



Institut für Physik

Humboldt-Universität zu Berlin

Phone: +49/30/2093 7608

Address: PD Dr. Habil. Michael Zaks  
Gruppe "Theory of Complex Systems  
and Neurophysics",  
Institut für Physik,  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Newtonstr. 15, 12489 Berlin

Fax: +49/30/2093 1842

E-mail: zaks@physik.hu-berlin.de

Date: 31 января 2023 г.

### ОТЗЫВ

зарубежного научного руководителя  
на диссертационную работу Нуртая Албанбая  
**„Исследование характеристик автоколебательных процессов и  
нелинейных явлений в моделях нейронных систем“**,  
представленную на соискание ученой степени доктора философии (PhD)  
по специальности *6D071900 РЭТ – радиотехника, электроника и телекоммуникации*

Диссертация Нуртая Албанбая посвящена рассмотрению нелинейных эффектов в динамических системах, моделирующих взаимодействие клеток коры головного мозга (нейронов); выводы, следующие из качественного анализа уравнений нейронной динамики, дополняются в ней результатами численного интегрирования и сравниваются с характеристиками, полученными в ходе непосредственных экспериментальных измерений в аналоговых электронных контурах, имитирующих нейроны.

Взаимодействие внутри огромного ансамбля нервных клеток реализуется посредством электрических и химических сигналов. Согласно современным воззрениям (computational neuroscience), с точки зрения генерации локальных электрических полей большинство этих клеток является самостоятельными колебательными элементами. Закономерен вопрос о природе механизмов, позволяющих ансамблям связанных осцилляторов генерировать сигналы на различных частотах. Выяснению свойств одного из таких механизмов и посвящена диссертационная работа Нуртая Албанбая.

Первая глава диссертации служит введением; в ней характеризуются основные особенности современных моделей нейронов: соответственно, моделей Ходжкин-Хаксли, Моррис-Лекар, Хиндмарш-Роуз и, пожалуй, наиболее простой, но весьма наглядной модели ФитцХью-Нагумо (*далее ФХН*). В качестве необходимого математического

материала излагаются основные теоремы о существовании и устойчивости как состояний равновесия, так и режимов периодических колебаний, ответвляющихся от равновесий в ходе бифуркаций. Далее характеризуются основные этапы моделирования процессов в ансамблях взаимодействующих нейронов с помощью экспериментов на аналоговых электронных контурах. Анализируются способы получения адекватного воспроизведения нейронной динамики типа ФХН в контурах, состоящих из транзисторов, конденсаторов, сопротивлений и аналоговых интеграторов.

Основные новые результаты, содержащиеся как в теоретически-расчетной (Глава 2), так и в экспериментальной (Глава 3) частях диссертации, относятся к длительности переходных процессов в нейронных ансамблях. В системах, характеризующихся свойством возбудимости (свойство, присущее практически всем нейронным моделям), как правило, имеется состояние равновесия. Формально это состояние является асимптотически устойчивым, но (в отличие от невозбудимых систем) амплитуда возмущений около равновесия необязательно затухает монотонно. В одиночных нейронах затуханию может предшествовать одиночный всплеск мембранного напряжения, а в ансамблях связанных нейронов такие всплески группируются в „бэрсты“ (bursts): пачки всплесков, следующих друг за другом через короткие промежутки времени. Оказалось, что в системе из двух связанных ФХН-нейронов выходу на устойчивое состояние равновесия предшествует последовательность бэрстов, разделенных интервалами относительного покоя. Интересно, что при повторении эксперимента длительность этой последовательности меняется из-за флуктуаций, неизбежно присутствующих в системе. Неизменным остается сам факт выхода на стационарный режим, но число бэрстов, предшествующих монотонной релаксации к равновесию может колебаться на несколько порядков: от единиц и десятков до тысяч и десятков тысяч. При этом по виду каждого конкретного бэрста трудно (если вообще возможно) судить о том, сколько еще времени займет оставшийся переходный процесс, и сколько бэрстов он включит в себя. Поэтому даже при строго зафиксированных значениях всех макроскопических параметров системы нейронов имеет смысл говорить не о фиксированной длительности („времени жизни“) переходного процесса, а о распределении таких времен в ансамбле, созданном многократным повторением натурального, численного или аналого-электронного эксперимента. Оказывается, что в достаточно большом наборе реализаций время жизни переходного режима (а вместе с ним и количество бэрстов) распределено по экспоненциальному закону: вероятность наблюдать до полного затухания к равновесию не менее, чем  $N$  бэрстов пропорциональна  $\exp(-\alpha N)$ , где положительный параметр  $\alpha = 1/\langle N \rangle$  обратен среднему числу бэрстов  $\langle N \rangle$  в одной реализации.

Как показано во 2-й главе, математически механизм возникновения бэрстов в системе ФХН связан с наличием двух различных временных масштабов. Из двух переменных ФХН одна („активатор“), соответствующая электрическому напряжению на мембране нейрона - быстрая; другая же переменная („ингибитор“), соответствующая восстановлению мембраны после прохождения электрического импульса - медленная. Поэтому в фазовом пространстве системы таких нейронов имеется „медленное



многообразии“, вдоль которого движется изображающая точка. Как численно продемонстрировано в диссертации (см. например Рис 2.9) бэрст начинается в том регионе, где медленное многообразие становится неустойчивым: достаточно слабых стохастических флуктуаций для того, чтобы увести систему в область интенсивных быстрых колебаний, образующих бэрст. Сравнение продолжительности переходных процессов при различных значениях управляющих параметров уравнений ФХН показало, что при подходе к бифуркации Андронова-Хопфа экспоненциальный закон распределения времен жизни сохраняется, но его характеристики меняются: количество предшествующих затуханию бэрстов резко нарастает (Рис. 2.7). Аналогичный эффект наблюдался и при добавке к уравнениям стохастической компоненты в виде аддитивного белого шума: чем выше интенсивность этого шума, тем больше число наблюдаемых бэрстов (Рис. 2.6).

На основе вышеописанных результатов численного моделирования, перед диссертантом было поставлено задание: создать установку, позволяющую наблюдать в реальном эксперименте переходные процессы в этой системе, и измерить их основные характеристики. На мой взгляд, Нуртай Албанбай прекрасно справился с этим заданием. Он сконструировал аналоговый электронный контур, моделирующий динамическую систему двух связанных ФХН-нейронов и провел серии детальных измерений динамических характеристик. Результаты этой работы описаны в 3-ей главе диссертации. В результате была убедительно продемонстрирована возможность наблюдения и измерения времени жизни переходных бэрстов в простой системе из всего двух идентичных нейронов, как в отсутствие внешних случайных воздействий (здесь действуют только флуктуации, неизбежно присутствующие в любом реальном электрическом контуре), так и в присутствии шумового сигнала, порожденного специальным генератором. В обоих случаях наличие экспоненциального распределения не вызывает сомнений (Рис. 3.15 и 3.16).

Выполнение исследований по теме диссертации потребовало от Нуртая Албанбая применения современных методов нелинейной динамики и физики, обработки данных, программирования в средах Matlab, Multisim и LabView. За время совместной работы я неоднократно имел возможность убедиться в его настойчивости, изобретательности и тщательности – качествах, необходимых исследователю. Квалифицированный экспериментатор, он хорошо владеет методами численного и теоретического анализа динамических систем.

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на международных конференциях, в том числе в устном докладе, сделанном Нуртаем Албанбаем на международном симпозиуме “**DSTA-2019: 15th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications**” в г.Лодзь (Польша), и вызвали встречный интерес у научной аудитории. Хорошее владение английским языком, позволяет диссертанту широко пользоваться текущей литературой и лично участвовать в научных дискуссиях. Материалы исследований, вошедших в диссертацию, были опубликованы в статьях, напечатанных в международных журналах *Journal of Computational and Nonlinear*

*Dynamics* и *Chaos* .

По моему мнению, диссертационная работа Нуртая Албанбая удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к работам, представленным на соискание степени доктора философии (PhD). По уровню исполнения она безусловно соответствует диссертациям, защищаемым в нашем университете и в других европейских и американских университетах. Диссертант проявил себя квалифицированным специалистом в области электроники, радиотехники и нелинейной физики. Я рекомендую Ученому Совету принять диссертационную работу Нуртая Албанбая к публичной защите на соискание ученой степени доктора философии (PhD) в области радиотехники, электроники и телекоммуникаций, и желаю ее автору дальнейших успехов на его творческом пути.

Доктор наук (ФРГ),

Институт Физики и Институт Математики

Университет им. Гумбольдтов

г. Берлин, Германия

**Humboldt-Universität zu Berlin**  
**Institut für Physik**  
**AG: Stat. Physik und Nichtl. Dynamik**  
**Newtonstraße 15**  
**12489 Berlin**



М.А. Закс

Берлин, 31 января 2023 г.