{cases} F_{\mathcal{L}}(x_k) = & bx_k - (b-1), & x_k \leqslant s_k^-; \\ F_{\mathcal{M}}(x_k) = & bx_k - (b+1) + 2b^{(1-z_k)}, & s_k^- < x_k < s_k^+; \\ F_{\mathcal{R}}(x_k) = & bx_k + (b-1), & s_k^+ \leqslant x_k; \end{cases}$$

многообразие переключения:

$$s_k^{\pm} = \frac{q}{\Gamma} \cos\left(\frac{2\pi k}{m}\right) \pm \frac{P}{\alpha\Gamma}$$

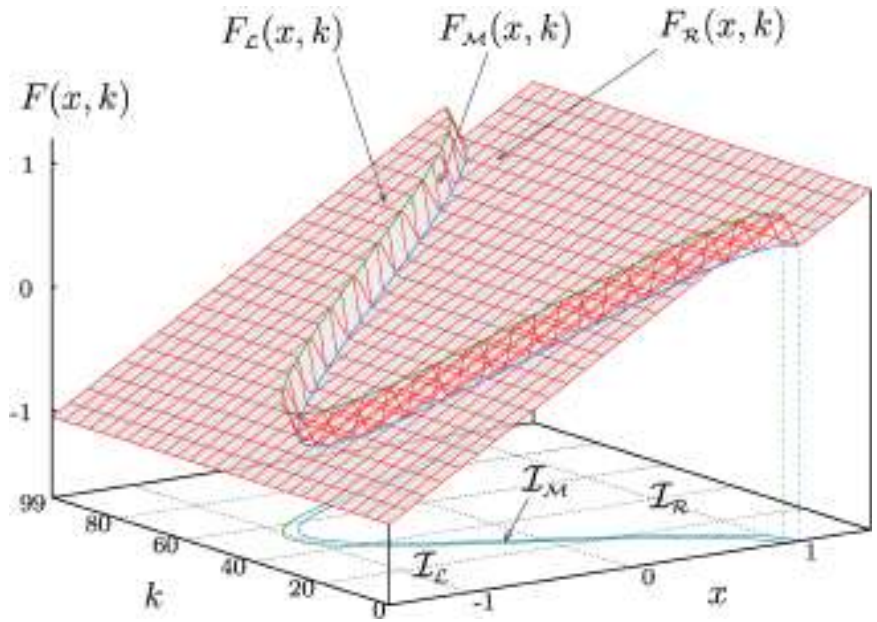
относительная длительность импульсов $0 \leqslant z_k \leqslant 1.0$:

$$z_k = \frac{\alpha q}{2P} \cos\left(\frac{2\pi k}{m}\right) - \frac{\alpha\Gamma}{2P} x_k + \frac{1}{2}$$

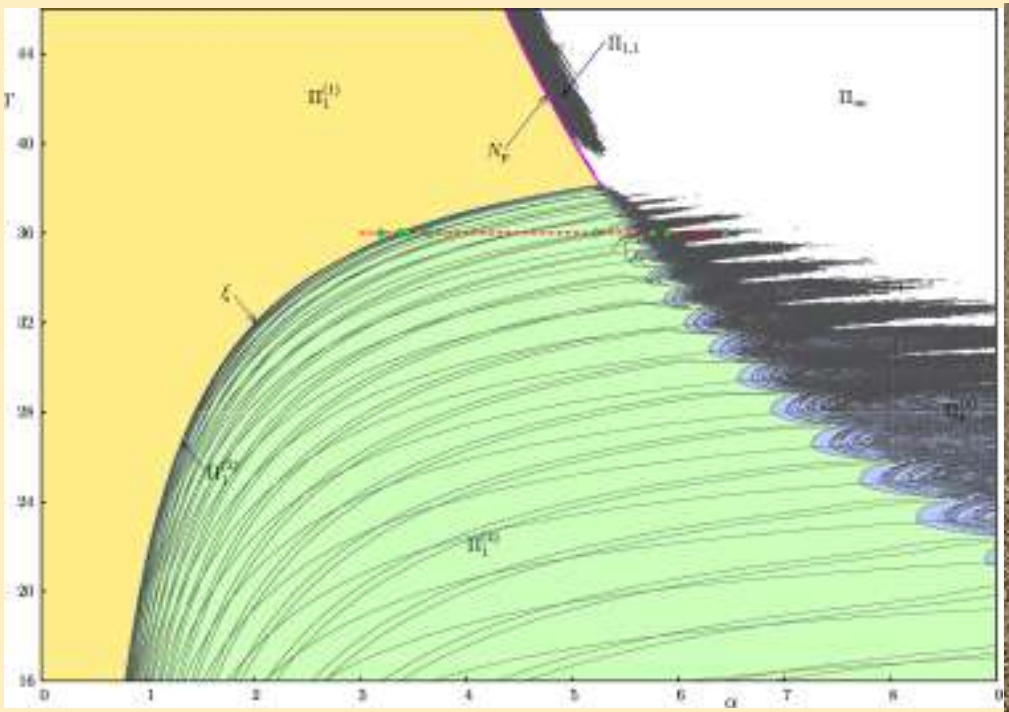
насыщение модулятора:

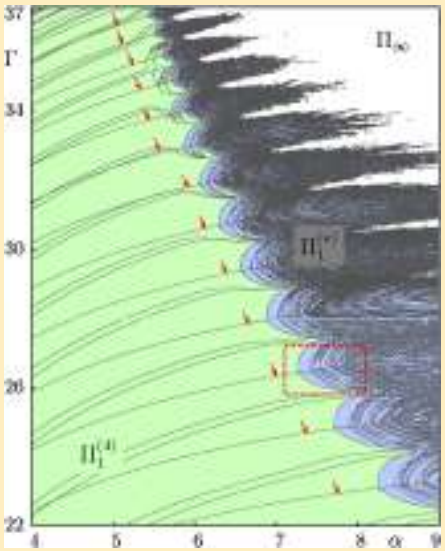
$$\begin{array}{rcl} x_k \leqslant s_k^- & \Rightarrow & 1 \\ s_k^- < x_k < s_k^+ & \Rightarrow & z_k \\ s_k^+ \leqslant x_k & \Rightarrow & 0 \end{array}$$

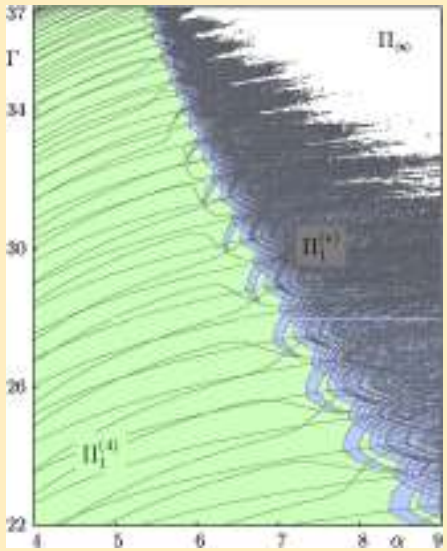
Двумерное отображение



3.3. Макроструктура пространства параметров





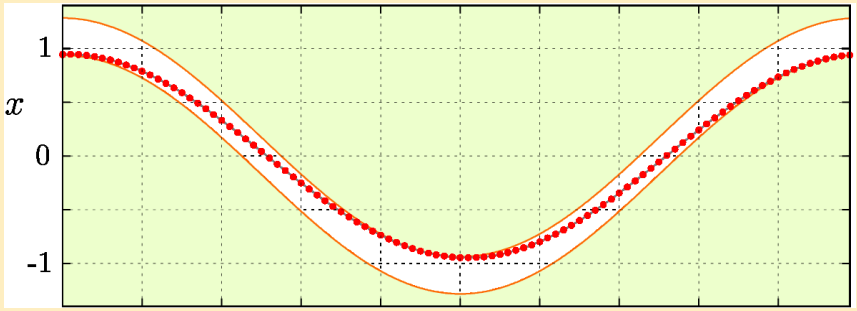




3.4. Различные типы периодических орбит в области Π_1

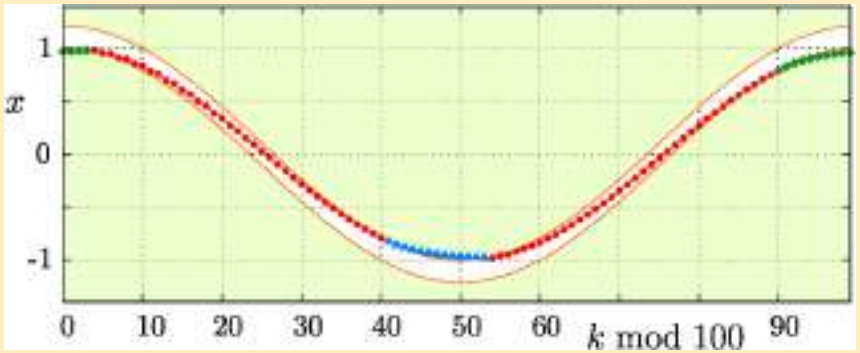
- $\mathcal{O}_{\mathcal{M}^m}$

  Область $\Pi_1^{(1)} \subset \Pi_1$



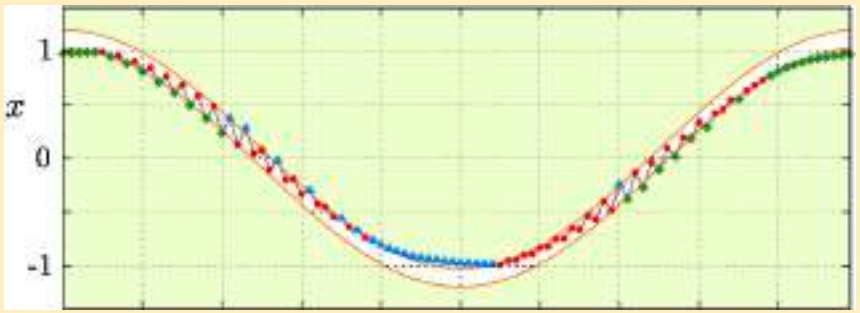
- $\mathcal{O}_{\mathcal{M}^{k_1}\mathcal{R}^{k_2}\mathcal{M}^{k_3}\mathcal{L}^{k_4}}$,
  где $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = m$

  Область $\Pi_1^{(4)} \subset \Pi_1$

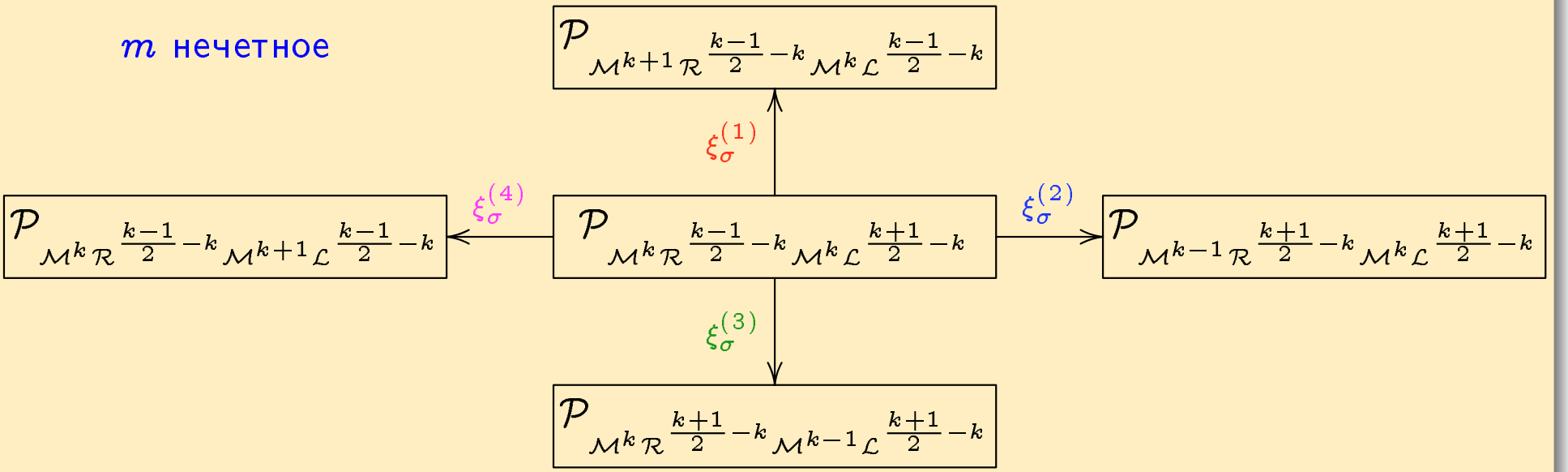


- Более
  сложный тип периодических
  движений

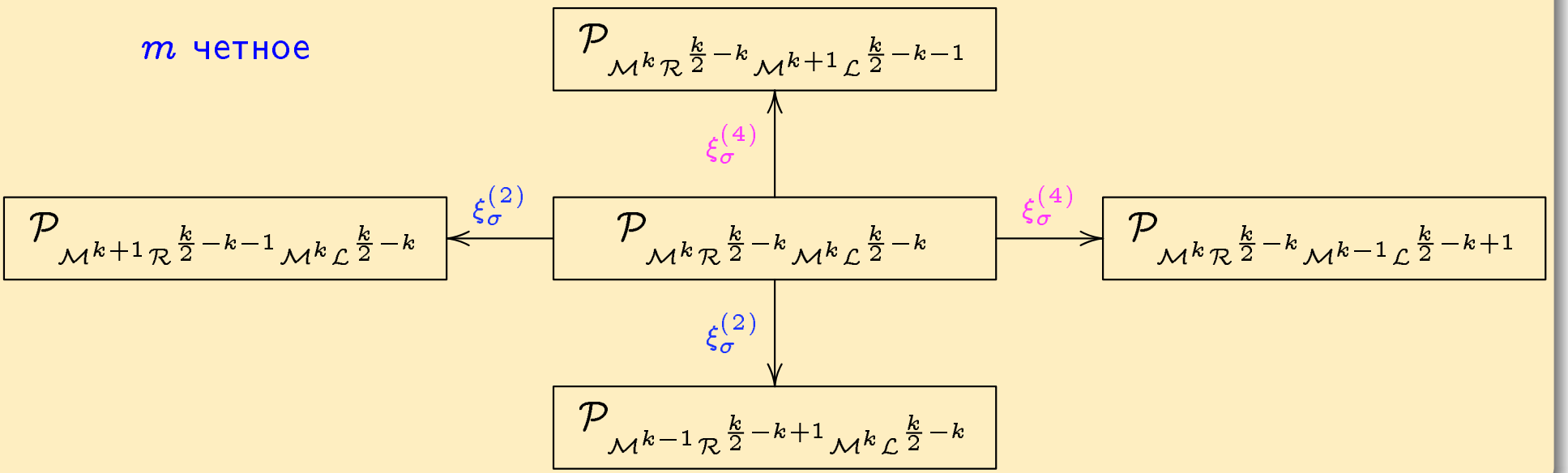
  Область $\Pi_1^{(*)} \subset \Pi_1$

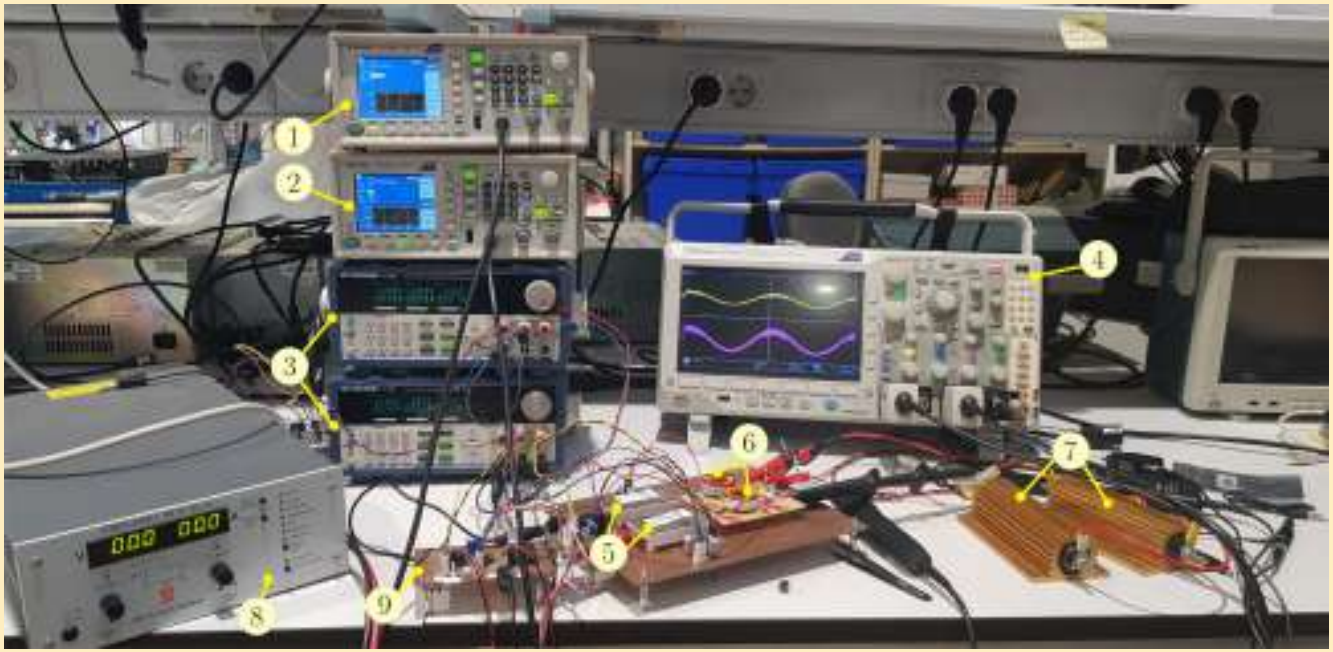


m нечетное



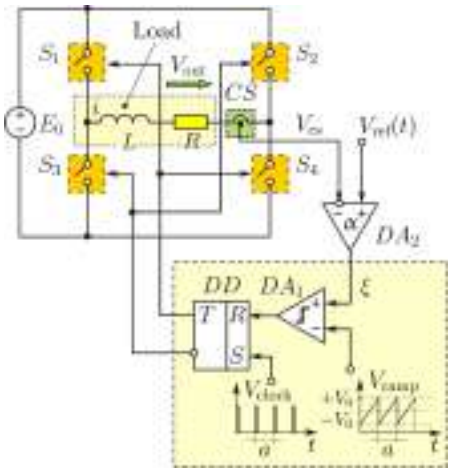
m четное

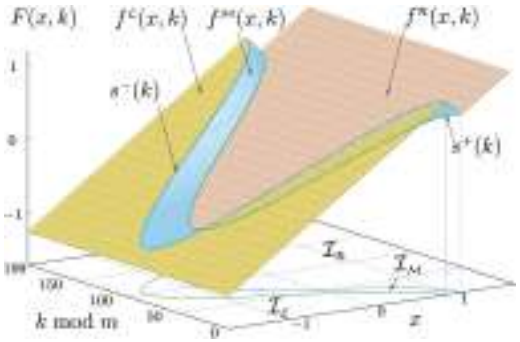




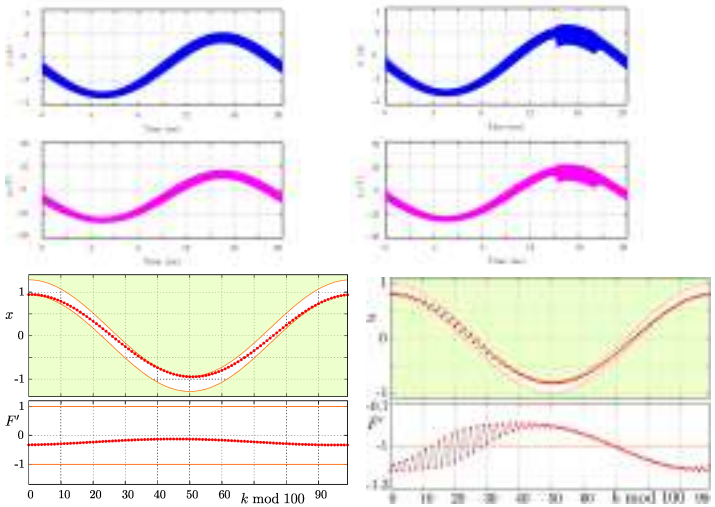
Лаборатория проф. Abdelali El Aroudi, Department of Electronics, Electrical Engineering and Automatic Control Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain. Экспериментальное детектирование «bubbling» в однофазном инверторе.

Однофазный инвертор

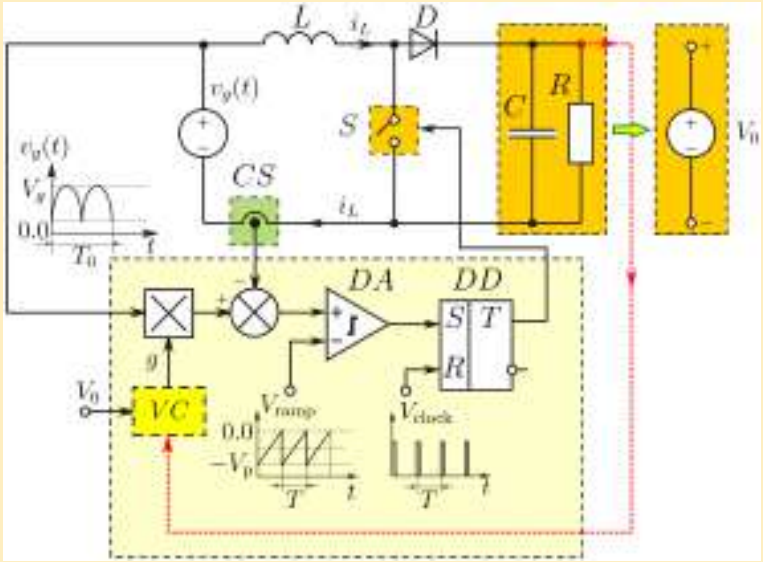


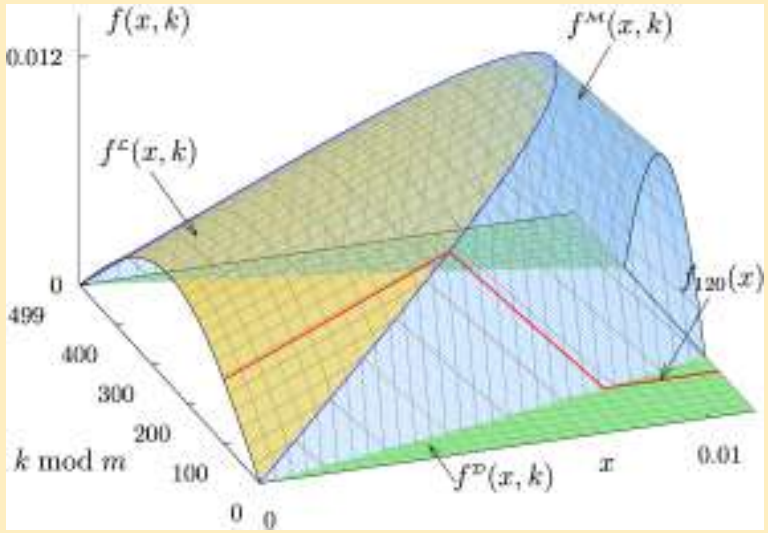


«Bubbling» индуцируется border, шумом после pitchfork и flip

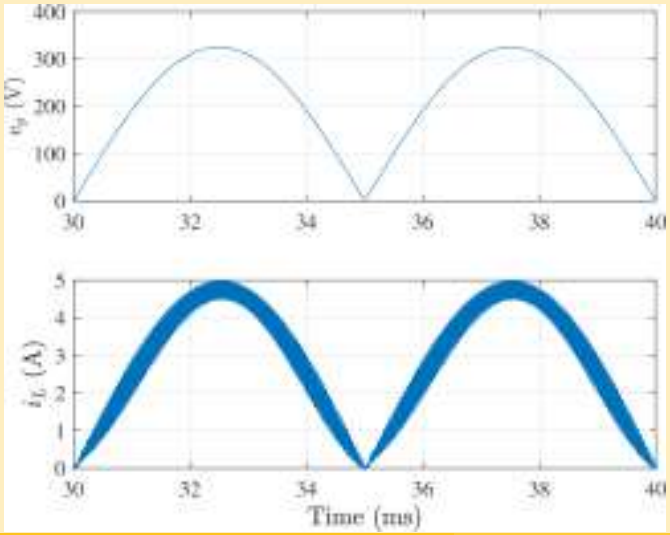


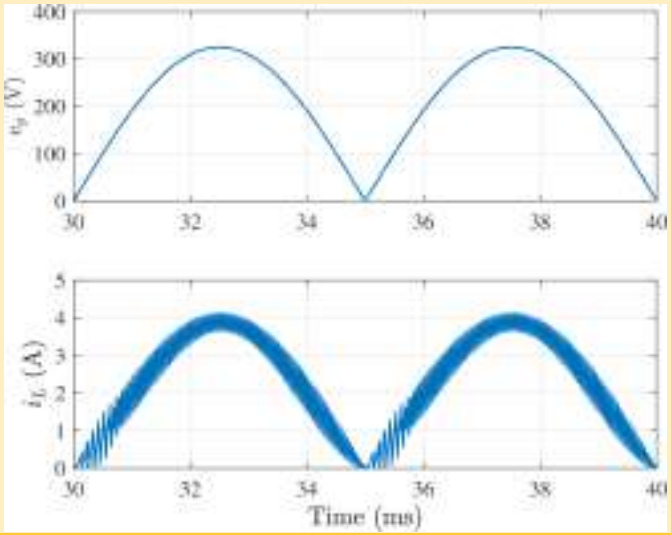
Совместные исследования со Штуттартским университетом (Германия), Университетом Rovira i Virgili (Испания)





Корректор коэффициента мощности





Основные публикации по результатам исследований

1. V. Avrutin, E. Mosekilde, Zh.T. Zhusubaliyev, L. Gardini, Onset of Chaos in a Single-Phase Power Electronic Inverter. Chaos, 25(4), 043114-1-043114-14, 2015(**Impact Factor 3.642, квартиль Q1**).
2. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, Border Collisions Inside the Stability Domain of a Fixed Point, Physica D: Nonlinear Phenomena, 321-322, 1-15, 2016 (**Impact Factor 2.3, квартиль Q1**).
3. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, Cascades of alternating pitchfork and flip bifurcations in H-bridge inverters, Physica D, 345, 27-39, 2017 (**Impact Factor 2.3, квартиль Q1**).
4. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, A. Saha, S. Banerjee, I. Sushko, L. Gardini, Dangerous Bifurcations Revisited// International Journal of Bifurcation and Chaos, 26(14),1630040-1 — 1630040-24 (24 pages), 2016 (**Impact Factor 2.836, квартиль Q1**).
5. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, Nested closed invariant curves, International Journal of Bifurcation and Chaos, 29(7), 1930017 (12 pages), 2019 (**Impact Factor 2.836, квартиль Q1**).
6. Avrutin, Zh.T. Zhusubaliyev, A. El Aroudi, D. Fournier-Prunaret, G. Garcia, and E. Mosekilde. Disrupted Bandcount Doubling in an AC-DC Boost PFC Circuit Modeled by a Time Varying Map. J. of Physics, 692, 2016, 012003.
7. V. Avrutin, J.D. Morcillo, Zh. T. Zhusubaliyev, F. Angulo, Bubbling in a power electronic inverter: Onset, development and detection//Chaos, Solitons and Fractals 104, 135-152, 2017 (**Impact Factor 5.944, квартиль Q1).**
8. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, Suissa, D., El Aroudi, A. Non-observable chaos in piecewise smooth systems//Nonlinear Dynamics, 99, 2031-2048, 2020 (**Impact Factor 5.022, квартиль Q1**).
9. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, A. El Aroudi, Non-visible transformations of chaotic attractors due to their ultra-low density in AC–DC power factor correction converters //Nonlinear Dynamics, 102, 2905-2924, 2020 (**Impact Factor 5.022, квартиль Q1**).
10. V. Avrutin, F. Bastian, Zh. T. Zhusubaliyev, A geometric approach to bubbling// Physica D, 417, 132808 (24 pages),2021 (**Impact Factor 2.3, квартиль Q1**).
11. V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, Piecewise-linear map for studying border collision phenomena in DC/AC converters//International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 30(7), 2030015 (23 pages), 2020 (**Impact Factor 2.836, квартиль Q1**).

4. Регуляция уровня тестостерона в мужском организме

Совместные исследования с Уппсальским университетом (Швеция), Санкт-Петербургским государственным университетом (Россия), Политехническим университетом Турина (Италия)

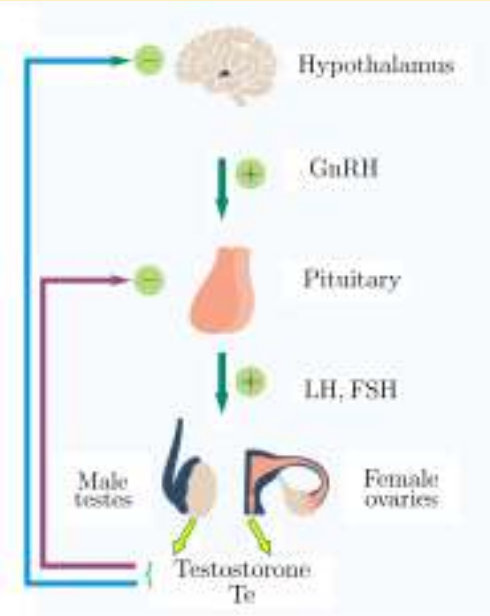


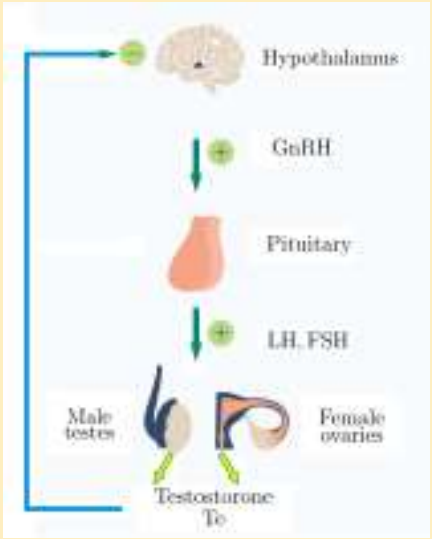
Рис.4.1. Схема гипоталамо-гипофизарно-тестикулярной оси. Здесь FSH – фолликулостимулирующий гормон (Follicle-Stimulating Hormone)

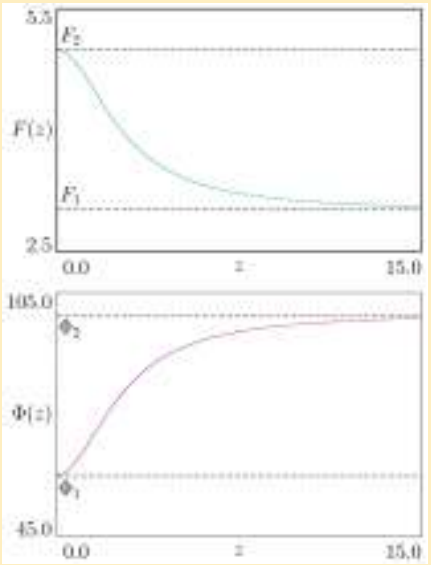
Тестостерон - основной андрогенный стероидный гормон. В регуляции уровня тестостерона (Te) основную роль играют лютеинизирующий гормон (LH – luteinizing hormone) и гонадотропин релизинг гормон (GnRH – gonadotropin-releasing hormone). LH и GnRH гормоны генерируются в отделах головного мозга, соответственно в гипофизе и гипоталамусе. Поэтому динамика LH и особенно GnRH тесно связана с динамикой нейронов мозга и носит импульсный характер [1 – 4]. При этом GnRH стимулирует секрецию LH. Как только LH достигает яичек через кровь, он стимулирует специальные клетки в семенниках, называемые клетками Лейдига. Эти клетки в конечном счете отвечают за выработку тестостерона у мужчин (у женщин – специализированные клетки в яичниках, называемые клетками тека (theca cells)).

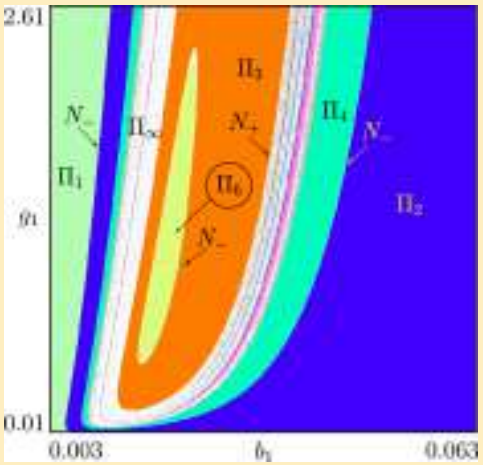
По мере повышения уровня тестостерона в сыворотке крови в гипофиз и гипоталамус посылаются сигналы о прекращении стимуляции выработки тестостерона. Таким образом Te подавляет секрецию GnRH и LH.

С точки зрения теории управления клетки гипоталамуса, генерирующие GnRH, можно рассматривать как импульсный элемент, осуществляющий амплитудно-частотную модуляцию. При этом уровень Te выступает в качестве модулирующего сигнала, а уровень GnRH - в качестве модулированного импульсного сигнала. С увеличением уровня Te импульсы появляются реже, а их амплитуда уменьшается [1 – 4]. Что касается наблюдаемого импульсного процесса секреции LH, то его можно рассматривать как реакцию непрерывной части системы на импульсный сигнал, поступающий от гипоталамуса [1 – 4].

1 А. В. Медведев, А. Н. Чурилов, А. И. Шепелявый, Стохастическая оптимизация в информатике, 2 (2006).
2 A.N. Churilov, A. Medvedev, A.I. Shepeljavyi, Automatica, 45 (2009).
3 A. N. Churilov and A. Medvedev, Automatica, 50 (2014).
4 A.N. Churilov, A. Medvedev, P. Mattsson, IEEE Trans. Automatic Control, 59 (2014).





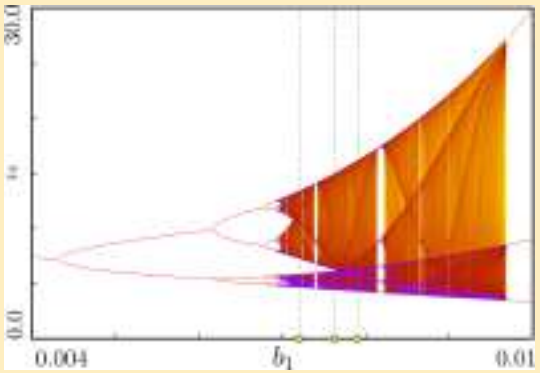


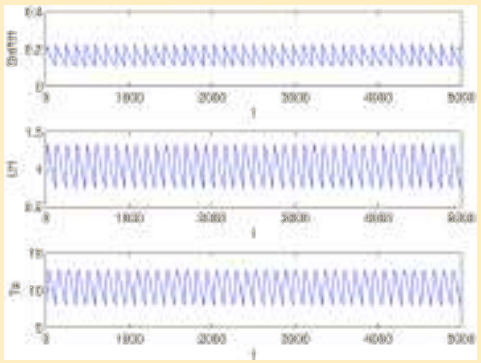
Математическая модель [A.N. Churilov, A. Medvedev, A.I. Shepeljavyi, Automatica, 45 (2009)]:

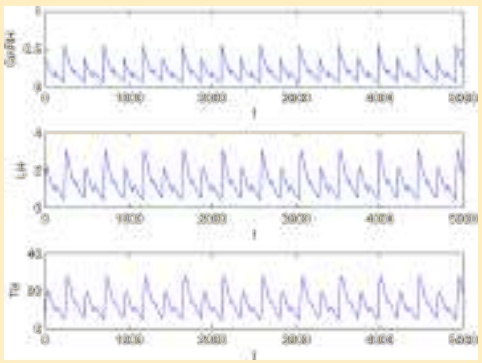
$$\dot{x} = -b1 \cdot x,\ \dot{y} = g_1 \cdot x - b_2 \cdot y,\ \dot{z} = -b_3 \cdot z + g_2 \cdot y,\ x(t_k^+) = x(t_k^-) + F(z(t_k)),$$

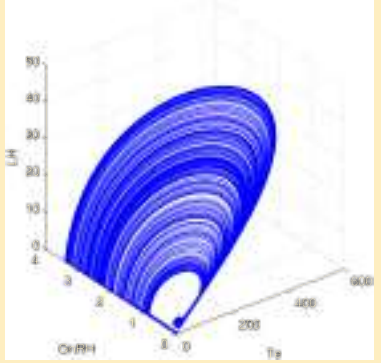
$$t_{k+1} = t_k + \Phi(z(t_k)),\ \Phi(z) = k_1 + k_2 \frac{(z/h)^p}{1 + (z/h)^p},\ F(z) = k_3 + \frac{k_4}{1 + (z/h)^p}.$$

Здесь $x = \mathrm{GnRH}$, $y = \mathrm{LH}$, $z = \mathrm{Te}$ **– концентрации гормонов;** b_1, b_2, b_3, k_1, k_2, k_3, k_4, g_1, g_2, h **и** p **– параметры.**









Переход к хаосу через классический каскад бифуркаций удвоения периода

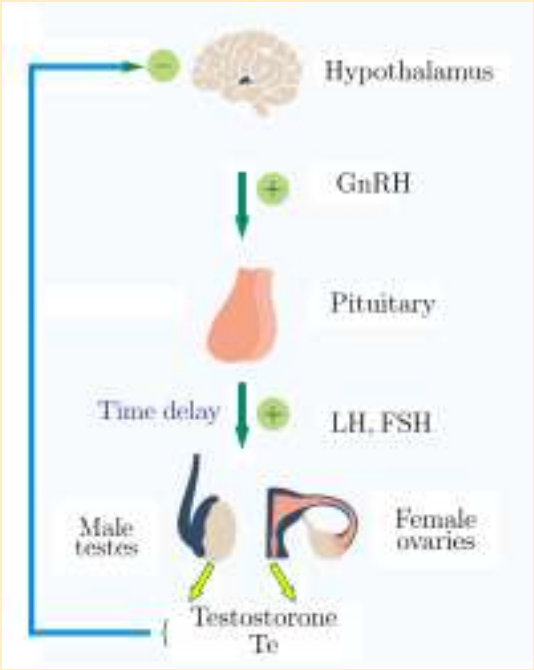
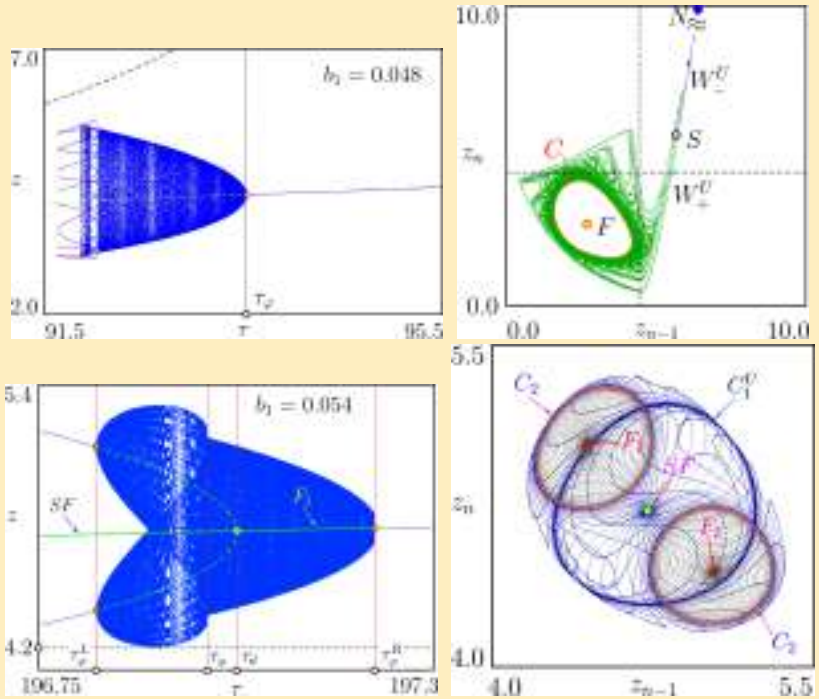


Рис.4.2. Схема гипоталамо-гипофизарно-тестикулярной оси с запаздыванием



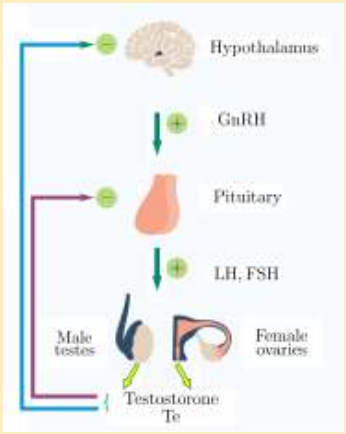
Мультистабильность, квазипериодичность, удвоение замкнутой инвариантной кривой

Математическая модель [A.N. Churilov, A. Medvedev, P. Mattsson, IEEE Trans. Automatic Control, 59 (2014)]:

$$\dot{x} = -b1 \cdot x,\ \dot{y} = g_1 \cdot x - b_2 \cdot y,\ \dot{z} = -b_3 \cdot z + g_2 \cdot y(t-\tau),\ x(t_k^+) = x(t_k^-) + F(z(t_k)),$$

$$t_{k+1} = t_k + \Phi(z(t_k)),\ \Phi(z) = k_1 + k_2 \frac{(z/h)^p}{1+(z/h)^p},\ F(z) = k_3 + \frac{k_4}{1+(z/h)^p}.$$

Здесь τ – временное запаздывание.



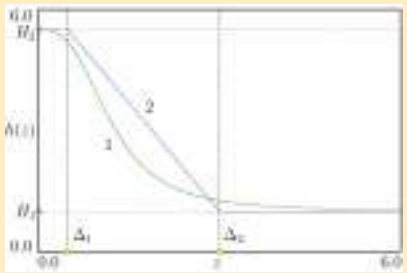
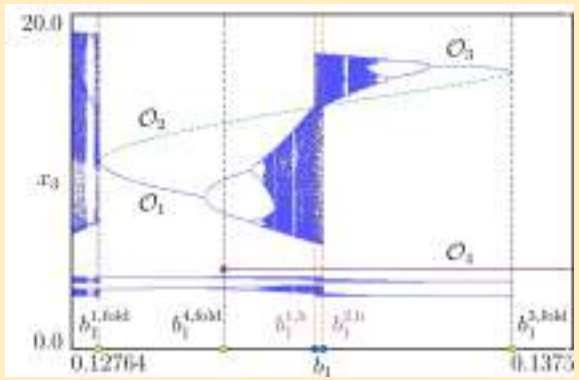
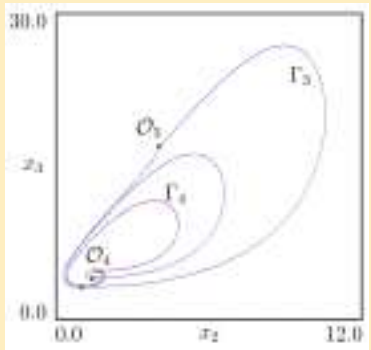
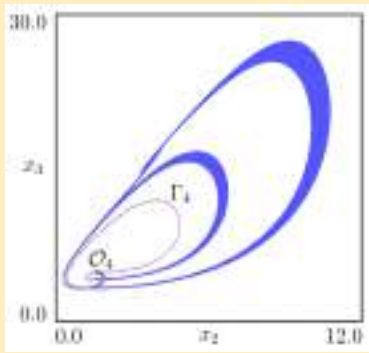
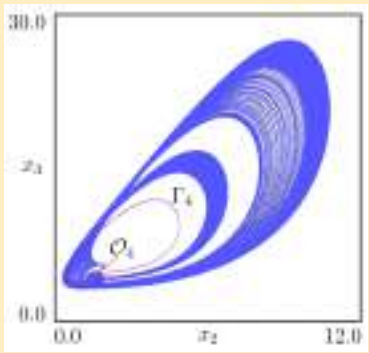


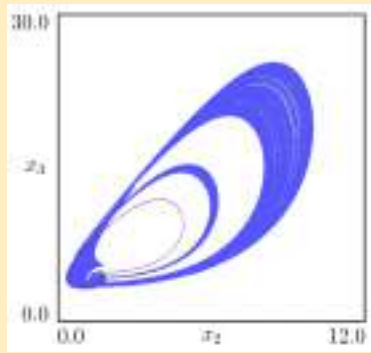
Схема эндокринной оси гипоталамус-гипофиз. 1– функция Хилла $h(z)$, описывающая внутреннюю обратную связь, 2 – кусочно-линейная аппроксимация $h(z)$











Мультистабильность и кризисы хаотических аттракторов (merging или merging crisis, expansion или interior crisis, final или boundary crises bifurcations)

Математическая модель [H. Taghvafard, A. Medvedev, A. Proskurnikov, M. Cao, Math Biosci., (2019)]:

$$\dot{x} = -b_1 \cdot x, \quad \dot{y} = g_1 \cdot x - b_2 \cdot y + h(z), \quad z = g_2 \cdot y - b_3 \cdot z, \; x(t_k^+) = x(t_k^-) + F(z(t_k)),$$

$$t_{k+1} = t_k + \Phi(z(t_k)), \; \Phi(z) = k_1 + k_2 \frac{(z/h)^p}{1 + (z/h)^p}, \; F(z) = k_3 + \frac{k_4}{1 + (z/h)^p},$$

$$h(z) = b + \frac{a}{1 + \kappa \cdot (z/r)^s}, \; b \geqslant 0, \; s > 0, \; r > 0, \; a > 0, \; \kappa > 0.$$

Основные публикации по результатам исследований

1. Zh.T. Zhusubaliyev, A.N. Churilov, A. Medvedev, Bifurcation Phenomena in an Impulsive Model of Non-Basal Testosterone Regulation// Chaos, 22(1), 013121, 2012 (Impact Factor 3.642, квартиль Q1).
2. Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, A.N. Churilov, A. Medvedev, Multistability and Hidden Attractors in an Impulsive Goodwin Oscillator with Time Delay//The European Physical Journal. Special Topics. 224(8), 1519-1539, 2015 (Impact Factor 2.707, квартиль Q2).
3. A.N. Churilov, A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, Impulsive Goodwin Oscillator with Large Delay: Periodic Oscillations, Bistability, and Attractors//Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 21, 171-183, 2016 (Impact Factor 6.163, квартиль Q1).
4. A. N. Churilov, A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, Discrete-Time Mapping for an Impulsive Goodwin Oscillator with Three Delays//International Journal of Bifurcation and Chaos, 27(12), 1750182 (17 pages), 2017 (Impact Factor 2.836, квартиль Q1).
5. A. Medvedev, P. Mattsson, Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, Nonlinear Dynamics and Entrainment in a Continuously Forced Pulse-Modulated Model of Testosterone Regulation//Nonlinear Dynamics, 94, 1165-1181, 2018 (Impact Factor 5.022, квартиль Q1).
6. A. Medvedev, A. V. Proskurnikov, Zh. T. Zhusubaliyev, Mathematical modeling of endocrine regulation subject to circadian rhythm//Annual Reviews in Control, 46, 148-164, 2018 (Impact Factor 6.091, квартиль Q1).
7. Yamalova D., Medvedev A., Zhusubaliyev Zh.T., Bifurcation analysis for non-local design of a hybrid observer for the impulsive Goodwin's oscillator//Nonlinear Dynamics, 100, 1401-1419, 2020 (Impact Factor 5.022, квартиль Q1).
8. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, A. Medvedev, Doubling of a closed invariant curve in an impulsive Goodwin's oscillator with delay// Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 153, 111571, (9 pages), 2021. (Impact Factor 5.944, квартиль Q1)
9. Zh. T. Zhusubaliyev, A.N. Churilov and A. Medvedev, Complex Dynamic Phenomena in a Low-Order Model of Non-Basal Testosterone Regulation// 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, Florida, USA, December 12-15, 879-884 (2011).
10. Zh.T. Zhusubaliyev, A.N. Churilov, A. Medvedev, Complex Dynamics and Chaos in a Scalar Linear Continuous System with Impulsive Feedback// Proc. of the 2012 American Control Conference, Montreal, Canada, 27-29 June, 2419-2424 (2012).
11. A.N. Churilov, A. Medvedev , Zh.T. Zhusubaliyev, State Observer for a First-order Plant Under Intrinsic Pulse-modulated Feedback: a Case Study// Proc. European Control Conference (ECC13), Zurich, Switzerland, July 17-19, 2122-2127, 2013.
12. A.N. Churilov, A. Medvedev , Zh.T. Zhusubaliyev, Periodic Modes and Bistability in an Impulsive Goodwin Oscillator with Large Delay// Proceedings of the 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, August 24-29 2014, Vol. 19, Part 1, 3340-3345.
13. A. Churilov, A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, Delay-Induced Dynamical Phenomena in Impulsive Goodwin's Oscillator: What We Know So Far, Invited Session: Biological Oscillators// 54th IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, Japan, December 15-18, 2015.
14. P. Mattsson, A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, Pulse-modulated Model of Testosterone Regulation Subject to Exogenous Signals// 55th IEEE Conference on Decision and Control, December 12-14, 2016, Las Vegas, NV, USA.
15. A. Medvedev, A. V. Proskurnikov, Zh. T. Zhusubaliyev, Entrainment in Harmonically Forced Continuous and Impulsive Goodwin's Oscillators: A Comparison Study// Proceedings of the European Control Conference (ECC 2018), June 12-15, 2018. Limassol, Cyprus, 2018, (2046 – 2051).
16. Yamalova D., A. Medvedev, Zh. T. Zhusubaliyev, A. V. Proskurnikov, Nonlinear dynamics of a positive hybrid observer for the impulsive Goodwin's oscillator: a design study// Proceedings of the 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC 2019), 11-13 Dec. 2019. Nice, France, France, 2019, (2046 – 2051).

- Сегодня глобальный сдвиг энергетической парадигмы в сторону безуглеродных технологий в связи с экологическими и энергетическими проблемами сделал задачу управления ключевыми преобразователями энергии постоянного тока в энергию переменного тока крайне актуальной.



(а)



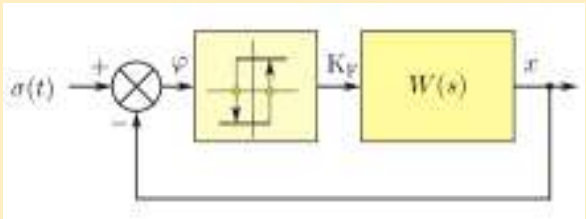
(б)

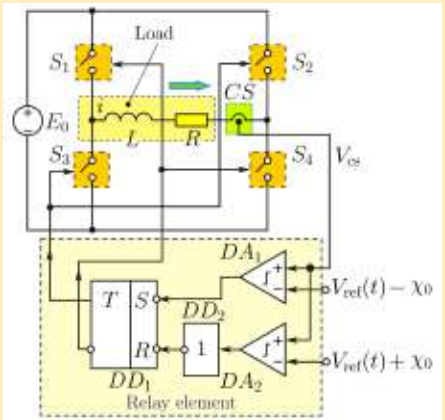


(в)

Рис.1. (а) Гибридная система. (б) Солнечная электростанция. (в) Инверторы

- В последнее время возрос интерес и к методам релейного управления преобразователями. Это обусловлено тем, что такие системы просты в реализации, поскольку для этого требуются только релейные элементы и, как следствие высокая надежность [1].





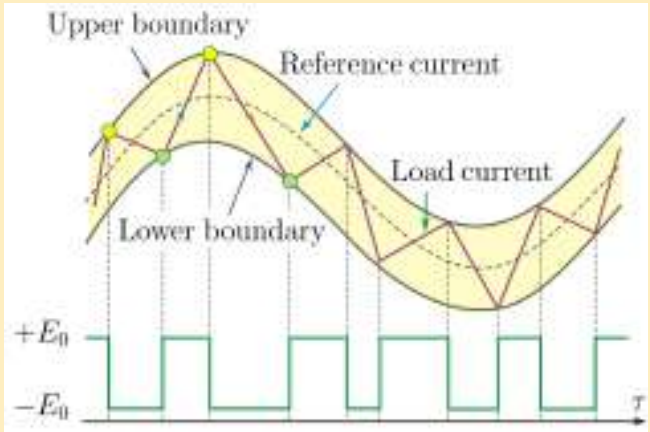


Рис.2. Мостовой инвертор с релейным управлением

[1]. Rashid M.H. Power Electronics Handbook. (4th ed), Butterworth-Heinmann, 2018.









Рис.3. Другие применения

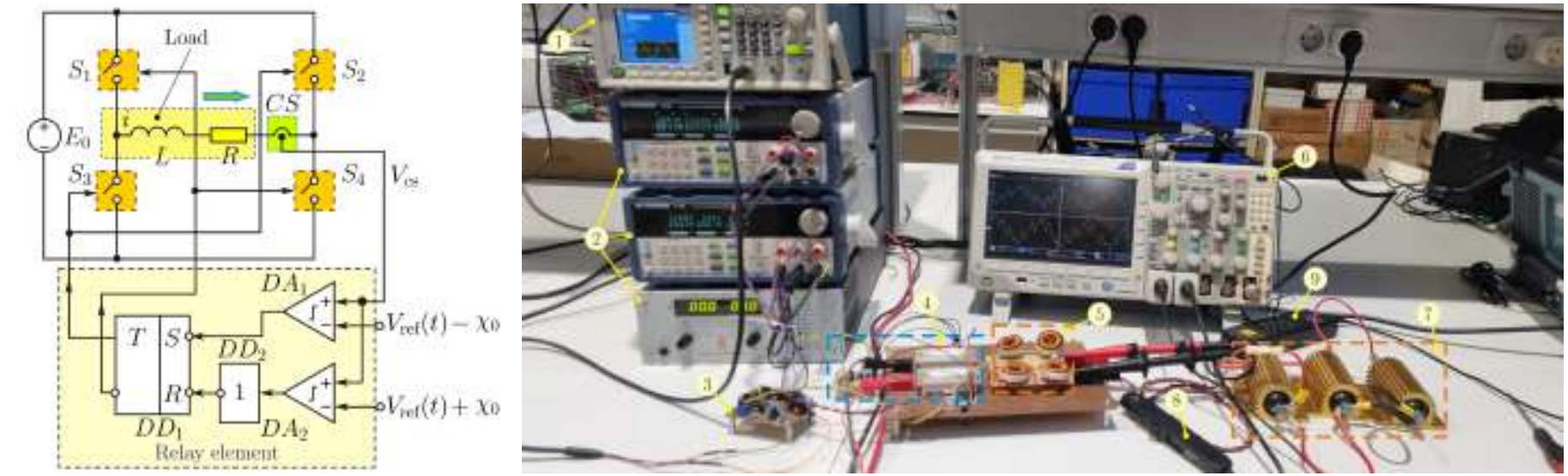


Рис.4. Функциональная схема и экспериментальная установка мостового инвертора с релейным управлением. 1 – генератор опорного синусоидального задающего сигнала $V_{\mathrm{ref}}(t)$; 2 – два программируемых источника питания и источник входного напряжения E_0; 3 – схема системы управления; 4 – два MOSFET модуля, содержащих пару силовых полупроводниковых ключей S_1, S_2 и S_3, S_4; 5 – цифровой осциллограф; 6,7 – четыре катушек индуктивностей L и резистор нагрузки R; 8,9 – токовый пробник и дифференциальный пробник напряжения; CS – датчик тока, V_{cs} выходное напряжение датчика тока ($V_{\mathrm{cs}} = \beta\, i$, где β – чувствительность датчика тока) и χ_0 – гистерезис релейного элемента.

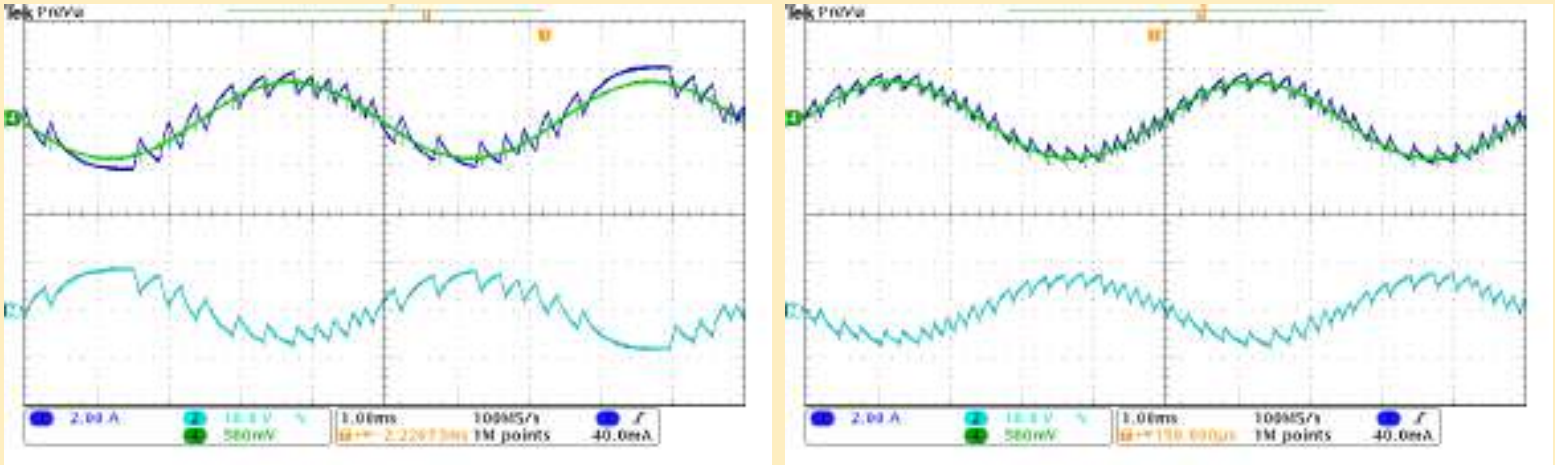
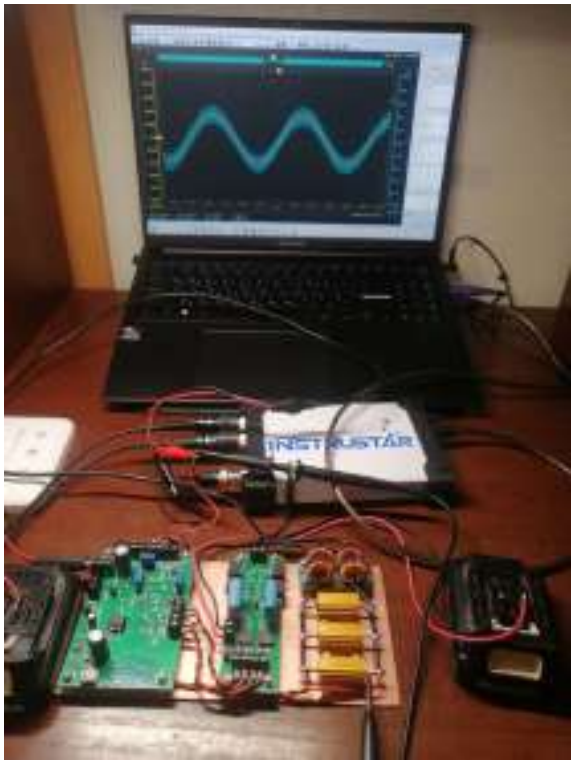
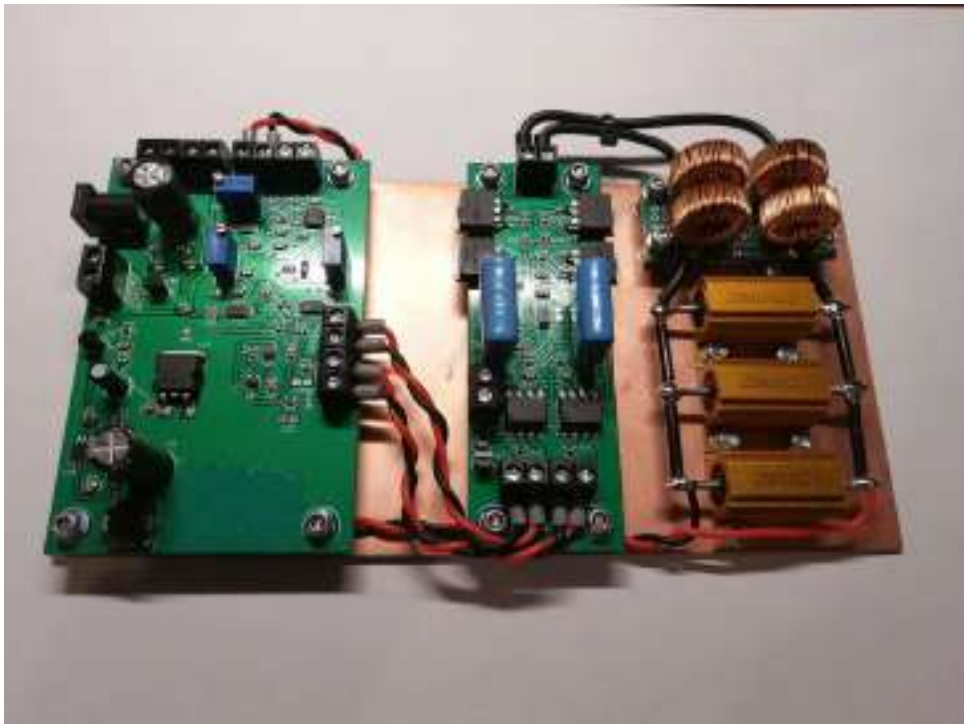
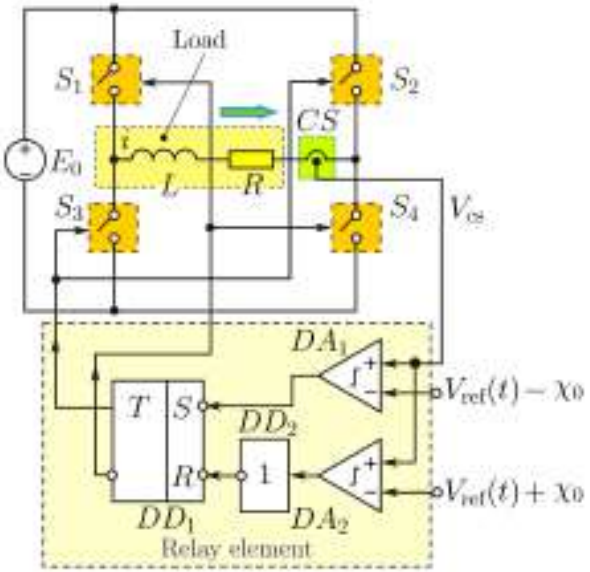
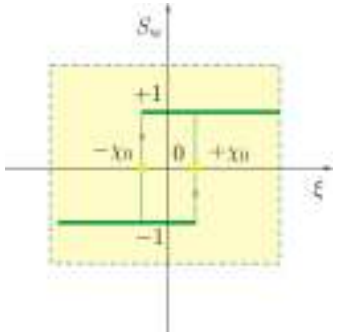


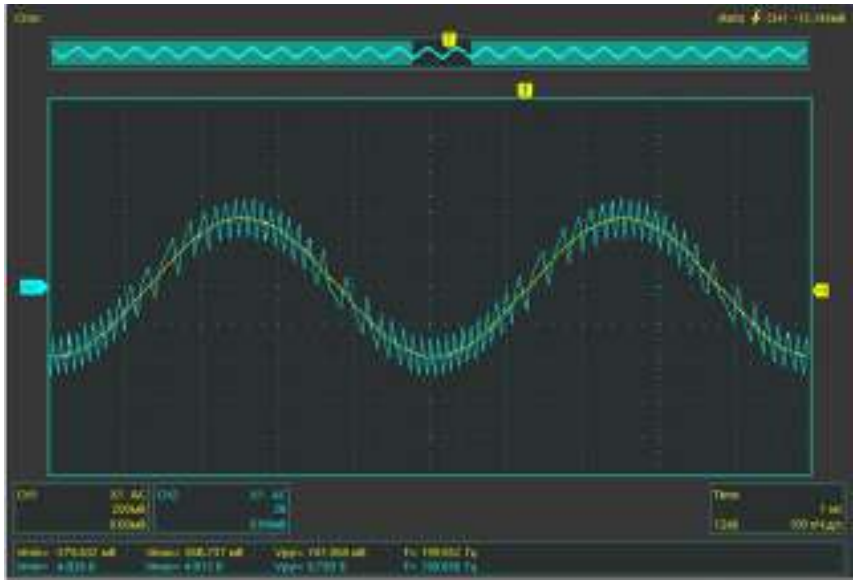
Fig.5. Экспериментальные диаграммы тока нагрузки (синий) и напряжение (светло - зеленый) для асимметричного и симметричного режимов






Load
S_1
S_2
CS
E_0
L
R
S_3
S_4
V_{cs}
DA_1
T
S
DD_2
R
1
DD_1
DA_2
$V_{ref}(t) - \chi_0$
$V_{ref}(t) + \chi_0$
Relay element


S_w
+1
$-\chi_0$
0
$+\chi_0$
ξ
−1



Математическая модель

$$\dot{x} = \lambda \left(x - \mathrm{K_F}(x, \eta) \right), \tag{1}$$

где $\dot{x}$ – производная x по времени τ и коммутационная функция $\mathrm{K_F}(x, \eta)$, определяемая как

$$\mathrm{K_F}(x, \eta) = \begin{cases} +1 \text{ if } & x < q_* \cos\tau - \chi_* \text{ OR } \Big(\eta = +1 \text{ AND } \left(q_* \cos\tau - \chi_* \leqslant x \leqslant q_* \cos\tau + \chi_* \right) \Big), \\ -1 \text{ if } & x > q_* \cos\tau + \chi_* \text{ OR } \Big(\eta = -1 \text{ AND } \left(q_* \cos\tau - \chi_* \leqslant x \leqslant q_* \cos\tau + \chi_* \right) \Big). \end{cases} \tag{2}$$

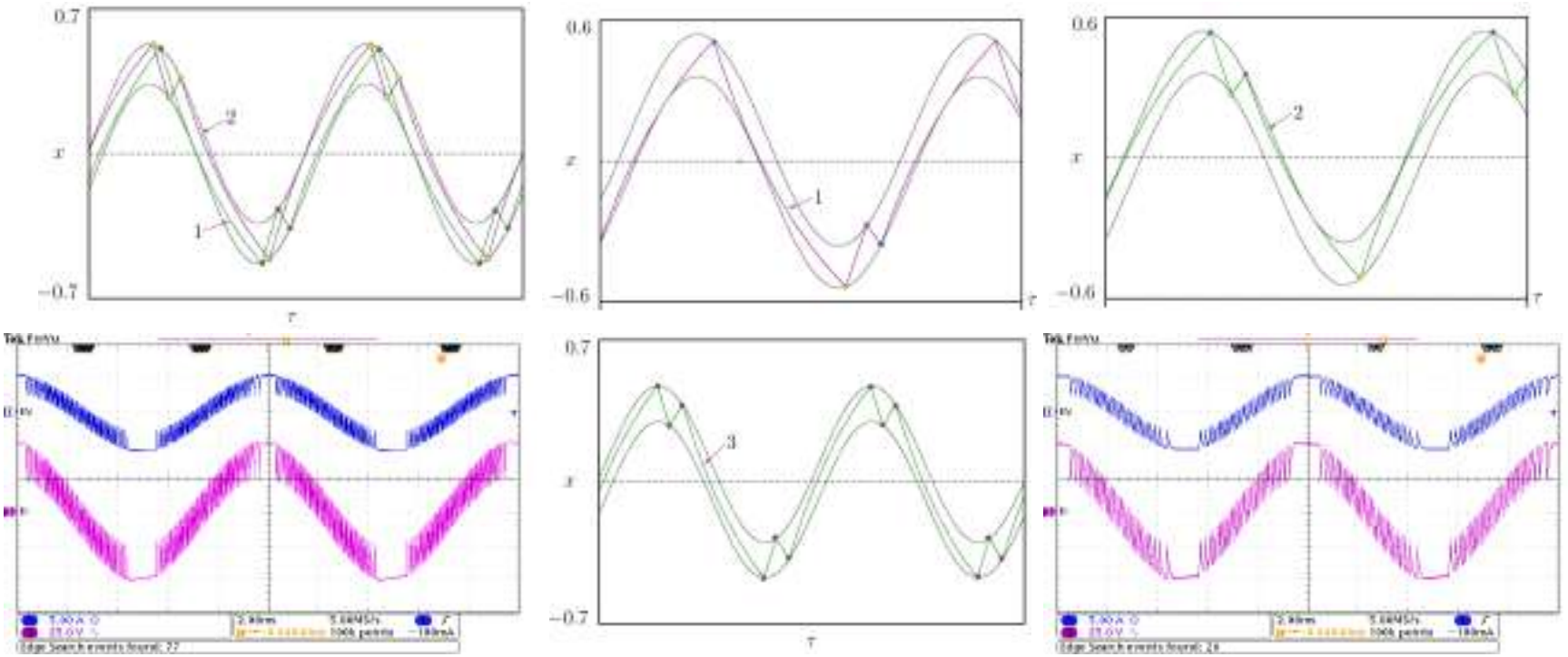


Рис.6. Примеры численных расчетов и экспериментальных диаграмм асимметричных и симметричных решений уравнения движения

Уравнения (1), (2) сводятся к модели с дискретным временем (к отображению первого возвращения Пуанкаре).

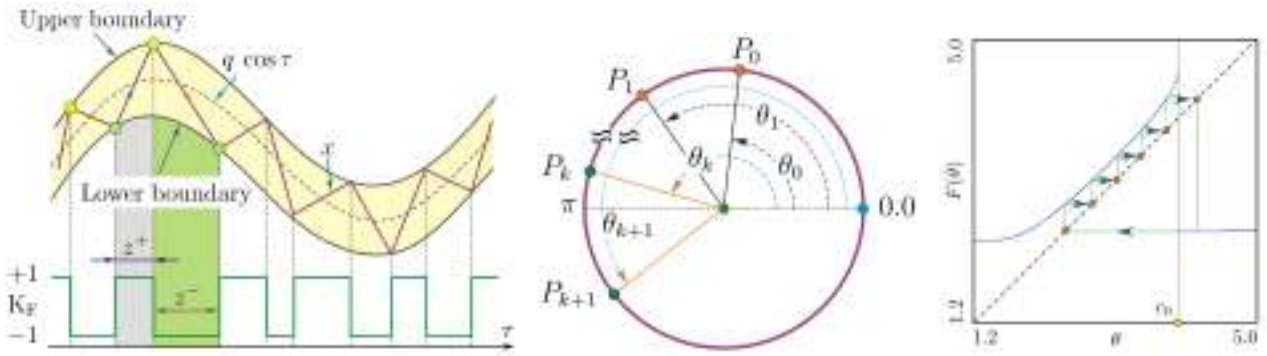


Рис.7.

- $$\theta' \mapsto f^+(\theta), \quad f^+(\theta) = Q^+(\theta) \bmod 2\pi, \quad Q^+(\theta) = \theta + z^+(\theta) \tag{3}$$

- $$\theta \mapsto f^-(\theta'), \quad f^-(\theta') = Q^-(\theta') \bmod 2\pi, \quad Q^-(\theta) = \theta' + z^-(\theta), \quad \theta' = \theta + z^+(\theta). \tag{4}$$

Здесь z^+, z^- ширина положительного и отрицательного импульсов, пределяемые как наименьшие неотрицательные решения уравнений $q_* \cos\left(\theta + z^+\right) + \chi_* = 1 + (q_* \cos\ \theta - \chi_* - 1)\mathrm{e}^{\lambda z^+}$ и $q_* \cos\left(\theta' + z^-\right) - \chi_* = 1 + (q_* \cos\ \theta' + \chi_* + 1)\mathrm{e}^{\lambda z^-}$. Окончательно отображение имеет вид $0 < \theta < 2\pi$:

$$\theta \mapsto F(\theta), \quad F(\theta) = f^+ \circ f^-(\theta). \tag{5}$$

2D бифуркационная диаграмма отображения map (4) на плоскости параметров (Γ, χ) показана на Рис. 8.

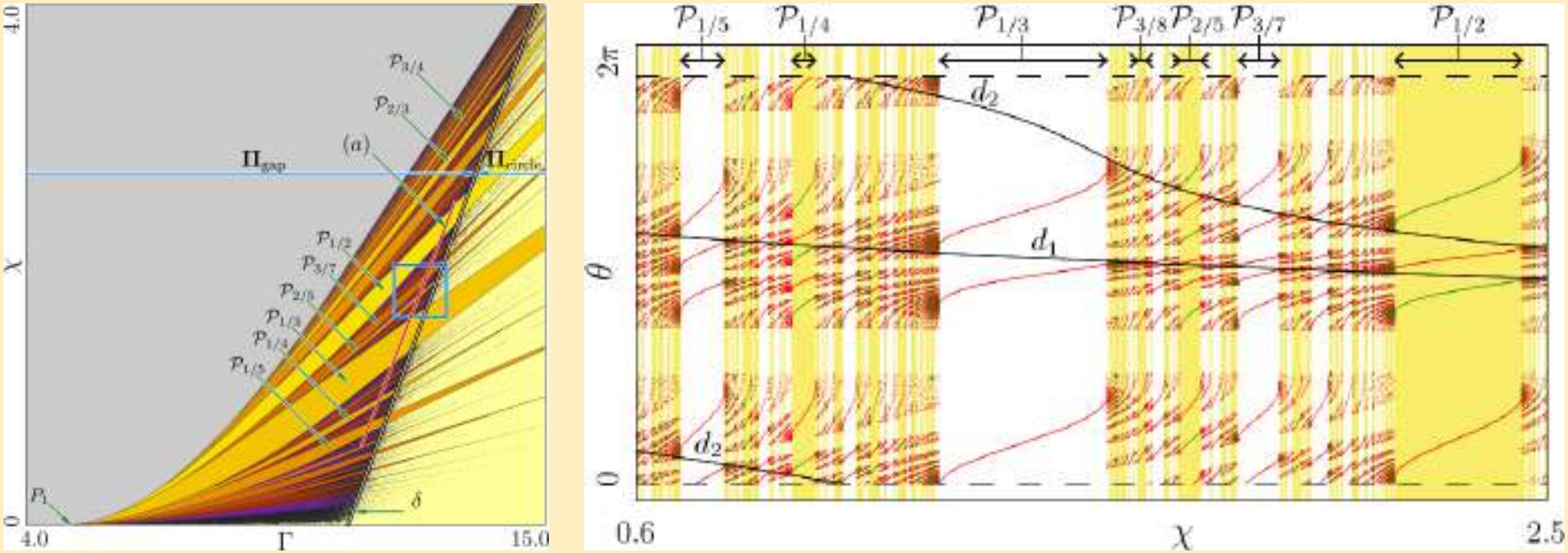


Рис.8. 2D и 1D бифуркационные диаграммы

Property 1. *A regions* $\mathcal{P}_{1/q}$, $q \geqslant 2$, *is associated with a single cycle with rotation number* $1/q$ if q *is odd, and with a pair of cycles with rotation number* $1/q$ *if* q *is even.*

Как показали исследования, отображение (4) имеет две точки разрыва. Обе точки возникают одновременно при переходе границу δ между Π_{circle} и Π_{gap}.
Область параметров (Γ, χ), где функция F непрерывная и монотонно возрастающая и является диффеоморфизмом на окружности: $\Pi_{\text{circle}} = \left\{ (\Gamma, \chi) \mid \left| \frac{\lambda(\Gamma - \chi)}{q\sqrt{1+\lambda^2}} \right| \geqslant 1 \right\}$. Граница Π_{circle} определяется уравнением: $\delta = \left\{ (\Gamma, \chi) \mid \chi = \Gamma + q\sqrt{1+\lambda^2}\,/\lambda \right\}$.

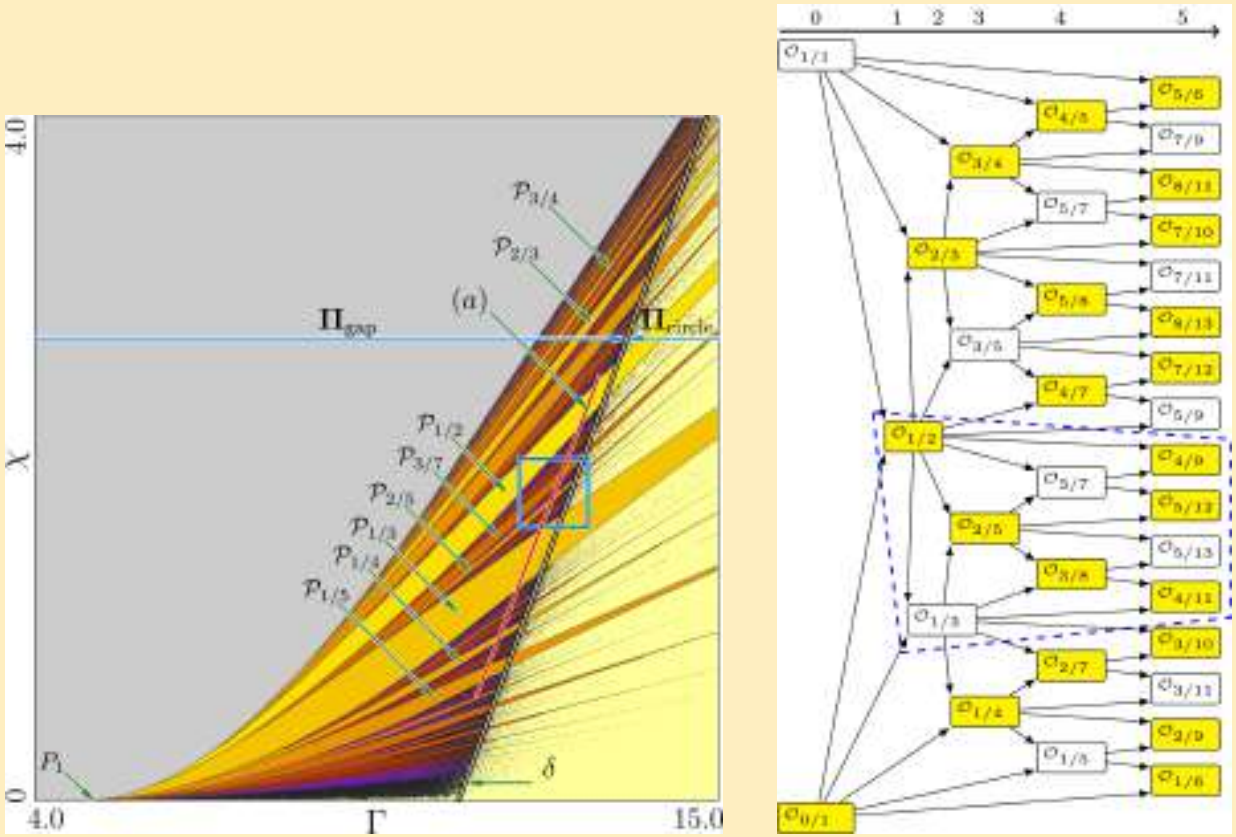


Fig.16.

Property 2: *Suppose, the region $\mathcal{P}_1$ is associated with a single cycle $\mathcal{O}_1$ and the region $\mathcal{P}_2$ is associated with a pair of cycles $\mathcal{O}_2^a$, $\mathcal{O}_2^b$. Then the region $\mathcal{P}_3$ existing between $\mathcal{P}_1$ and $\mathcal{P}_2$ is associated with a pair of cycles $\mathcal{O}_3^a$, $\mathcal{O}_3^b$ with symbolic sequences given by*
$\sigma(\mathcal{O}_3^a) = \sigma(\mathcal{O}_2^a)\sigma(\mathcal{O}_1), \quad \sigma(\mathcal{O}_3^b) = \sigma(\mathcal{O}_1)\sigma(\mathcal{O}_2^b).$

Property 3: *Suppose, the region $\mathcal{P}_1$ is associated with a pair of cycles $\mathcal{O}_1^a$, $\mathcal{O}_1^b$, while the region $\mathcal{P}_2$ is associated with a pair of cycles $\mathcal{O}_2^a$, $\mathcal{O}_2^b$. Then the region $\mathcal{P}_3$ existing between $\mathcal{P}_1$ and $\mathcal{P}_2$ is associated with a single cycle $\mathcal{O}_3$ with the symbolic sequence $\sigma(\mathcal{O}_3) = \sigma(\mathcal{O}_1^a)\sigma(\mathcal{O}_2^b) \equiv \sigma(\mathcal{O}_1^b)\sigma(\mathcal{O}_2^a)$.*

Совместные исследования со Штутгартским университетом (Германия) и Белгородским государственным технологическим университетом им. В.Г. Шухова (Россия)

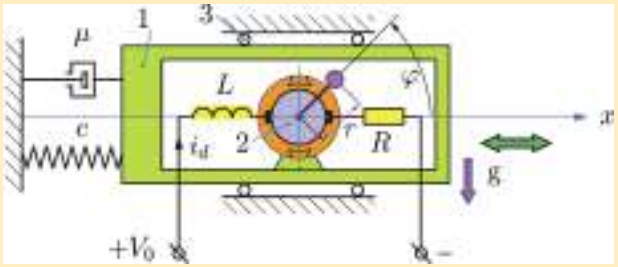


Рис.6.1. Вибрационная машина с дебалансными вибровозбудителем

В большинстве вибрационных машин и устройств, применяемых на практике (добыча и переработка полезных ископаемых, химическая промышленность, металлургия, строительство, приборостроение и т.д.), колебания возбуждаются механическими дебалансными вибровозбудителями. Такие вибровозбудители представляют собой неуравновешенные роторы, приводимые во вращение электродвигателями постоянного или переменного тока. Структурная схема одной из таких систем изображена на рис. 5.1. На платформе 1 массой m_2, связанной с неподвижным основанием линейным упругим элементом жесткости c (пружиной) и демпфирующим элементом с коэффициентом вязкого трения μ, установлен неуравновешенный ротор. Ротор приводится во вращение электродвигателем постоянного тока. Масса дебаланса m_1 сконцентрирована в точке, отстоящей от оси якоря электродвигателя 2 на расстояние r. Горизонтальное движение платформы обеспечивается направляющими 3, например, на подшипниках качения. Уравнения движения этой системы имеют вид (Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994.):

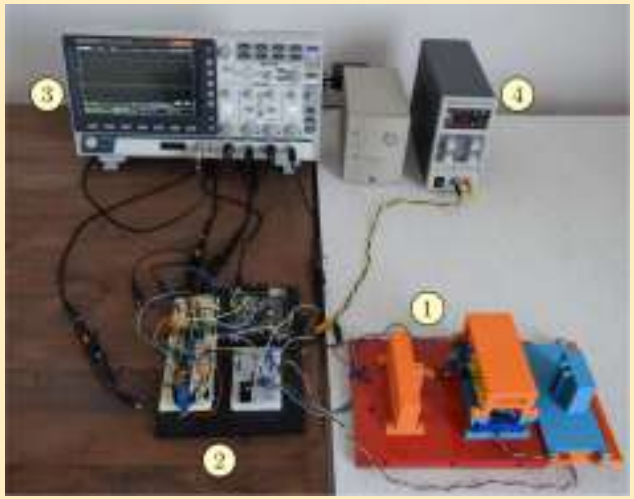
$$(m_1+m_2)\frac{d^2x}{dt^2}+\mu\frac{dx}{dt}+cx=m_1r\left[\frac{d^2\varphi}{dt^2}\sin\varphi+\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\cos\varphi\right],$$

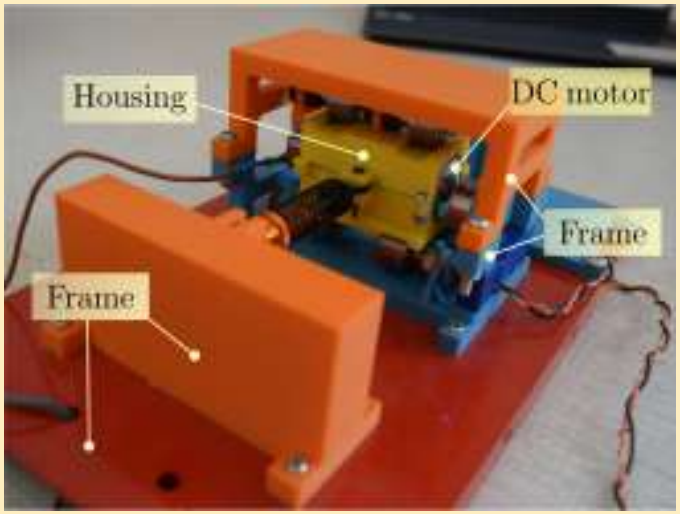
$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2}-m_1r\left(\frac{d^2x}{dt^2}\sin\varphi-\mathrm{g}\cos\varphi\right)=M(i_d),\quad L\frac{di_d}{dt}+Ri_d+C_\omega\frac{d\varphi}{dt}=V_0,$$

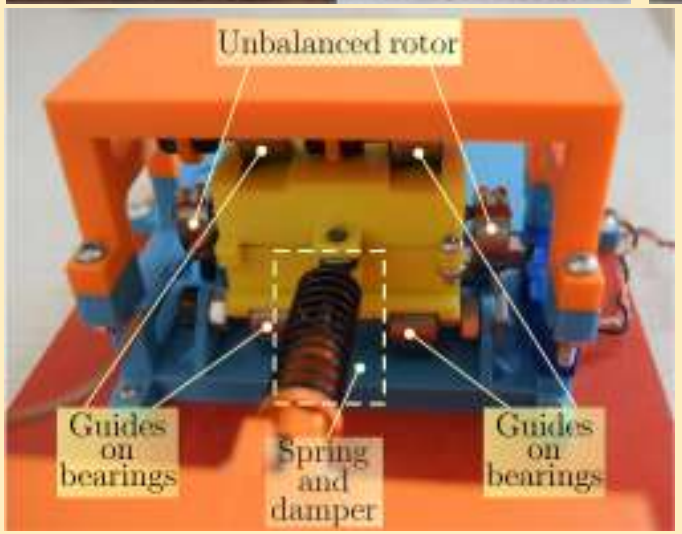
$$M(i_d)=C_E\cdot i_d,\ J=J_d+J_r,\ J_r=m_1r^2.$$

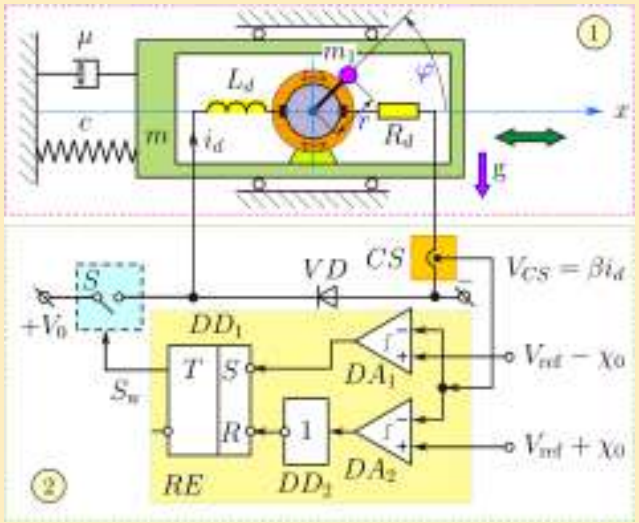
Здесь φ – угол поворота ротора, отсчитываемый от горизонтального направления; x – перемещение платформы; i_d – ток якоря двигателя; m_1, J_r, r – соответственно масса, момент инерции ротора, эксцентриситет; g – ускорение свободного падения; m_1+m_2 – масса системы; J_d – момент инерции вала двигателя; $M(i_d)$ – момент, передаваемый на ротор от электродвигателя; L, R, C_ω, C_E – параметры двигателя; V_0 – напряжение питания.

6.1. Управление колебаниями вибрационной машины









Экспериментальная установка вибрационной машины с релейным управлением. Здесь 1, 2 – вибрационная машина и система управления; 3, 4 – осциллограф и источник питания. Функциональная схема системы

$$(m_1+m_2)\frac{d^2x}{dt^2}+\mu\frac{dx}{dt}+cx=m_1r\left[\frac{d^2\varphi}{dt^2}\sin\varphi+\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\cos\varphi\right],$$

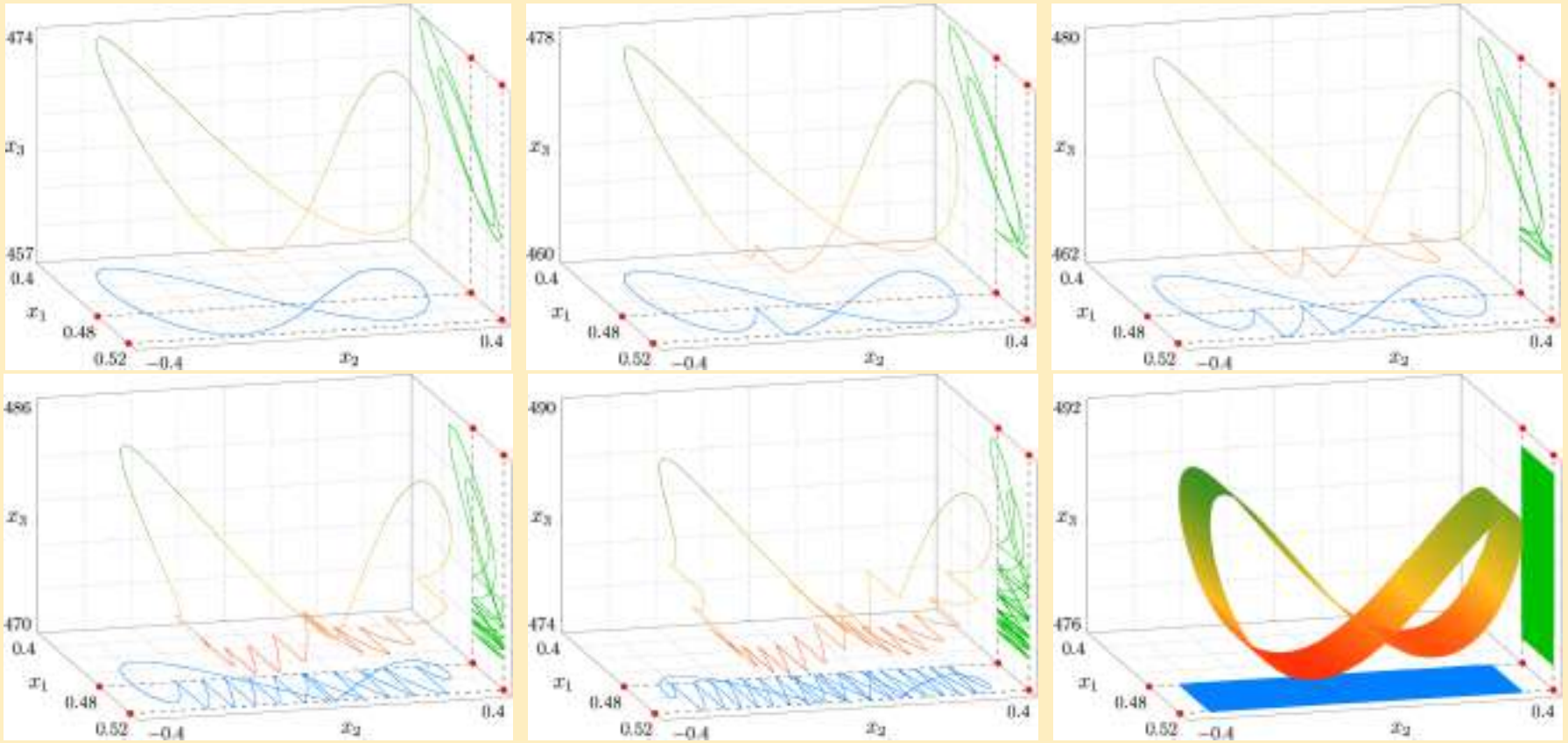
$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2}-m_1r\left(\frac{d^2x}{dt^2}\sin\varphi-\mathrm{g}\cos\varphi\right)=M(i_d),\ L_d\frac{di_d}{dt}+Ri_d+C_\omega\frac{d\varphi}{dt}=V_0\ \mathrm{K_F}(\xi,\eta),$$

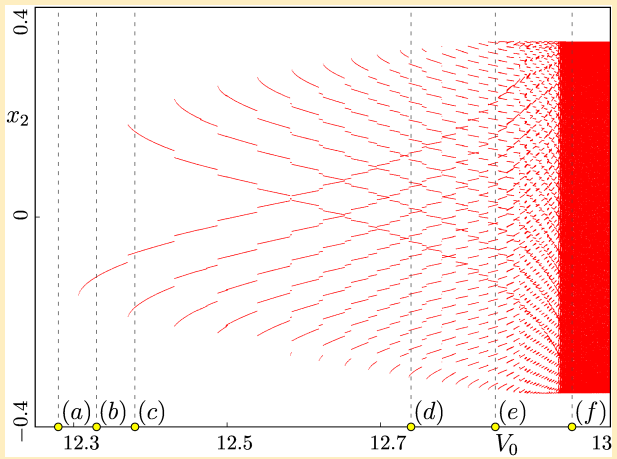
$$M(i_d)=C_E\cdot i_d,\ J=J_d+m_1r^2\ ,\xi=V_{\mathbf{ref}}-\beta i_d,\ L_d=L_d^*+L_{\mathbf{F}},\ R_d=R_d^*+R_{\mathbf{F}}.$$

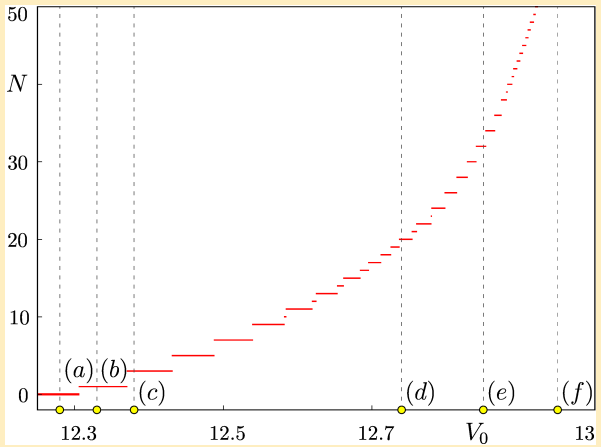
Выходной сигнал S_{w} релейного элемента описывается коммутационной функцией $\mathrm{K_F}(\xi,\eta)$:

$$\mathrm{K_F}(\xi,\eta)=\begin{cases}1, & \text{if } (\xi>+\chi_0) \text{ or } ((-\chi_0\leqslant\xi\leqslant\chi_0) \text{ and } (\eta=1))\\ 0, & \text{if } (\xi<-\chi_0) \text{ or } ((-\chi_0\leqslant\xi\leqslant\chi_0) \text{ and } (\eta=0)).\end{cases}$$

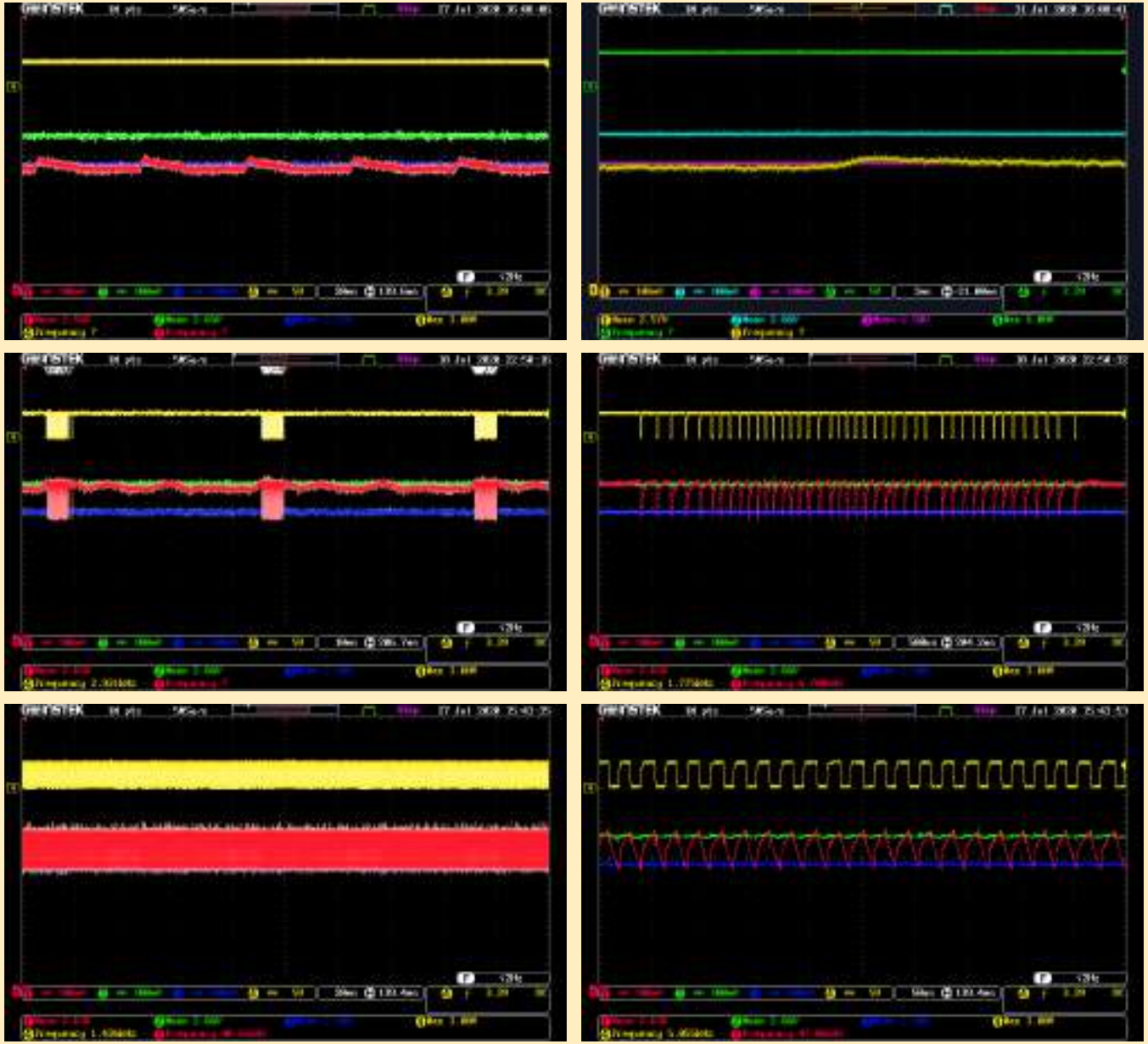
Здесь ξ, χ_0 – входной сигнал и гистерезис релейного элемента; η – предыдущее состояние релейного элемента; $V_{\mathbf{ref}}$ – сигнал задания момента $M(i_d)$ двигателя; β – чувствительность датчика тока якоря; C_E, C_ω – постоянные электрической машины; L_d^*, R_d^* – индуктивность и сопротивление обмотки якоря; $L_{\mathbf{F}}$, $R_{\mathbf{F}}$ – индуктивность и сопротивление сглаживающего фильтра; Если $\mathrm{K_F}=1$, то силовой ключ S замкнут (силовой транзистор открыт) и если $\mathrm{K_F}=0$, то ключ S разомкнут (транзистор закрыт).
Параметры двигателя MAXON RE 25:
$L_d^*=0.238\cdot10^{-3}$ Гн; $R_d=2.18$ Ом; $C_\omega=0.02353$ В·с/ рад.; $C_E=23.5\cdot10^{-3}$ Н· м/А;
$J_d=1.08\cdot10^{-6}$ кг· м^2.
Параметры системы управления и механической части:
$V_{\mathrm{ref}}=0.5$ В; $\beta=1$ В/А; $\chi_0=0.02$ В; $r=0.01$ м; $m_1=0.02$ кг; $m=m_1+m_2=0.2$ кг;
$c=250$ Н/м; $\mu=102.5$ кг/с; $R=R_d+R_{\mathrm{F}}=2.68$ Ом; $L=L_d+L_{\mathrm{F}}=1.238\cdot10^{-3}$ Гн; $V_0>11.8$ В.


474
457
x_3
0.4
x_1
0.48
0.52
−0.4
x_2
0.4
478
460
480
462
486
470
490
474
492
476


0.4
x_2
0
−0.4
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
12.3
12.5
12.7
V_0
13


50
N
30
20
10
0
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
12.3
12.5
12.7
V_0
13

6.4. Результаты экспериментальных исследований динамических режимов на установке



6.5. Сведение 5-мерной модели к динамической системе с двумя масштабами времени

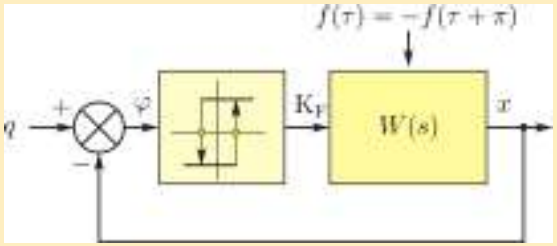
Уравнение движения

$$L\frac{di_d}{dt} + R\,i_d + C_\omega\,\omega(t) = V_0\,\mathrm{K_F}(\xi,\eta), \quad \omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 + \omega_m\cos(\Omega t),$$

$$\omega_0 = \frac{V_0 - V_{\mathrm{ref}}\,R_d/\beta}{C_\omega}, \quad \omega_m = \frac{\sqrt{1+T_d^2\,\Omega^2}\,R_d}{C_\omega^2}\,\Delta M, \quad T_d = \frac{L_d}{R_d},$$

$$\Delta M = 0.5\,C_E\,(V_{\mathrm{ref}} + \chi_0 - \beta\,i_d^*)/\beta, \quad i_d^* = \min_{0\leqslant t\leqslant T} i_d(t).$$

Уравнение движения в безразмерной форме



$$\dot{x} = \lambda\left(x - \mathrm{K_F}(x,\eta) + \gamma_0 + \gamma_m\cos(\tau)\right),$$

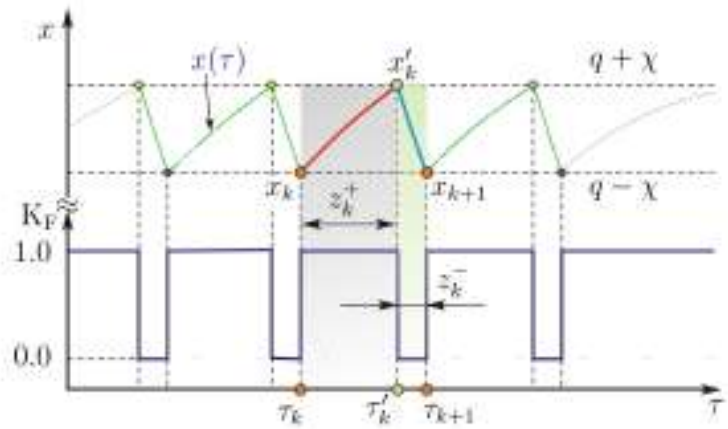
$$\mathrm{K_F}(x,\eta) = \begin{cases} 1, & \text{if} \quad q - x > +\chi \quad \text{or} \quad (|q-x| < \chi \quad \text{and} \quad \eta = 1); \\ 0, & \text{if} \quad q - x < -\chi \quad \text{or} \quad (|q-x| < \chi \quad \text{and} \quad \eta = 0); \end{cases}$$

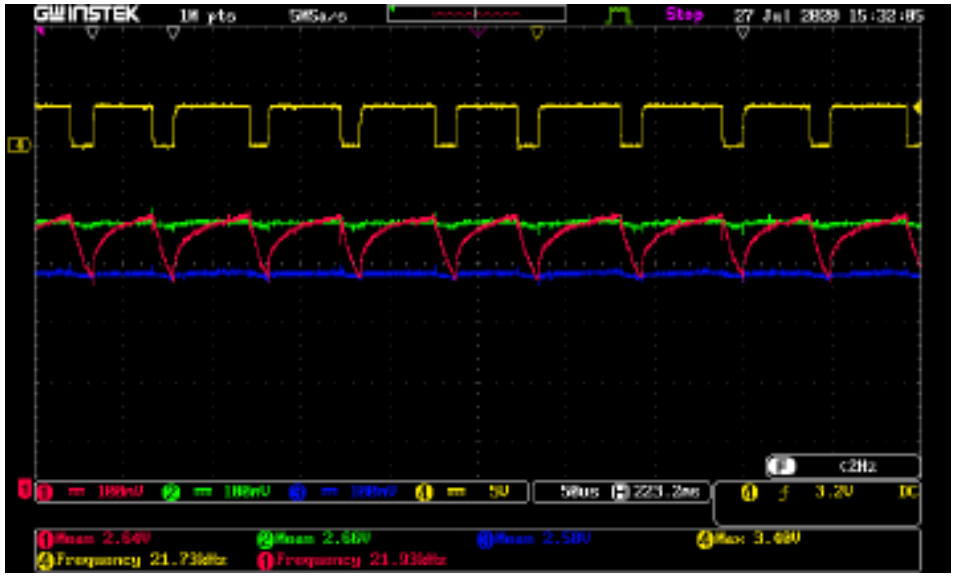
$$\gamma_0 = \frac{C_\omega\omega_0}{V_0}; \quad \gamma_m = \frac{C_\omega\omega_m}{V_0}; \quad \lambda = -\frac{R_d}{L_d\Omega}; \quad q = \frac{V_{\mathbf{ref}}\,R_d}{\beta V_0}, \quad \chi = \frac{R_d\,\chi_0}{\beta V_0}.$$

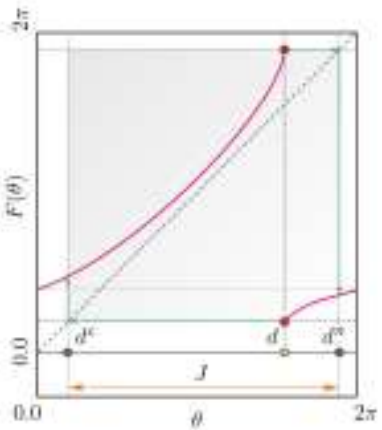
6.6. Построение разрывного отображения окружности

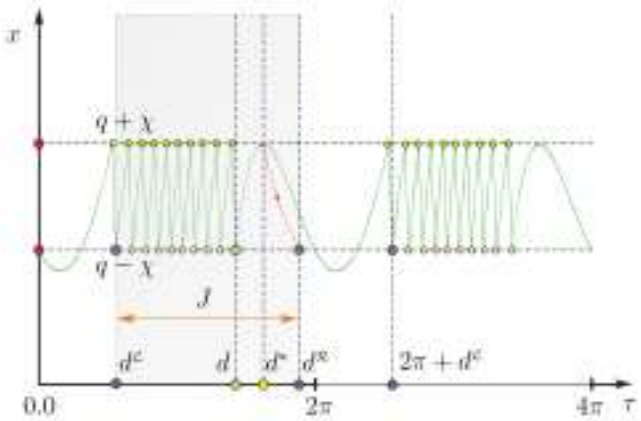
$$\theta_{k+1} = F(\theta_k) = f^- \circ f^+(\theta_k) = \theta_k + z_k^+ + z_k^- \mod 2\pi.$$

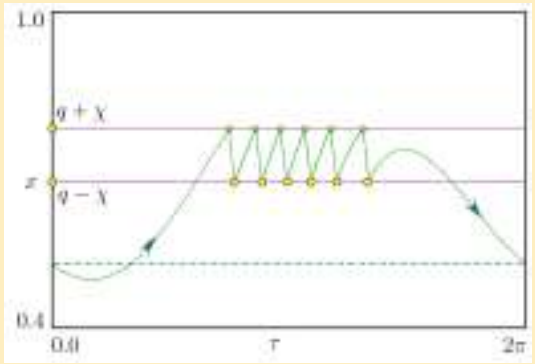
- θ_k – фаза в k-й момент переключения релейного элемента.
- z_k^+ and z_k^- – коэффициенты заполнения импульсов.

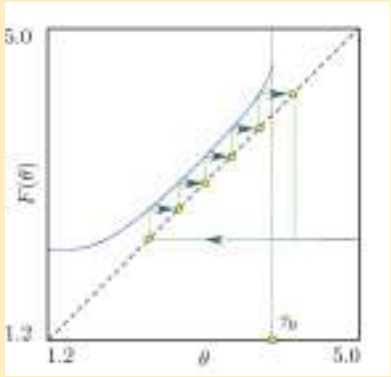


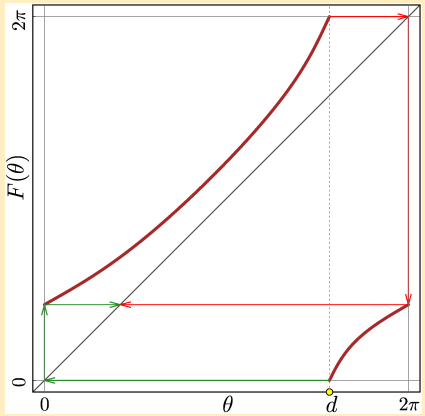


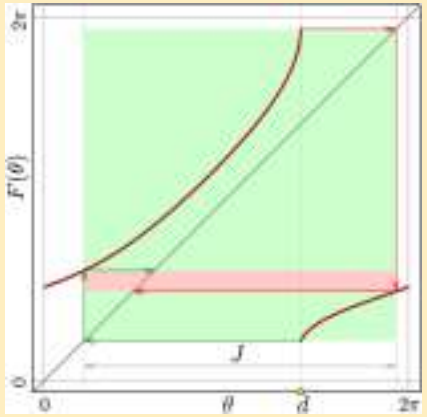


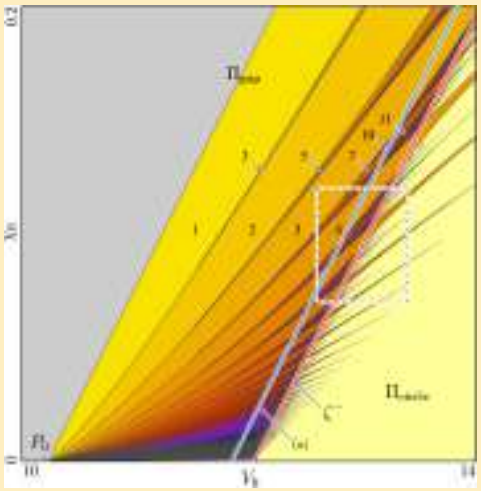


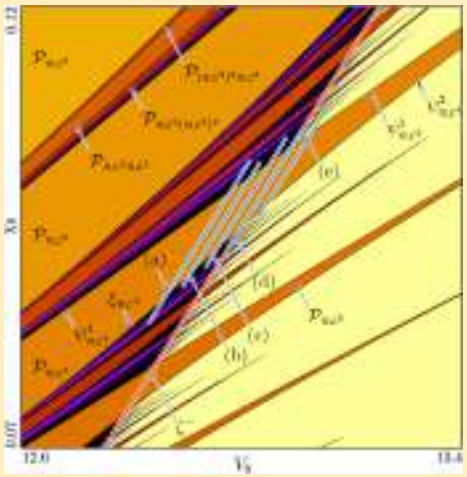

1.0
0.4
0.0
2π
τ
x
$q+\chi$
$q-\chi$

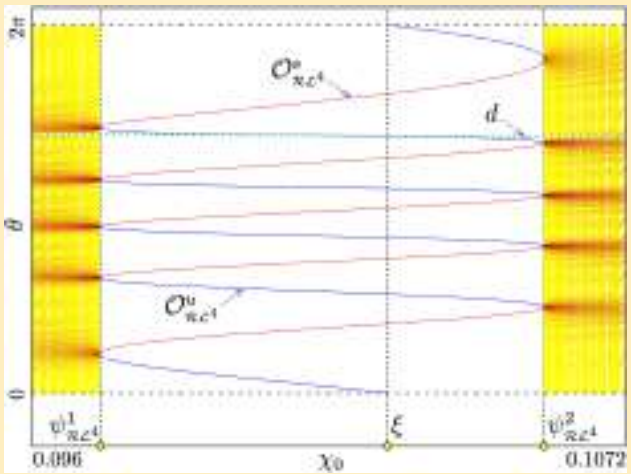

5.0
1.2
$F(\theta)$
θ
γ_0


2π
0
$F(\theta)$
θ
d


2π
0
$F(\theta)$
θ
d
J


Π_{stable}
Π_{stable}
γ^-
χ_0
V_0


χ_0
V_0


2π
0
θ
d
ξ
0.096
0.1072
χ_0

Основные публикации

1. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin,, V. G. Rubanov, D. A. Bushuev, D. V. Titov, and O. O. Yanochkina, Persistence Border Collisions in a Vibrating System Excited by an Unbalanced Motor With a Relay Control. **8th Polyakhov's Reading**: Proceedings of the **International Scientific Conference on Mechanics**// American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings,1959, 2018, (080022-1 – 080022-8).

2. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, V. G. Rubanov c, D. A. Bushuev, Complex dynamics of a vibration machine caused by a relay feedback control// Physica D: Nonlinear Phenomena, 420, 132870 (15 pages),2021. **Impact Factor 2.3, квартиль Q1**

3. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, V. G. Rubanov, D. A. Bushuev, D. V. Titov, and O. O. Yanochkina, Persistence border collisions in a vibration system with a relay control// 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA2018, Tarragona, Spain, September 2-6, 2018, 332 – 334.

4. Zh. T. Zhusubaliyev, V. Avrutin, Border-collisions in a periodically forced self-oscillatory piecewise smooth system with a high number of switching manifolds//15th International Conference Dynamical Systems — Theory and Applications, DSTA, December 2-5, 2019. Lodz, Poland.

7. Внедрение основных результатов НИР

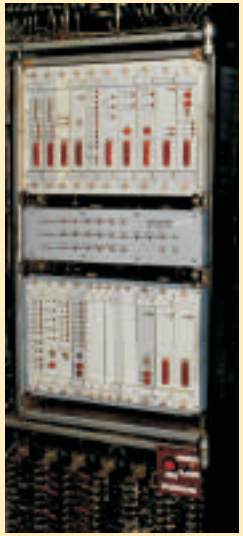




Первый в СССР высокоскоростной электропоезд ЭР200







7.1. Система управления электроприводами первого в СССР высокоскоростного электропоезда ЭР200

Первый опытный электропоезд ЭР200 был построен Рижским вагоностроительным и Рижским электромашиностроительным заводами (РЭЗ и РВЗ) в 1973-1974 г. В 1975 г. после комплексных испытаний передан на Октябрьскую железную дорогу в депо ТЧ-8 (г. Ленинград). С 1977 г. по 1983 г. электропоезд ЭР200 совершал опытные поездки на линии Ленинград – Москва и обратно. Комплект систем управления электроприводами опытного электропоезда ЭР200 был разработан и изготовлен в НИИ автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ) при Томском институте автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Система управления модернизировалась в течение всего периода опытной эксплуатации. Разработка и модернизация систем управления опытного электропоезда ЭР200 выполнялись в 12 отделе НИИ АЭМ научной группой (Колоколов Ю.В., Подлягин В.Н., Букреев В.Г. и др.) под руководством проф. Зайцева А.П. Электропоезд ЭР200 был поставлен на регулярную эксплуатацию с пассажирами на линии Ленинград – Москва в 1984 г. В период с 1984 г. по 1987 г. в НИИ АЭМ выполнены НИР по повышению надежности и технических характеристик системы управления тяговыми электроприводами с учетом реальных условий эксплуатации. Была разработана и реализована принципиально новая концепция управления: применение релейной системы с гистерезисом для управления электроприводами в режимах электродинамического торможения и релейной системы с принудительной синхронизацией в тяговых режимах (А.С. № 1309238 СССР, МКИ Н 02 Р 5/16. Бюл. № 17. 1987; А.С. № 1403320 СССР, МКИ Н 02 Р/175. Бюл. № 22). В 1987 г. на электроприводах всех секций электропоезда ЭР200 (стандартный состав поезда 6 секций, где каждая секция включает 2 вагона) была установлена новая система управления. Авторы разработки: Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В., Коваленко Ю. И. Система управления эксплуатировалась с 1987 г. по 1997 г., экспонировалась на ВДНХ СССР (1986–1987 гг.), отмечена одной золотой, двумя серебряными и двумя бронзовыми медалями.

7.2. Система управления электроприводами первого и второго электропоездов ЭР200

- В соответствии с программой Госкомитета по науке и технике СССР выпуск второго электропоезда ЭР200 был намечен в 1988-1989 гг. Третий электропоезд ЭР200 предполагалось выпустить в 1990 г. Однако эту программу удалось реализовать частично. В 1991 г. РВЗ и РЭЗ успели построить только один состав. Требовалось доработать и изготовить систему управления электроприводами нового электропоезда ЭР200. Электрооборудование первого электропоезда также нуждалось в замене.
  В период с 1994 г. по 1997 г. Курским государственным техническим университетом (ныне Юго-Западный государственный университет) совместно с ОАО «Экспериментальный завод», Холдинговая компания «Ленинец» (г. Санкт-Петербург) разработана система управления электроприводами для первого и второго электропоездов ЭР200 (ЭР200 №1 и ЭР200 №2).
  Система реализована на базе релейной системы с гистерезисом и релейной системы с двойной принудительной синхронизаций (А.С. № 1614966 СССР, В 60 L 15/04. Заяв. 09.02.89. Опубл. 23.12.90, Бюл. № 47; А.С. № 1533904 СССР, МКИ Н02 Р 5/06. Заяв. 14.01.87. Опубл. 15.03.91, Бюл. № 10; А.С. № 1403320 СССР, МКИ Н 02 Р/175. Заяв. 03.07.86. Опубл. 15.06.88, Бюл. № 22).
  Релейная автоматическая система с двойной принудительной синхронизацией позволила подавить недопустимые по условиям безопасности движения хаотические колебания, возникающие в режиме регулирования скорости ослаблением магнитного потока двигателей, улучшить эксплуатационные и точностные характеристики электроприводов. Кроме того, благодаря релейной системе с гистерезисом удалось полностью исключить перерегулирование в тормозных режимах, реализовать электродинамическое торможение тяговых двигателей при максимальной уставке тока якоря (тормозного момента), что повысило надежность и эффективность электрического торможения.
  Комплект систем управления внедрен в промышленную эксплуатацию в составе тягового электороборудования двух электропоездов: ЭР200 №1 и ЭР200 №2. Авторы разработки: Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В., Борейша В. А.
- За период эксплуатации первый советский высокоскоростной электропоезд ЭР200 совершил около 3000 рейсов и перевез более 1,3 млн. пассажиров. 28 февраля 2009 года ЭР200 передал эстафету высокоскоростному электропоезду нового поколения «Сапсан».