

Посвящается В.Я. Кислову,
Учёному и Организатору

**ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ-ШУМА
В ИРЭ АН СССР 1962–1967 годов –
НАЧАЛО НОВОГО НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ***
Лекция

Е.А. Мясин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал

Статья посвящена **истории создания в 1967 году шумотрона** – генератора хаотических колебаний, содержащего две лампы бегущей волны, последовательно замкнутых в кольцо. Показано, что создание шумотрона является результатом развития работ по генерации СВЧ-шума в системах «электронно-ионная плазма–электронный поток», проводимых в лаборатории В.Я. Кислова. Начало этим работам положили теоретических исследования Кислова (1956–1960 гг.) по взаимодействию электронного потока с электронно-ионной плазмой, проведенных В.Я. Кисловым. Экспериментальная проверка результатов его теории привела (1962–1963 гг.) к обнаружению генерации СВЧ-шума в плазменной лампе обратной волны. Утверждается, что исследование работы шумотрона **впервые в явном виде** показало причину возникновения режима генерации СВЧ-шума в детерминированной системе без плазмы и независимо от собственных шумов электронного потока. В самой конструкции шумотрона эта причина выделена в виде лампы бегущей волны как нелинейного элемента, то есть причиной этого режима является **нелинейность** системы. Дается краткая справка о развитии работ по шумотронной тематике в лаборатории В.Я. Кислова в течение последующих лет, включая 1980 год. На основе проведенного рассмотрения делается вывод о том, что результаты исследований в ИРЭ АН СССР положили начало новому научному направлению – исследованию нелинейной хаотической динамики автоколебательных систем.

Ключевые слова: Электронно-ионная плазма, электронный поток, усиление, ЛБВ-усилитель, ЛБВ-нелинейный элемент, шумотрон.

Прежде, чем приступить к письменному изложению лекции, прочитанной мною на X Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур», я хочу отметить, что предложение написать статью по материалам лекции было для меня неожиданным. Никогда мне не приходилось писать статью в научный журнал на историческую тему, хотя и связанную с серьезными научными результатами.

*Статья написана по материалам доклада на X Международной школе «Хаотические автоколебания и образования структур», 7–12 октября 2013 г. Саратов, Россия.

Я сравниваю эту мою статью-лекцию с рассказом о том, как на И. Ньютона упало яблоко с яблони, под которой он отдыхал, и вот к нему пришло озарение в виде его известных законов, которыми все пользуются, забыв, естественно, о яблоке. И, вообще, кому это яблоко интересно? Мало того, я взялся рассказать, как это яблоко созревало прежде, чем упасть, так как о результате этого падения – шумотроне, кто только не писал. Но, дело в том, что рассказ о созревании яблока в нашем случае – это рассказ о приоритете открытия нового научного направления. Поэтому я и согласился на столь необычное предприятие. И ещё, я буду излагать материал лекции в том виде, как она была прочитана мною устно, от первого лица, Придётся рассказывать и о себе, поскольку я был непосредственным участником исследований, вынесенных в название, и одним из авторов заявки на шумотрон, и прошу не подозревать меня в нескромности. Итак, я начинаю.

Введение

Во-первых, я хотел бы поблагодарить Дмитрия Ивановича Трубецкого за предложение подготовить Лекцию с любым названием, касающемся истории появления первого генератора шума на основе нелинейной хаотизации колебаний в ЛБВ с задержанной обратной связью – «шумотроне», и предложить её вниманию столь квалифицированной аудитории в вопросе нелинейной динамики различных физических систем. Поскольку сам факт появления шумотрона не мог бы состояться в отсутствие соответствующей предыдущей истории исследований, проводимых в лаборатории Владимира Яковлевича Кислова, то и название Лекции, связано с этим фактом. И посвящается она В.Я. Кислову – Учёному и Организатору.

Во-вторых, я принял это предложение после длительного размышления и вот почему. Основные события, о которых я собираюсь рассказать, произошли в период с 1959 по 1970 год. Как первый аспирант В.Я. Кислова я защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование нового способа генерирования шумовых СВЧ-колебаний в системах с запаздывающей флюктуирующей обратной связью» 30 мая 1970 года. Думаю, что это была первая успешная защита по нелинейной хаотизации колебаний в динамической системе. За ней последовал нескончаемый ряд защит как кандидатских, так и докторских диссертаций по разработке экспериментальных систем и теоретических моделей этого явления, причём не только в электронных системах с задержкой и не только в ИРЭ АН СССР. Работа в этом направлении продолжается и сегодня, о чём свидетельствует эта конференция. Я искренне этому рад.

Но в конце 1980 года я круто поменял область своей деятельности, став заведующим лабораторией, в которой велись исследования генератора монохроматических колебаний с открытым резонатором – оротрона с двухрядной периодической структурой в 3 см диапазоне волн. Я продолжаю работать над продвижением этого прибора в субмиллиметровый диапазон и сегодня и достаточно успешно. Но связь с моей бывшей лабораторией, руководимой В.Я. Кисловым, в которой я перед уходом 13 лет был его заместителем, тогда не потерял. К работе, связанной непосредственно с генераторами шума, но уже в миллиметровом диапазоне и на твердотельной элементной базе, и, что важно, как руководитель этого направления я вернулся только

в 1984 году. Но основное внимание и время было отдано оротрону.

Короче, в настоящее время я не владею обширной информацией по изучению нелинейной динамики различных систем и вынужден следить за успехами в области исследования различных теоретических моделей устройств, демонстрирующих переход к хаосу, благодаря авторефератам диссертантов вашего университета, на которые иногда пишу отзывы. А также просматриваю монографии, которые мне любезно дарят помнящие меня нынешние исследователи динамического хаоса.

Тем не менее, я решил подготовить такую Лекцию, так как обдумывание её содержания увело меня в далёкую юность, о которой всегда приятно вспомнить через 51 год, тем более, что я был непосредственным участником исследований, вынесенных в название Лекции, а таких свидетелей и участников тех далёких событий, работающих в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, осталось двое: Н.Н. Залогин и Е.А. Мясин.

В.Я. Кислов сыграл решающую роль, хотя и опосредовано, в выборе моего жизненного пути, поэтому я считаю своим долгом рассказать о его теоретических (фундаментальных) и прикладных исследованиях, тем более что 26 сентября 2013 г. ему исполнилось бы 82 года. Его деятельность в Институте Академии наук является ярким примером инновационной деятельности, о которой сегодня так много высокопарно ратуют наши новые начальники в Правительстве, пытаюсь обвинить Академию наук в неспособности её организовать, а также во всех смертных грехах, не стесняясь использовать для этого любые средства.

Как известно, не смотря на протесты академического сообщества, Дума приняла в трех чтениях закон о так называемой реорганизации РАН с отделением от неё Институты. Тем самым узаконила развал Академии наук и рейдерский захват материального имущества Академии, переведя его под управление спец. структуры (Агентства), которая будет определять нужную чиновникам тематику и курировать хозяйственную деятельность Институты. Причём авторы, не побоюсь этого слова, гнусного Закона для его проталкивания в Думе организовали перед голосованием кампанию травли на продажном телевидении и в СМИ, которые не стеснялись выливать на Академию ушаты помоев, используя ложь и клевету. Ярким примером такой реформы в Армии является дело о миллиардных хищениях в ОборонСервисе, растраты в 2.5 миллиарда в РосНано и всего нескольких тысяч долларов США в Сколково. Далее всё прошло как по маслу. Верхняя палата, как всегда, проштамповала 25 сентября 2013 года поддержку, а президент своей подписью подтвердил содеянное. Блестящая иллюстрация мыслительных способностей нашей Власти, граничащих с предательством интересов России.

Но я перехожу от такого отступления к изложению собственно того, о чём хотел рассказать. Прежде всего, хочу представить Вам краткую справку о жизни и деятельности Владимира Яковлевича.

Родился в городе Дзержинске в семье инженеров-химиков. В 1949 году после окончания школы поступил на физико-технический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, теперь физический факультет, и окончил его 1955 году. С 1956 года – инженер ИРЭ АН СССР в отделе Н.Д. Девяткова, в 1961 году защитил диссертацию на соискание степени к. ф.-м. н., с 1962 года – заведующий лабораторией, в 1978 году защитил диссертацию на соискание степени д. ф.-м. н., с 1990 года – заведующий отделом. Лауреат Государственной Премии СССР (1980), Лауреат Премии Совета

Министров СССР (1984, 1989 гг.), Лауреат Государственной Премии РФ (2000 г.)

За кратким перечнем этих дат стоят годы напряжённого труда В.Я. и руководимых им коллективов учёных на благо Великой Страны Советов (в 2000 году премия присуждена за работы в области медицины). Состав лаборатории менялся на протяжении этих лет. Кроме того, при проведении работ по внедрению результатов исследований создавались творческие коллективы из сотрудников других лабораторий Института и других организаций.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ ПЛАЗМА–ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК (1959–1964 годы)

Становление учёного

После окончания МИФИ в 1961 году и года работы после распределения на предприятии п/я 1598, я поступил 2 октября 1962 году на работу в ИРЭ АН СССР. Я занял должность м.н.с. в новой лаборатории, которую руководство отдела СВЧ электроники в лице Н.Д. Девяткова и З.С. Чернова организовали для В.Я. Кислова.

В этой связи я не могу свидетельствовать лично о том, что предшествовало решению руководства отдела. Поэтому обращаюсь к воспоминаниям моего коллеги Николая Николаевича Залогина, выпускника ФИЗТЕХа, проходившего с 1957 года в отделе практику после третьего курса, а в 1960 году поступившего на работу в ИРЭ АН СССР на должность м.н.с. в тот же отдел. Вот как он сообщает об этом в своей книге [1].

«В ИРЭ в лаборатории З.С. Чернова после окончания МГУ появился молодой специалист В.Я. Кислов. Его отец Яков Васильевич Кислов был одним из помощников самого Курчатова, а многие друзья по университету распределились в Институт атомной энергии именно в подразделения, занимавшиеся плазмой. В.Я. Кислов провёл ряд теоретических исследований, которые показали, что по плазменному цилиндру, помещенному в продольное магнитное поле, в определённых диапазонах частот могут распространяться медленные электромагнитные волны, имеющие продольную компоненту электрического поля. При этом в отличие от спирали или других металлических замедляющих структур, упомянутая компонента имеет максимум на оси цилиндра. Это значит, что взаимодействие плазменной замедляющей структуры с электронным потоком должно быть существенно эффективнее, чем в случае традиционных вакуумных ЛБВ и ЛОВ. Результаты, полученные В.Я. Кисловым, подтверждённые экспериментом, привели к тому, что Н.Д. Девятков и З.С. Чернов перевели значительную часть сотрудников отдела на плазменную тематику».

Для развития этой тематики была организована (после успешной защиты В.Я. диссертации и прохождения по конкурсу на должность завлаба) лаборатория, в которую В.Я. Кислов набирал новых сотрудников, и я поступил к нему на работу.

Конечно, краткость – сестра таланта Николая Николаевича, но, по большому счёту, эти исследования были инициированы руководством отдела в 1956 году для исследования возможного использования плазмы в приборах миллиметрового диапа-

зона с длительным взаимодействием. Работа В.Я. Кислова была пионерской, так как впервые в ней было проведено рассмотрение взаимодействия ограниченного электронного потока с ограниченной плазмой (плазменный цилиндр). Поэтому к этой краткой справке Н.Н. Залогина я хотел бы привести документальные свидетельства.

На Международной конференции по миллиметровым волнам (1959 г., США) З.С. Чернов сделал доклад по результатам этой теоретической работы В.Я. Кислова и эксперимента, который подготовил и блестяще провёл вместе с ним Е.В. Богданов, ставший затем моим учителем при проведении экспериментов. Доклад был настолько интересен, что Политехнический институт Бруклина издал этот доклад отдельной брошюрой [2]. Содержание доклада на русском языке можно найти в работе [3].

Затем последовало развитие этих исследований, результаты которых отражены в открытой печати в работе [4]. Именно в этой работе В.Я. Кисловым рассмотрено взаимодействие электронного потока с плазмой в магнитном поле и получены дисперсионные уравнения плазменной ЛБВ и ЛОВ.

Генерация СВЧ-шума в плазменной ЛОВ

Генерации шумовых колебаний в плазменной ЛОВ была обнаружена в конце 1962 года. Вот как об этом событии пишет Н.Н. Залогин в той же книге [1].

«Плазма в длинной стеклянной трубке образовывалась за счёт ионизации паров ртути быстрым (порядка 1 кВ) электронным пучком в продольном магнитном поле. Подбирая давление остаточных газов, ток и напряжение электронного пучка и величину магнитного поля, удалось быстро получить генерацию электромагнитных волн в 3 см диапазоне с излучением этих волн в пространство или в волновод. Измерения концентрации плазмы и величины магнитного поля подтвердили тот факт, что работает плазменная ЛОВ. Когда же начались измерения спектра возбуждаемых колебаний, всё стало непонятным. Экран анализатора спектра ИВ-66 был забит интенсивными шумами. Решили, что идёт наводка на усилитель промежуточной частоты, и стали измерять спектр с помощью перестраиваемого фильтра на СВЧ-резонаторе. И тут континуум. Вспомнили, что в микроволновых радиометрах работают плазменные источники шума, но у них спектральная плотность мощности шума (СПМШ) определяется как $65 kT_0$. Это соответствует $2.6 \cdot 10^{-13}$ Вт/МГц. У нас же СПМШ на 8 порядков, то есть в 100 миллионов раз больше! Тогда это всё-таки генерация. Все окружающие сотрудники ничего не могли сказать по этому поводу. В те времена понятие автогенератор всегда почему-то связывалось с генератором ван дер Поля и соответствующим дифференциальным уравнением второго порядка, имеющим лишь периодические решения. Все были в плену фазовой плоскости, где траектории движения принципиально не могли пересекаться.

Заявка на изобретение (авторы Н.Н. Залогин и В.Я. Кислов) была подана в начале 1963 года. Она прошла довольно быстро. Сотрудники Комитета по открытиям и изобретениям признали её пионерской [5]. В том же 1963 году была опубликована теоретическая статья Е. Лоренца «Детерминированный непериодический поток» в американском журнале, посвященном физике атмосферы [E.N.Lorenz. Deterministic Nonperiodic Flow, Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20, p.130–141]. Реально в этой статье были приведены дифференциальные уравнения, соответствующие

простейшему генератору хаотических колебаний. Нижегородские радиофизики на-ткнулись на эту работу только во второй половине 1970-х годов. На русский язык статья была переведена в 1981 году.

Следует заметить, что интерпретация эффекта шумовой генерации была да-на авторами заявки на вполне современном уровне. Предполагалось одновременное возбуждение нескольких (не менее трёх) видов колебаний – мод (mode) на неэк-видистантных частотах в заданном диапазоне и их нелинейное взаимодействие с рождением множества комбинационных составляющих. Дополнительная хаотизация колебаний обеспечивалась флуктуациями концентрации плазмы, степень которой за-висела от интенсивности возбуждаемых колебаний (ВЧ-разряд)».

С этого момента наших открытых публикаций с упоминанием о генерации шума до 1979 года [6] не было.

По-видимому, следует объяснить, что представляет собой анализатор спектра ИВ-66. Это анализатор спектра 3 см диапазона на отражательном клистроне. Полоса просмотра спектра, соответствующая его зоне генерации, составляет 15–20 МГц, но механически можно перестраивать это «окно» по диапазону. Для ИВ-66 это 3 см диапазон.

Заявка (кстати сказать, она была закрытой), как было сказано, была подана в начале 1963 года, но обнаружили эту генерацию в конце 1962 года. Если учесть, что я поступил на работу 2 октября 1962 года, не имея ни малейшего представления о СВЧ-электронике (так как окончил факультет теоретической и экспериментальной физики МИФИ, где этот курс не читали), то вся эйфория, связанная с данным откры-тием, не произвела на меня особого впечатления. Но, начав вникать в суть проблемы, читая приведенную ранее литературу и отчёты, а, также принимая участие в специ-фических для меня экспериментах, я в течение года вошёл в курс событий и стал полноправным членом очень дружной, как мне казалось, и интеллигентной команды исследователей и инженеров. Таким образом, я целый год занимался самообразова-нием, и В.Я. Кислов не только не мешал, но и содействовал этому. Кроме того, он не мешал мне заниматься вторым любимым делом, отпуская на спортивные сборы. Я был почти профессиональным игроком (вратарём) в команде по ручному мячу ещё со времени учёбы в МИФИ, которая, в конце концов, из команды инженеров пре-вратилась в команду СК «Кунцево». Меня так увлекла работа в лаборатории, что, когда в 1964 году (после того, как команда стала третьей в Первенстве СССР, а я – мастером спорта) тренер предложил мне стать профессиональным спортсменом, я отказался, не задумываясь. Но тренироваться и играть продолжал и в 1966 году вместе с командой стал чемпионом СССР и принял участие в играх на Кубок Ев-ропейских Чемпионов. В 1967 году в полуфинальных играх мы проиграли немцам (СК «Гуммерсбах») и у них, и у себя дома по 2 мяча. Расстаться с большим спортом пришлось в 1971 году после перехода на работу во Фрязинский филиал ИРЭ.

Когда я поступил на работу, лаборатория вела исследования в рамках НИР «Исследование радиофизических свойств электронно-ионной плазмы» (шифр «Финиш-АН»), которую успешно окончила в декабре 1964 года. Само название гово-рит о том, что к моменту начала работы В.Я. казалось, что основные исследования по плазменной тематике завершаются. Но ситуация изменилась, в связи с обнару-жением шумовой генерации в плазменной ЛОВ. Поэтому уже в марте 1964 года, то есть ещё до окончания НИР «Финиш-АН», В.Я. Кислов заключил Договор со

сторонней организацией на «Исследование возможности создания плазменных генераторов непрерывного действия» (НИР «Сабля», 1964–1965 гг.). В дальнейшем я не буду использовать воспоминания Н.Н. Залогина [1], а вести повествование только от первого лица, так как с этого времени я принимал в выполнении этой работы, как и последующих работах, самое непосредственное участие. Кроме того, в отличие от Н.Н. Залогина, который самонадеянно восстанавливал по памяти события этих лет, я, не надеясь на свою память, просмотрел все отчёты в библиотеке Первого отдела. Поэтому воспроизвожу слово в слово часть Аннотации к отчёту по этой работе, не содержащую закрытой информации. «Предлагается метод генерации широкополосного СВЧ-шума, основанный на возбуждении множества видов колебаний в неравновесной плазме и стохастическом перемешивании фаз и амплитуд этих колебаний. На основе предложенного метода рассмотрен ряд конкретных систем. . . ». И еще выдержка из Введения: «Метод заключается в коллективном возбуждении в много резонансной системе большого числа видов электромагнитных колебаний, занимающих широкую полосу частот и хаотизации этих колебаний за счёт случайных коллективных процессов, происходящих в плазме. При этом в системе плазма–пучок возбуждается много видов колебаний и имеет место их нелинейное взаимодействие, которое происходит по закону случайных процессов».

Генерация СВЧ-шума в системе спираль–плазма–электронный поток (1964–1965 годы)

Руководители ИРЭ и Аксель Иванович Берг, а затем и Владимир Александрович Котельников всегда говорили, что радиотехника и электроника – это прикладные науки и значит необходимо, чтобы полученные результаты исследований находили применение. В.Я. Кислов твёрдо следовал этой установке. Поэтому, по видимому, впервые в ИРЭ лаборатория и взялась за выполнение этой договорной НИР «Сабля». Какой-то «доброжелатель» в институтской стенгазете под соответствующим коллажем с фотографией В.Я. написал: *«Висит над Вами Сабля острая. Обрезаться довольно просто»*. Но эта злопыхательская острота не оправдалась. Работа была успешно выполнена. События развивались следующим образом. Для выполнения работы были задействованы традиционные экспериментальные установки, об одной из которых упоминал Н.Н. Залогин, но, кроме того, создана установка для исследования генерации шума в системе спираль–плазма–пучок. Предполагалось возбудить в системе плазма–пучок электромагнитные волны, но уже в диапазоне параметров, соответствующих дисперсии плазменной ЛБВ. Спираль должна была обеспечить наилучшую связь с этими волнами для вывода их в нагрузку и, кроме того, дополнительное усиление. В работе в качестве соисполнителя принимал участие Харьковский ФТИ, в котором группа А.К. Березина также исследовала генерацию шума в такой системе. Но если в Харькове такую систему сделали сами, то В.Я. Кислов придумал сделать её на базе промышленной мощной ЛБВ. Для этого он договорился с главным конструктором о её переделке, допускающей в пространство взаимодействия напуск рабочего газа. Следует отметить, что эта лампа непрерывного действия с замедляющей системой спираль, нагруженная кольцами, рассчитана на выходную мощность 10 кВт и напряжение 11 кВ. Поэтому вместо поглотите-

ля между модулирующей и выходной секциями промежутков дрейфа организован за счёт вывода мощности с выхода 1-й секции на внешнюю нагрузку, охлаждаемую водой. Такая же нагрузка установлена на входе 2-й секции для устранения усиления отражений от выходного вывода энергии. На выходе лампы размещался специфический направленный коаксиальный ответвитель, охлаждаемый водой с ответвлением в «плечо» – 35 дБ. Он был предназначен для измерительных целей. Диапазон лампы был 300–600 МГц. Лампа работала в магнитной фокусирующей системе в виде солениода с величиной фокусирующего поля примерно 400 Гс с экранированной от поля электронной пушкой.

Для работы с этой лампой был создан Экспериментальный стенд, а я был назначен В.Я. ответственным экспериментатором.

В лаборатории нужного источника напряжения не было. Поэтому лампа работала при пониженном напряжении (до 6 кВ) и токе (до 1 А). В этой связи и коэффициент усиления у неё был невысоким (примерно 15 дБ). Тем не менее, на ее основе был создан генератор путем подачи части мощности с её выхода на вход с помощью дополнительного направленного ответвителя и коаксиального кабеля (отрезки длиной 30, 60, 90 м). Подбирая давление рабочего газа и напряжение замедляющей системы, добивались генерации шумового сигнала с непрерывным спектром. Но удалось получить генерацию сигнала только со спектром в полосе усиления ЛБВ в виде шумовых полос. С кабелем РК-2 длиной 60 м (задержка в 300 нс) расстояние между шумовыми полосами было 1.5 МГц, а их ширина 0.5 МГц. Интегральная мощность генерируемого сигнала в непрерывном режиме была 0.5 кВт. Такой спектр тоже устраивал Заказчика, но всё-таки желательно было уменьшить «дыры» между шумовыми полосами.

Как ни старались добиться их перекрытия, ничего хорошего не получалось: не хватало усиления и, как только увеличивалась длина кабеля, генерация срывалась. Без плазмы в системе с тем же кабелем возбуждались две-три собственные частоты.

Но зато в Харькове генерацию широкополосного СВЧ-шума в системе спираль–плазма–электронный пучок получили. При этом обратная связь в системе обеспечивалась за счёт внутренних отражений. Выполнение этой части работы как представитель головного исполнителя НИР «Сабля» принимал я. Дотошно ко всему придираясь, я работу принял. После этого «проверяемые» настояли на проведении по этому поводу маленького банкета. В результате я опоздал на поезд и добирался до Москвы в теплушке грузового состава.

Отчёт о работе ФТИ был также предъявлен комиссии как Приложение к основному отчёту ИРЭ АН СССР. Работа была предъявлена Заказчику с выполнением всех пунктов ТЗ и принята с рекомендациями о необходимости продолжения исследований.

ШУМОТРОН (1966–1997 годы)

И работа продолжалась. Потерпев фиаско с генератором шума, использующим мощную ЛБВ, решили проверить возможность возбуждения многочастотного сигнала и сближения собственных частот в генераторе, состоящем из маломощной ЛБВ 10 см диапазона с усилением 30–35 дБ и тех же отрезков кабеля разной длины.

Цель эксперимента была в выяснении соотношения между предельной длиной кабеля, то есть ослабления сигнала, и коэффициентом усиления ЛБВ, когда генерация не срывается и происходит возбуждение многих собственных частот и их желаемое сближение. Эти исследования проводились уже в рамках новой внутренней работы «Исследование радиофизических свойств плазмы и пространственного заряда с целью получения шумовых колебаний» (январь 1966–декабрь 1967 гг.).

В.Я. Кислов поручил провести это моделирование мне, так как я был ответственным за стенд с мощной ЛБВ. Нужно было понять, что ещё можно сделать, чтобы попытаться улучшить спектр шумовой генерации.

Хочу заметить, что в лаборатории было не более трех пакетированных в магнитную систему ЛБВ малой мощности ($P_{\text{вых}} \cong 1 \text{ Вт}$). Как их доставал В.Я., я не знал, но то, что прежде всего была задача при запуске не вывести их из строя, знал точно. Я благополучно запустил УВ-34. Измерил её усилительную характеристику. Установил, что она добирается до насыщения по выходу при входном сигнале порядка 1 мВт. Значит, подавать на её вход большую мощность не следует, чтобы она, не дай бог, не вышла из строя. О падающем участке характеристики я тогда и не догадывался. На всякий случай в цепь обратной связи я ввёл ещё и аттенуатор с дискретным ослаблением 0, 5, 10, 15 дБ. Ну, и начал включать те же отрезки кабеля в цепь обратной связи. Осторожно изменяя ослабление аттенуатора, я следил за тем, чтобы, не дай бог, не перегрузить ЛБВ. Поэтому даже многочастотные режимы возбуждались с трудом и спектры сигнала были ещё менее привлекательны, чем в системе с мощной ЛБВ без плазмы.

В конце концов, я решил использовать в качестве регулируемой задержки ещё и ЛБВ того же типа, УВ-34 (или УВ-35, теперь уже не помню). Поскольку главная задача эксперимента, кроме той которой я занимался, была не вывести обе лампы из строя, то блок-схема генератора содержала две лампы с переменными аттенуаторами на входе каждой и длинный кабель между ними.

В процессе эксперимента ослабление аттенуатора на входе первой лампы можно было уменьшать (в соответствии с измерением мощности входного сигнала), снижая рабочий ток 2-й ЛБВ, то есть, уменьшая усиление. В итоге аттенуатор был удалён, а во 2-й ЛБВ пришлось существенным образом снизить рабочий ток до 1 мА, вместо 10 мА по паспорту. В таком режиме работы усиление её по малому сигналу, как потом было установлено, было близко к нулю. Таким образом, оказалось возможным использовать самый короткий отрезок кабеля, то есть существенным образом уменьшить потери в линии ОС.

Но теперь режим работы ЛБВ (названной позднее «ЛБВ-нелинейный элемент») был такой, что она не могла выйти из строя ни при какой мощности сигнала на её входе. Поэтому я спокойно мог изменять ослабление аттенуатора на её входе, выводя его даже на «0». И вот, когда это случилось в первый раз, на экране ИВ-46 возник шумовой сигнал. Исследование генерации с помощью перестройки ИВ-46 показало, что генерация имеет место в широкой полосе частот. Изъяв из схемы длинный кабель, обнаружил, что неравномерность СПМШ по диапазону значительно уменьшилась, хотя расстояние между максимумами существенно увеличилось. Кроме того, режимы генератора можно было изменять, меняя ослабление этого аттенуатора. Блок-схема первого шумотрона приведена, например, в работе [1]. Не говоря пока никому об этих событиях, я измерил амплитудные характеристики обеих ламп на одной из частот диапазона. Они были представлены на слайдах и присут-

ствуют, естественно, в Заявке на изобретение в моей диссертации и в статье [7]. После этого пошёл к В.Я. с докладом. То, что всё в этом режиме определяет ЛБВ-нелинейный элемент сомнений не было. Но что заставляет систему генерировать шумовой сигнал с непрерывным спектром?

Нужно было **срочно** подавать заявку на изобретение, а это значит, объяснять экспертизе как же всё происходит, причём **без плазмы!** Было проведено бесконечное число дискуссий по этому поводу, и ход мыслей был таким: «Максимумы в спектре располагаются на собственных частотах системы, а они определяются задержкой T в цепи обратной связи: $\omega_n = 2\pi n/T$. Поэтому, если найти механизм, с помощью которого можно сдвигать собственные частоты, хотя бы, на места минимумов, то спектр сигнала будет непрерывным». Таким образом, необходимо, чтобы была переменная часть задержки сигнала при обходе цепи обратной связи порядка π , а лучше больше. Возникать она должна в нелинейном режиме работы ЛБВ. Такая возможность имеет место в ЛБВ, так как существует нелинейный набег фазы, зависящий от амплитуды сигнала, как показано в работе *J.E. Row «Nonlinear Electron Wave Interaction Phenomena» Academic, New York, 1965*.

Но как он реализуется в генераторе? За счёт неустойчивости амплитуды, которая благодаря падающему участку амплитудной характеристики при изменении ослабления сигнала в цепи обратной связи уже не остаётся постоянной, а претерпевает, как теперь говорят, бифуркации удвоения периода, а спектр сигнала обогащается модуляционными частотами. (Кстати, по этому поводу на закрытой конференции по электронной технике в 1968 году был доклад трёх авторов В.Я. Кислова, Н.Н. Залогина, Е.А. Мясина.) При этом модулируется и нелинейный набег фазы. Если в системе возбуждается несколько собственных частот, то в результате этого нелинейного преобразования сигнала на каждой из них происходит, в конце концов, перекрытие спектров и хаотизация колебаний.

Поскольку предполагалось, что в системе происходит как бы хаотизация времени обхода замкнутого контура генератора, то этот режим (амплитудно-фазовой неустойчивости) получил название режима «нелинейной флюктуирующей задержки». Именно так было сделано Описание к Заявке, так я объяснял возникновение этого режима в диссертации. Позднее было показано, что в этом режиме имеет место, кроме этого эффекта, и преимущественное усиление малого сигнала над большим сигналом. Многие нелинейные эффекты были выявлены и исследованы позднее. Закрытая заявка на изобретение (авторы В.Я. Кислов, Е.А. Мясин, Е.В. Богданов) была подана 22 июня 1967 года. Авторское свидетельство было получено. Суть этой заявки, которую с большим трудом удалось рассекретить, представлена в открытом виде двумя Авторскими свидетельствами на генератор [8] и способ [9].

Вскоре после подачи заявки стало ясно, что для хаотизации колебаний достаточно нелинейности, задержки и фильтра. Вот как это было выяснено.

Естественно, к исследованию этой версии объяснения подключился теоретик Всеволод Николаевич Данилов. Он исследовал в той же НИР, упомянутой ранее в этом разделе, возможность хаотизации колебаний в кольцевой системе: нелинейный усилитель, источник внутренних шумов, фильтр и задержка при её медленном и быстром изменении. Было показано, что в обоих случаях такая возможность реализуется. Но самое главное, он сделал вывод о том, что «роль источника белого шума, образно говоря, играет сигнал, прошедший задержку и усилитель». Им была «показана возможность существования стохастических автоколебаний в системе, не

зависящих ни от внутреннего шума элементов кольца, ни от любых изменений задержки». Почему этот материал не был опубликован в открытой печати, а остался в переплёте секретного Отчёта, я не знаю. Спросить уже не у кого, так как В.Н. Данилов трагически погиб через 10 лет после написания этой главы Отчёта, а В.Я. ушёл из жизни в 2007 году. Но эти результаты В.Н. Данилова заставили более детально исследовать поведение генератора с рабочей точкой на падающем участке амплитудной характеристики усилителя (см. [6]), что дало возможность В.Я. использовать найденные зоны стохастичности для завоевания доверия к обнаруженному явлению у дирекции и ведущих академиков ИРЭ. Ещё до моей защиты (1970 г.) В.Я. предлагал академикам найти замкнутый цикл в отображении с экспоненциальной нелинейностью и коэффициентом усиления, соответствующим этой зоне [6], используя программируемую электронную машинку с памятью. Однако это им, естественно, не удавалось сделать. Как бы то ни было, версия стохастизации колебаний за счёт нелинейной флюктуирующей задержки осталась основной в моей диссертации. Нелинейный набег фазы в ЛБВ был позднее измерен Ю.В. Анисимовой.

В этой НИР ещё присутствовали исследования плазменных систем, но уже с 1968 года вся лаборатория переключилась на исследования работы шумотронов разных диапазонов и выходных мощностей. Эта тематика развивалась в лаборатории и после моего ухода из неё, вплоть до «лихих 90-х».

Продолжение исследований и внедрение результатов (1968–1980 годы)

Дальнейшие исследования были направлены как на изучение механизма генерации СВЧ-шума, так и на создание устройств для конкретных применений.

Тут следует напомнить, что наши теперешние партнёры из США ввели тогда (в 1965 г.) в Южный Вьетнам войска для поддержки правительственных войск в борьбе с партизанами Вьетконга. Естественно, СССР помогал оружием Северному Вьетнаму, а тот, в свою очередь, партизанам. Начиная с 1972 года интервенты начали бомбить города Северного Вьетнама. Постановщики помех подавляли наши комплексы земля–воздух, и остро встал вопрос о создании чего-то похожего для противодействия им. Конструкция шумотрона, использующая выпускаемые промышленностью ЛБВ, позволяла быстро решать подобные задачи. Поэтому лаборатория должна была, с одной стороны, продолжать исследования механизма генерации шума, а с другой – доказывать, что по своим параметрам шумовой сигнал годится для систем РЭБ (радиоэлектронная борьба). Исследовали распределение вероятностей сигнала, доказывая, что он практически не отличается от гауссова, что спектр действительно непрерывный, а функция автокорреляции не отличается от одной для широкополосных тепловых шумов, ограниченных полосой фильтра. Приходилось в связи с этим, выезжать в поле на натурные испытания генераторов в станциях помех, созданных в лаборатории. У экспериментаторов была напряжённая программа по выполнению этих задач, в то время как теоретики могли спокойно заниматься более детальной разработкой моделей. Я не могу рассказывать о деталях внедрения шумотрона в системы. Скажу только, что на предприятии Радиопрома с 1970 года была поставлена ОКР и созданная в результате её выполнения система была принята на вооружение.

Хочу заметить, что информация, которая в деталях присутствовала в закрытых отчётах и закрытой печати, в общем виде становилась достоянием «узкого круга

лиц». Во-первых, читателей журнала «Специальная электроника» и участников закрытой конференции 1968 года; во-вторых, сотрудников других лабораторий отдела; в-третьих, должен был печататься аспирант В.Я.; в-четвертых, В.Я., чтобы привлечь внимание Заказчиков на всяких закрытых НТС, рекламировал результаты в присутствии представителей других организаций. Однако самая большая утечка информации была связана с поездкой в Нижний Новгород В.Н. Данилова.

Параллельно с работой в лаборатории В.Н. заканчивал работу над своей кандидатской диссертацией, посвящённой формированию и фокусировке различных электронных потоков. Диссертацию эту он успешно защитил в 1969 году, получив 28.01.1970 утверждение ВАК. Защита проходила в Нижнем Новгороде, где его радушно принял и оставил ночевать М.И. Рабинович. С ним-то В.Н. и поделился информацией об исследовании процессов в кольцевой системе автогенератора, приводящих к генерации шума. И пока нам было запрещено публиковать результаты своих исследований, в открытой печати начали появляться и нарастать, как снежный ком, статьи, посвящённые как генераторам с обратной связью, так и этому явлению. Вот далеко не полный список публикаций на эту тему.

1. *Заславский Г.М., Чуриков Б.В.* УФН 1971.Т.105, вып.1. С.3

2. *Ruelle D., Takens F.* On the nature of turbulence. Comm. Math. Phys. 1971. Vol. 20. P. 167

3. *Розаишкова А.И., Дихтяр В. Б., Розаишков С.А.* Спектр колебаний в автогенераторе с запаздывающей обратной связью//РЭ. 1973. Т. 18, №5. С. 1075

4. *Дихтяр В.Б.* Анализ влияния формы частотной характеристики и усиления на тип колебаний, формируемых автогенераторами с внешней запаздывающей обратной связью // РЭ. 1973. Т. 22, № 5. С. 969.

5. *Ruelle D.* Lecture Notes in Math//The Lorenz Attractor and the Problem of Turbulence. 1976.

6. *Рабинович М.И.* УФН. 1978. Т. 125, вып.1. С. 123.

За период с 1970 по 1980 год в лаборатории по этой тематике защитили диссертации: В.Б. Дихтяр (кандидатскую); В.Я. Кислов (1978 г., докторскую); после чего под руководством В.Я. 13 человек защитили кандидатские диссертации и при его содействии А.С. Дмитриев защитил докторскую диссертацию.

Оригинальность, научная новизна результатов исследований и внедрение их в народное хозяйство Страны были по достоинству оценены руководством ИРЭ АН СССР, представившим в лице В.А. Котельникова этот цикл исследований на Государственную Премию СССР 1980 года. В конкурентной борьбе с другими соискателями её получил коллектив авторов работы, в том числе от ИРЭ В.Я. Кислов, Н.Н. Залогин, Е.А. Мясин, от Секции Прикладных проблем при АН СССР Е.П. Чигин и ряд товарищей от отраслевых и военных организаций.

Заключение

Обнаружение нелинейной хаотической динамики в электронном генераторе с задержанной обратной связью побудило поиск аналогичного явления в автоколебательных системах другой природы. Таким образом, была открыта новая область поведения разнообразных детерминированных систем (в том числе и биологических) для исследования с помощью методов теории колебаний.

Действительно, в конструкции шумотрона был выделен элемент, который был

ответственен за хаотизацию колебаний в ЛБВ с задержанной обратной связью и определял возможность генерации хаотических колебаний в нелинейной детерминированной автоколебательной системе. Причём был показан и тип этой нелинейности. Это позволяло: во-первых, использовать любой тип усилителей в схеме самого шумотрона, например, мощного усилителя с ответвлением малой мощности с его выхода на вход маломощного нелинейного элемента; во-вторых, создать длинную двухсекционную ЛБВ с выводом сигнала в нагрузку с выхода первой секции (однобаллонный шумотрон); в-третьих, использовать новые схемы генераторов шума, в которых в качестве усилителя можно применять приборы любой природы и т.д., причём большинство из этих схем были реализованы. И, главное, была открыта первая страница новой области исследований.

Подводя итог моей Лекции, можно, не боясь ошибиться, утверждать, что результаты исследования генерации СВЧ-шума, проведенные в ИРЭ АН СССР в 1963–1967 годы под руководством В.Я. Кислова, явились основой нового научного направления. Это направление – **исследование нелинейной хаотической динамики автоколебательных систем.**

Библиографический список

1. *Залогин Н.Н.* Генерация стохастических сигналов на основе динамического хаоса в электронных приборах. // Фрязинская школа электроники: К 80-летию электронной промышленности в наукограде Фрязино. М.: Изд-во Янус-К, 2012. С. 413.
2. *Bogdanov E.V., Kislov V.J., Tchernov Z.S.* Interaction between an electron beam and plasma // Reprinted from Proceedings of the Symposium on Millimeter Waves. Politechnic Institute of Brooklyn. March 31, April 1, 2, 1959. P. 57.
3. *Богданов Е.В., Кислов В.Я., Чернов З.С.* Взаимодействие электронного потока с плазмой. // РЭ. 1960. Т. 5, № 2 С. 229.
4. *Кислов В.Я., Богданов Е.В.* Взаимодействие медленных плазменных волн с потоком электронов. // РЭ. 1960. Т. 5, № 12. С. 1974.
5. *Залогин Н.Н., Кислов В.Я.* А.с. 28547 СССР. Заявка 961182 с приоритетом от 15 апреля 1963 г.
6. *Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А.* Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием // РЭ. 1979. Т. 24, № 6. С. 1118.
7. *Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н.* О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // РЭ. 1980. Т.25, № 10 С. 2160.
8. *Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В.* Генератор сверхвысокочастотных шумовых колебаний. А.с. 1053711 СССР. Заявка 0984513 от 8 июля 1983 г. с приоритетом от 22 июня 1967 г.
9. *Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В.* Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. А.с.1125735 СССР. Заявка 3523601 от 23 июля 1984 г. с приоритетом от 22 июня 1967 г.

Поступила в редакцию 24.12.2013

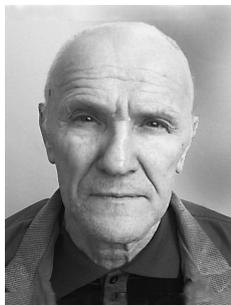
INVESTIGATIONS OF THE HF NOISE GENERATION IN IRE OF ACADEMY OF SCIENCES OF USSR AT 1962–1967 YEARS – THE BEGINNING OF THE NEW SCIENCE DIRECTION

E.A. Myasin

V.A. Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch

This paper is devoted to **the noisetron creation history in 1967** – the chaotic oscillations oscillator consisted of two traveling wave tubes (TWT), contacted successively in ring. It is shown that the noisetron creation is the result of the work on HF noise generation in the systems electron-ion plasma–electron stream, which was fulfilled in V.Ya. Kislov's laboratory. This work was initiated by the theoretic investigations on the interaction of electron stream with electron-ion plasma, fulfilled by V.Ya.Kislov in the period of 1956...1960 years. The experimental verification of these results led to the discovery of the HF noise generation in the plasma backward wave oscillator (BWO) in 1962–1963. It is maintained that the investigation the noisetron operation mechanism **for the first time took evident the reason of appearance** of the regime of HF noise generation in determinate system without plasma and independently on the own noises of electron stream. This reason picked out in noisetron construction as TWT-nonlinear element, that is the reason of this regime is the system **nonlinearity**. The brief information about the work on the noisetron subject in V.Ya. Kislov's laboratory is given for the period of next years, including 1980 year. On the basis of upper consideration the conclusion is done that the investigation results obtained in IRE of Academy of Sciences of USSR marked the beginning of the new science direction – **investigation of nonlinear chaotic dynamics of the autooscillation systems**.

Keywords: Electron-ion plasma, electron stream, amplification, plasma BWO, HF noise generation, helix–plasma–electron stream system, TWT-amplifier, TWT-nonlinear element, noisetron.



Мясин Евгений Анатольевич – родился в Новосибирске (1938), окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ, 1961). С 1962 года работает в ИРЭ АН СССР сначала в должности младшего затем старшего научного сотрудника. В 1966 году установил связь между возникновением генерации шума и нелинейным режимом ЛБВ в автогенераторе с задержанной обратной связью из двух ЛБВ, замкнутых в кольцо. Соавтор заявки на способ генерации и устройство генератора шума (Шумотрон, 1967). Защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук (ИРЭ, 1970) в области радиофизики и СВЧ-электроники. Лауреат Государственной премии СССР (1980). С 1980 года по настоящее время заведующий лабораторией генерации и усиления электромагнитных волн миллиметрового диапазона в ФИРЭ АН СССР (в настоящее время – Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук). Опубликовал (в том числе в соавторстве) 108 статей и сделал 69 докладов на Российских и Международных конференциях по направлениям, указанным выше.

141190 РФ, Московская область, Фрязино, площадь им. Введенского, 1
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru