

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Щапина Дмитрия Сергеевича  
на диссертационную работу

**Большакова Дениса Ивановича**

«Электронное моделирование и исследование динамики нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.5. – «Физическая электроника», 1.3.4. – «Радиофизика»

### **Актуальность темы исследования.**

Диссертационная работа Большакова Д.И. посвящена вопросам теоретического и экспериментального исследования электронной модели нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты. Построение электронных моделей нейронов как часть развития направления нейроморфных технологий представляет собой активно развивающуюся область физической электроники. Создание электронных устройств, воспроизводящих динамику нейронных сетей мозга, представляет существенный интерес для различных прикладных задач, связанных как с медико-биологическими приложениями при создании нейроинтерфейсов, так и в качестве элементов информационно-вычислительных систем нового типа. Теоретическому исследованию динамики нейронов и нейронных сетей посвящено большое количество научных публикаций. В то же время разработке и изучению динамики нейроподобных генераторов посвящено существенно меньше работ, поскольку такие исследования связаны со определенными трудностями. Реализация биологически релевантных генераторных нейронных моделей дополнительно ограничивается свойствами самих электронных (в основном полупроводниковых) компонентов. Таким образом, построение нейроподобных генераторов является творческой нетривиальной задачей связанной с моделированием биохимических и физических процессов протекающих в нейронных системах (в частности, например, в синаптических контактах) с помощью общедоступной современной элементной базы, а также конструирования

новых элементов с помощью методов физической электроники. В связи с указанным актуальность диссертационного исследования не вызывает сомнений.

### **Цель диссертационного исследования.**

Цель диссертационной работы состоит в моделировании колебательных свойств нейронов и малых нейронных ансамблей с помощью построения нейроноподобных генераторов на основе систем фазовой автоподстройки частоты и с последующим анализом их динамики.

### **Содержание диссертации и ее завершенность.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы общим объемом в 121 страницу.

Введение посвящено обоснованию актуальности выбранной тематики, показана научная новизна и практическая значимость представленной работы, проведен обзор трудов по теме исследования, определены основные цели и задачи.

Первая глава диссертации посвящена разработке электронной модели нейроноподобного генератора на базе системы ФАП с полосовым фильтром, исследованию возможных режимов генерации и исследованию динамики данной модели под внешним воздействием. Разработана и изготовлена аппаратная реализация генератора на базе распространенной микросхемы ФАПЧ CD4046 и подобраны параметры RC- и CR-фильтров. Экспериментально показана возможность генерации нейроноподобных колебаний различной сложности: регулярные спайки, регулярные бёрсты различной сложности, в том числе хаотические. Определены области существования основных динамических режимов в сечениях пространства параметров. Исследован отклик нейроноподобного генератора на внешнюю импульсную стимуляцию. Полученные экспериментальные результаты разбиения пространства параметров качественно совпадают с результатами численного моделирования.

Во второй главе методами реконструкции параметров математической модели нейроноподобного генератора по временным рядам показано количественное соответствие разработанной электронной модели и математической модели. Восстановленные по временным рядам параметры модели относительно хорошо соответствуют вычисленным из номиналов и характеристик элементов.

Третья глава диссертации посвящена реализации нейроноподобного генератора на основе системы ФАПЧ с модифицированной цепью управления. Такая модификация позволила дополнительно получить возбудимый режим в данном генераторе. Возбудимый режим принципиально важен в динамике нейронов, поскольку нейроны мозга практически всегда находятся не в автоколебательном, а в возбудимом режиме. Генерация спайка достаточно часто является результатом воздействия на нейрон со стороны других нейронов или внешней стимуляции. В рассмотренной в первой главе модели возбудимый режим был возможен только при одном значении параметров и поэтому был нереализуем экспериментально. Модификация включает в себя изменение фильтра в цепи управления системы ФАП добавлением электронно-управляемого ключа. Экспериментально показано существование необходимого возбудимого режима в модифицированной модели при сохранении известных ранее автоколебательных режимов.

В четвертой главе исследована коллективная динамика двух нейроноподобных генераторов, связанных через мемристивное устройство. Показано, что мемристивное устройство демонстрирует эффект частотной зависимости, связанный с заполнением и опустошением ионных ловушек. Исследован процесс переключения проводимости мемристивного устройства под воздействием нейроноподобных колебаний различной сложности. Продемонстрирована возможность синхронизации двух нейроноподобных генераторов, соединённых однонаправленной связью через мемристивный элемент. Такое взаимодействие делает возможным синхронизацию двух нейронов, что подтверждается совпадением частот колебаний и медленным

изменением разности фаз колебаний. При этом синхронизация двух связанных нейроноподобных генераторов имеет временный характер и сильно зависит от текущего состояния мемристивного элемента.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Диссертационная работа Д.И. Большакова представляет собой логично построенное, успешно выполненное и завершенное научное исследование.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов.**

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием при анализе динамики математических моделей качественно-численных методов теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций, совпадением полученных экспериментальных результатов импульсной активности разработанных электронных моделей автогенераторов с результатами численного моделирования, совпадением изложенных в диссертации результатов с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области, а также научной экспертизой при публикации материалов в рецензируемой научной печати.

### **Научная новизна и значимость диссертационной работы.**

Научная новизна диссертации определяется следующими результатами:

- изучены процессы генерации и синхронизации нейроноподобных колебаний системами фазовой автоподстройки частоты;
- определена степень соответствия электронной аппаратной реализации ее математической модели с помощью разработанного метода реконструкции параметров по временным рядам. В частности, в методе впервые применена комбинация численного дифференцирования и интегрирования для реконструкции вектора состояния, используется подход к реконструкции интегрированных по времени уравнений, вводятся поправки на масштабирование и смещение, имеющее место при измерениях;

- применена модель синаптического контакта на основе мемристивного элемента для связывания генераторов в ансамбль и исследования коллективной динамики.

### **Значимость полученных результатов.**

Теоретическая значимость результатов заключается в том, что показана возможность построения на базе системы фазовой автоподстройки частоты электронного генератора, способного демонстрировать нелинейные колебания различной сложности (спайковые, бёрстовые, хаотические). Обнаружен эффект частотной зависимости переключения проводимости мемристивных устройств, который может ограничивать частотный диапазон их использования. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования нейроподобного генератора на основе ФАПЧ, и модели рассмотренного синаптического контакта на основе мемристивного элемента для построения крупномасштабных искусственных нейронных сетей функционирующих в режиме реального времени. Такие нейронные сети в свою очередь могут применяться в адаптивных робототехнических системах, системах потоковой обработки видео и машинного зрения, системах нейропротезирования и искусственного интеллекта.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных грантами РФФИ, Президента РФ.

### **Основные результаты диссертации.**

Основные результаты, сформулированные в работе, логично вытекают из содержания глав:

1. Разработана и исследована электронная модель нейроподобного генератора на базе системы ФАП качественно воспроизводящая колебания мембранного потенциала нейрона.

2. Проведена реконструкция параметров генератора по его экспериментальным временным рядам. В результате реконструкции достигнуто хорошее соответствие со значениями, рассчитанными исходя из номиналов электронных компонентов в соответствии с математической моделью.
3. Предложена модификация цепи управления автогенератора на основе системы ФАПЧ, позволяющая дополнительно реализовать возбуждимый режим электронного нейрона. Исследована динамика модифицированной модели при внешнем импульсном воздействии. Показано, что переход от возбуждимого режима к колебательному зависит от мощности воздействующего импульса.
4. Установлено, что модель синаптической связи на основе мемристивного элемента имеет нелинейную зависимость проводимости от частоты следования импульсов. Синхронизация двух связанных через синаптический узел нейроноподобных генераторов носит локальный по времени характер и определяется текущим значением проводимости мемристивного элемента.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 28 публикациях, 4 из которых являются статьями в изданиях, рекомендованных ВАК, 24 публикации тезисов докладов на конференциях различного уровня. Апробация результатов работы осуществлялась в научных докладах и сообщениях на всероссийских и международных конференциях.

#### **Замечания по диссертационному исследованию.**

- 1) Во введении диссертации, как и в автореферате, перечисляются группы, которые занимаются исследованием механизмов синаптической пластичности, на мой взгляд, приведенный список из четырех фамилий является далеко не полным.
- 2) В обзоре литературы упоминаются динамические модели нейронов с дискретным временем (стр. 28). И в качестве примера таких моделей указана модель Ижикевича, описываемая системой (6) на стр. 29,

представленной в виде обыкновенных дифференциальных уравнений со сбросом. Здесь, на мой взгляд, присутствует противоречие.

- 3) В главе 2 при исследовании реконструкции параметров модели нейроподобного генератора проведено сравнение полученных параметров со значениями, вычисленными из номиналов элементов. Указано, что результаты реконструкции «показывают относительно небольшую погрешность (от 2% до 52%)...» (стр.67). На мой взгляд, 52% - существенная погрешность. Каков критерий успеха реконструкции?
- 4) В Главе 3 при выводе модифицированной модели нейроподобного генератора, до введения в цепь управления триггера Шмитта, автор получает систему (36) (стр. 81). Стоит отметить, что системы фазовой синхронизации ранее изучались многими авторами, в частности, в статье [В.Н. Белых, В.И. Некоркин, Прикладная математика и механика, т. 42, (1978), с. 808-819], был проведено исследование такой системы качественными методами, изучены бифуркации и показано существование хаотических режимов, однако, ссылки на эту и другие предшествующие работы в диссертации не указаны.
- 5) В сформулированной модели модифицированного генератора (41) (Глава 3, стр. 83) присутствует напряжение  $U_{упр}$ , определяющее переключение триггера Шмитта, то есть цепь управления срабатывает в зависимости от состояния генератора. Однако, в явном виде не указано как это напряжение зависит от переменных модели (41)?
- 6) В главе 4 не хватает схемы соединения двух электронных нейроподобных генераторов через мемристивное устройство, используемое в эксперименте. Также в тексте диссертации не упоминается, каким образом было изготовлено мемристивное устройство или в эксперименте все же было использовано уже готовое мемристивное устройство?
- 7) Достаточно большое количество рисунков в диссертации имеет англоязычные обозначения (например, размерные единицы mV, mS, V, подписи к осям графиков «Time (s)», «Current» «Voltage(V)», «regime», и

