

## ОТЗЫВ

официального оппонента Рыскина Никиты Михайловича  
о диссертационной работе Розенталя Романа Марковича «Теоретическое и экспериментальное исследование автомодуляционных режимов генерации в приборах гирорезонансного типа» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03—«Радиофизика»

В диссертации Р.М. Розенталя затрагивается довольно широкий круг вопросов, связанных с различными нестационарными явлениями в генераторах гирорезонансного типа. Отметим, что исследование охватывает целый ряд гироприборов, представляющих наибольший интерес: гиротрон, гиро-ЛОВ, генераторы с внешней запаздывающей обратной связью (ЗОС) на основе гиро-ЛБВ и гироклистронов. Данная тематика является традиционной для нижегородской радиофизической школы и не утратила своей актуальности. Изучение нелинейных явлений в системах типа «электронный поток – электромагнитное поле», включая режимы сложной динамики и хаоса, способствует развитию теории турбулентности в распределенных системах. С практической точки зрения представляют интерес генераторы широкополосных сигналов (это могут быть как хаотические колебания, так и сигналы типа ультракоротких импульсов). При этом, хотя именно гироприборы представляются наиболее перспективными для создания мощных генераторов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, режимы нелинейной динамики для них изучены в существенно меньшей степени, чем, например, для приборов с черенковским механизмом взаимодействия. Таким образом, тема диссертации представляется весьма актуальной и практически значимой для современной радиофизики и СВЧ электроники.

Основное содержание диссертации изложено в трех главах. В первой главе изучается влияние внешних отражений на режимы периодической и хаотической автомодуляции в гиротронах и гиро-ЛОВ. Подробно проанализирована структура спектра продольных мод в резонаторе гиротрона при наличии отражений от специально сконструированного отражающего элемента (диафрагмы) в выходном тракте. Показано, что автомодуляция вызывается одновременным возбуждением соседних продольных мод. Получен ряд интересных результатов, касающихся резонансов между различными модами при изменении положения отражателя. На этой основе предложен способ управления частотой автомодуляции. Приведены результаты экспериментов для гиротронов с отражениями как от выходного окна, так и от брэгговского отражателя, которые достаточно хорошо согласуются с численным моделированием. Также изучен переход к хаосу при взаимодействии в режиме гиро-ЛОВ, что позволяет значительно снизить бифуркационные значения тока пучка.

Вторая глава посвящена исследованию генерации широкополосных сигналов в гиротроне при большом превышении порога генерации. Здесь получен ряд важных результатов. Во-первых, обнаружен режим широкополосной хаотической генерации при перекрытии высоко- и низкочастотного резонансов. Показано, что для моделирования подоб-

ных режимов принципиально необходимо учитывать конечность времени пролета электронов. Далее, обнаружена возможность генерации последовательностей гигантских импульсов (так называемых «волн-убийц», которые привлекли большой интерес в гидродинамике и лазерной физике, однако в СВЧ электронике изучаются впервые). Показано, что для адекватного описания подобных явлений необходимо, наряду с конечностью времени пролета, учитывать изменение продольной скорости электронов, и описан физический механизм формирования гигантского импульса. Основными моментами этого механизма являются: образование начального импульса на встречной волне; его последующее отражение и преобразование в попутную волну; усиление и компрессия импульса за счет аккумуляции энергии все новых и новых фракций пучка при «проскальзывании» импульса относительно пучка; преобразование продольной энергии в поперечную за счет возникновения сильного поперечного ВЧ магнитного поля.

Третья глава содержит результаты исследований гирогенераторов на основе усилителей с внешней ЗОС. Развита нестационарная самосогласованная модель гироклистрон-генератора, для которой исследованы сценарии перехода к хаосу. В том числе, обнаружены режимы гиперхаоса, которые характеризуются двумя положительными ляпуновскими показателями. Далее исследуются генераторы с ЗОС на основе гиро-ЛБВ с винтовой гофрировкой, у которых ширина спектра излучения значительно больше, чем у гироклистрона. Предложена оригинальная конструкция генератора, содержащая две гиро-ЛБВ, одна из которых работает в режиме усиления, а вторая выполняет функцию нелинейного поглотителя. В нем реализуется сильная зависимость фазы от амплитуды входного сигнала. В результате происходит переход амплитудной модуляции в фазовую, что приводит к расширению спектра и повышению его однородности.

Все перечисленные выше основные результаты диссертации являются оригинальными и представляют научный интерес. Достоинством работы является сочетание разнообразных методов исследования: наряду с традиционным в теории гироприборов моделированием в рамках усредненных уравнений, широко используется 3-D моделирование при помощи РС-кода КАРАТ. Ряд результатов подтвержден экспериментально. Все это характеризует автора диссертации как высококвалифицированного исследователя—радиофизика.

Тем не менее, по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний.

1) Рассматриваемые в диссертации модели относятся к классу распределенных систем, и анализируется сложная пространственно-временная динамика в таких системах. При этом, однако, автор в основном ограничивается анализом временных реализаций выходного сигнала (за исключением отдельных случаев, например, когда проводится анализ собственных мод резонатора с внешним отражателем, хотя там речь идет о линейной задаче). По моему опыту, для более глубокого понимания физических процессов целесообразно также анализировать пространственные распределения полей, гармоник тока и т.д. Тем более, что в диссертации подчеркивается, что необходимо использовать модели с нефиксированной структурой поля. Представляется, что такие обнаруженные явления, как,

например, переход к развитому хаосу (гиперхаосу) должны сопровождаться какой-то качественной перестройкой пространственно-временных структур.

2) В первой главе исследован ряд гиротронов с внешними отражениями (включая работу в режиме гиро-ЛЮВ). Они характеризуются достаточно сильно различающимися параметрами. При этом остается неясным, есть ли какая-то специфика у того или иного прибора с точки зрения режимов нелинейной динамики. Желательно было бы видеть сопоставление результатов, полученных для различных приборов, и какие-либо обобщающие выводы. Например, рассматриваются отражения от выходного окна, от диафрагмы, от брэгговского отражателя. Можно ли отдать предпочтение той или иной конструкции?

3) Во второй главе получены несомненно интересные и научно значимые результаты, касающиеся особенностей хаотической динамики в гиротроне при одновременном возбуждении низко- и высокочастотного резонансов. Однако есть ряд интересных моментов, которые остаются не выясненными до конца. Например, имеется предельное значение расстройки (видимо, в области отрицательных значений), при котором происходит срыв высокочастотного резонанса, что ограничивает ширину спектра. Почему – не поясняется. Не объясняется немонотонный характер зависимости ширины спектра от тока пучка (рис. 2.6). Вообще говоря, представляется, что если режимы развитого хаоса обязаны своим появлением перекрытию двух резонансов, то это должно как-то отражаться на структуре аттрактора, и интересно было бы проследить механизм его возникновения.

4) В главе 3 также имеются некоторые неясности при обсуждении механизмов автомодуляции. Например, на стр. 118 при обсуждении рис. 3.16 утверждается, что «сценарий возникновения автомодуляции в данном случае носит смешанный характер, включая в себя как частотный, так и амплитудный механизмы». Что под этим понимается – неясно. Судя по рисунку, можно предположить, что в действительности наблюдается очень сложная последовательность смены динамических режимов, которую следовало бы изучить подробнее. Добавлю, что, на мой взгляд, наиболее четко различие между амплитудным и частотным механизмами было сформулировано в работах 1990-х годов, выполненных Ю.П. Блюхом и соавторами, в которых развивался метод функционального отображения применительно к различным электронным генераторам с ЗОС. Следовало бы сослаться на эти работы.

5) В диссертации встречаются отдельные неудачные с моей точки зрения термины. Поскольку рассматриваются полностью детерминированные математические модели, лучше говорить не о стохастических, а о хаотических колебаниях, и не употреблять такие термины, как «флуктуирующая задержка». Встречаются жаргонные выражения, например, «контрольные счета» (стр. 120), имеются отдельные опечатки, например, «должно быть учтано изменение продольного импульса электронов» (стр. 86) или «возникающее магнитное поле приводит в трансформации продольного импульса части в поперечный» (стр. 90).

Однако отмеченные недостатки не являются принципиальными и ни в коей мере не снижают общей положительной оценки диссертации.

