

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Корнеева Ивана Александрович «Колебания и бифуркации в системах с мемристивными элементами», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Актуальность. Мемристор, предложенный Леоном Чуа в 1971 году, оставался абстрактным гипотетическим элементом теории электрических цепей вплоть до 2008 года, когда был обнаружен первый образец на основе тонкого слоя диоксида титана. Последовал целый ряд исследований, посвященных мемристорам, как практических, так и теоретических, и число публикаций по теме мемристивных устройств и систем значительно увеличивается с каждым годом. Интерес научного и инженерного сообществ к мемристорам объясняется возможностью применения таких устройств в адаптивных системах, нейроморфных вычислениях и запоминающих устройствах. В настоящее время исследования и разработка мемристоров и мемристивных устройств проводятся в НИИ и компаниях по всему миру. Создан исследовательский центр «ChuaMemristorCenter» в техническом университете Дрездена, названный в честь Леона Чуа.

Эффект памяти — это ключевое свойство мемристора, зависимость электрического сопротивления от протекшего через мемристор заряда – интеграла от тока, либо зависимости проводимости от прошедшего через мемристор потока поля – интеграла от напряжения. В более общем случае неидеального мемристора сопротивление зависит от некоторого внутреннего состояния, описываемого системой дифференциальных уравнений. Это делает мемристор интересным объектом с позиций нелинейной динамики, однако исследования в этом направлении в настоящий момент далеки от завершения. Уже известно, что включение мемристора в радиофизические системы может приводить к хаотической динамике, возникновению скрытых аттракторов, формированию линии равновесий. Однако опубликованные результаты исследований не дают полного представления о влиянии мемристора на динамические системы. В большей части работ, посвященных исследованиям бифуркаций в таких системах, приведены только результаты численных экспериментов, однако фундаментальное

понимание влияния мемристора на динамику не сформировано. Влияние мемристора на переход к синхронизации и бифуркационные сценарии в системах с мемристорами практически не исследовались аналитическими методами. Такие фундаментальные исследования являются важными для понимания процессов в мемристивных системах и мемристивно связанных сетях. В диссертационной работе Корнеева И.А. детально исследуются бифуркационные механизмы возникновения колебаний на примере простой колебательной системы с включенным мемристором и влияние мемристора на синхронизацию связанных динамических систем. Полученные результаты дополняют опубликованные исследования других авторов.

Основные научные результаты носят фундаментальный характер и являются важными для понимания явлений, происходящих в системах с включенным мемристором. Представленные в диссертации И.А. Корнеева результаты обладают научной новизной:

- Теоретически и с помощью численных методов установлены детали бифуркационных механизмов в классических радиофизических системах, модифицированных введением мемристора.
- С помощью средств аналогового моделирования разработана экспериментальная установка и объяснены причины возникающих проблем при моделировании систем с мемристорами.
- Впервые на примере простой радиофизической системы с мемристором показан эффект фазового захвата периодических колебаний.
- Установлена и теоретически исследована зависимость границ области синхронизации от начального состояния мемристивного элемента в связанных через мемристор генераторах.
- Установлена возможность управления характеристиками бегущих волн возбуждения (формой и периодом колебаний осцилляторов) в ансамбле возбудимых осцилляторов с мемристивными связями.

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений и выводов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, можно считать обоснованными, проработанными на достаточно высоком научно-

исследовательском уровне. Достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием математических методов, методов численного моделирования. Результаты натурного эксперимента подтверждаются результатами компьютерного моделирования. Результаты также прошли апробацию на российских и международных конференциях. Отдельно следует отметить большое количество публикаций в международных журналах с высоким импакт-фактором.

Значимость для науки и практики, полученных автором результатов определяется тем, что показана возможность управления областью синхронизации с помощью мемристора, а именно то, что бифуркационная граница наступления синхронизации зависит от начального состояния мемристора. Такая особенность позволит поддерживать связанные генераторы в режиме синхронизации в практических задачах, где условие синхронизации является важным. Результаты диссертационной работы, полученные с использованием теоретических и численных методов, формируют фундаментальное представление о бифуркациях и синхронизации в мемристивных системах и приносят новый научный вклад в область радиофизики и нелинейной динамики.

Общая оценка диссертационной работы. Диссертационная работа Корнеева И.А. представляет собой логически стройное научное исследование в рамках поставленных задач. В работе получены новые научные результаты, вносящие большой вклад в понимание особенностей поведения такого важного класса динамических систем, как мемристивные системы. Автор правильно подчеркивает негрубость по Андронову состояний, входящих в континуум положений равновесия или континуум периодических инвариантных кривых, поскольку такие особые траектории не изолированы друг от друга. В частности, автор осторожно избегает называть эти инвариантные кривые предельными циклами, а наблюдаемую бифуркацию их рождения не называет бифуркацией Андронова — Хопфа. При этом обосновано отнесение мемристивных генераторов к автоколебательным системам. Особенно интересным и важным, на мой взгляд, является установленный в работе факт зависимости эффектов синхронизации от начальных состояний мемристивных элементов, характерный как для взаимодействующих мемристивных генераторов, так и для мемристивно связанных

систем. Поскольку эффекты синхронизации играют важнейшую роль в коллективной динамике, то поведение ансамблей с мемристивными элементами или связями должно обладать рядом принципиальных особенностей, понимание которых является очень важным, в том числе и для практического применения мемристивных технологий. Автореферат полностью отражает содержание работы.

Замечания по работе. По содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе не делается попыток объяснить механизм влияния начального состояния мемристора связи с конечной памятью на динамику взаимодействующих систем в случае, если колебания являются достаточно сложными. Не совсем понятно, что означает «достаточно сложные». Отвечают ли этому требованию только хаотические колебания или также многочастотные квазипериодические колебания?
2. Обоснованность применения метода медленно меняющихся амплитуд не всегда явно указана в тексте. В частности, в главе 1 в разделе, посвященном квазигармоническому анализу жесткого возбуждения автоколебаний. Уравнение (16) может быть получено только усреднением уравнения (15) по периоду, однако в тексте вывод уравнения (16) не аргументирован. Неявно амплитуды переменных и переменная z считаются медленно меняющимися по сравнению с периодом собственных колебаний, однако в главе это не объяснено.
3. В тексте диссертации присутствуют опечатки, в том числе и в формулах.
4. Некоторые уравнения неудачно отформатированы, что затрудняет их понимание. Например, в уравнениях (21), (22), (34) слагаемые и скобки можно было бы упорядочить.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования. Диссертация Корнеева И.А. является целостной научно-квалификационной работой, в которой получены важные и новые фундаментальные результаты в области радиофизики и нелинейной динамики.

Считаю, что диссертационная работа Корнеева Ивана Александровича удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении

ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Научный сотрудник лаборатории теоретической нелинейной динамики СФ ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН», к.ф.-м.н. (01.04.03 – Радиофизика).

Адрес: 410019, Саратов, ул. Зеленая 38, Телефон: +7 927 229 35 03,

e-mail: kruglovyacheslav@gmail.com

05.10.2021

Круглов Вячеслав Павлович

Подпись к.ф.-м.н. Круглова Вячеслава Павловича удостоверяю:

ученый секретарь СФ ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН»

05.10.2021



Фатеев Денис Васильевич

Саратовский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Адрес: 410019, Саратов, ул. Зеленая 38

Телефон: +7(845) 224 5823

e-mail: grig@soire.renet.ru