

Посвящается д. ф. - м. н. В.Я. Кислову-
Учёному и организатору.

ЛЕКЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ШУМА В ИРЭ АН СССР – НАЧАЛО НОВОГО НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

Уважаемые коллеги!

Прежде всего, 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, которое Вы видите, связано с этим фактом. Содержание лекции:

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ
2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ ПЛАЗМА - ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК. (1959-1964гг.)
 - 2.1. Становление учёного (1956 – 1959гг.)
 - 2.2. Генерация СВЧ шума в плазменной ЛОВ (1962 -1963)
3. ГЕНЕРАЦИЯ СВЧ ШУМА В СИСТЕМЕ СПИРАЛЬ-ПЛАЗМА - ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК. (1964 – 1965гг.)
4. ШУМОТРОН (1966-1967гг.)
5. ПРОДОЛЖЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ (1968-1980гг.)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И посвящается она В.Я. Кислову – учёному и организатору.

Владимир Яковлевич Кислов

• 26.09.1931г.- 15.07.2007г.



Сразу скажу, что 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. 30 мая 1970 года я как первый аспирант В.Я. Кислова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование нового способа генерирования шумовых СВЧ колебаний в системах с запаздывающей флюктуирующей обратной связью». Я 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 3см 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 почти 13 лет был его заместителем, тогда не потерял. Принимал участие в работе по внедрению её новой разработки по защите ПК как простой исполнитель. 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. О чём, может быть, более подробно скажу позже. (Изучение механизма генерации в этих приборах, хотя и было проведено теоретически на основе исследования эквивалентной схемы

такого генератора, но в основном исследовалось экспериментально, так как переход в режим генерации широкополосных хаотических колебаний происходил, минуя стадию бифуркации удвоения периода колебаний, которая являлась основной предтечей хаотизации в теоретической модели.) 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 Хаотизаторы – 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 опосредованно, 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, пытаясь обвинить Академию наук в неспособности её организовать, а также во всех смертных грехах, не стесняясь использовать для этого любые средства.

Как известно, несмотря на протесты академического сообщества, Дума, приняв в 3-х чтениях закон о, так называемой, реорганизации РАН, с отделением от неё Институтов, тем самым узаконила развал Академии наук, и рейдерский захват материального имущества Академии, переведя его под управление спец. структуры (Агенства), которая будет определять нужную чиновникам тематику и курировать хозяйственную деятельность Институтов. Причём авторы, не побоюсь этого слова, гнусного Закона для его проталкивания в Думе организовали перед голосованием компанию 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 Оборон Сервисе, растраты в 2.5мрд в Рос. Нано и всего несколько тысяч долларов США в Сколково. Далее всё прошло как по маслу. Верхняя палата как всегда проштамповала поддержку Закона 25 сентября, а президент своей подписью подтвердил содеянное. Блестящая иллюстрация мыслительных способностей нашей Власти, граничащих с предательством интересов России.

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

Владимир Яковлевич Кислов

- Родился в г.Дзержинске в семье инженеров-химиков. В 1949г. после окончания школы поступил на физико-технический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.(Теперь Физ.фак.)
- 1955г. – окончил МГУ, 01.01.1956г - инженер
- ИРЭ АН СССР в отделе Н.Д. Девяткова, в 1961г. – кандидат наук, с 1962г. – зав.лаб., в 1978г. – доктор наук, с1990 г. – зав.отделом.
- 1980г. – Лауреат Гос. Премии СССР,
- 1984г., 1989г. - Лауреат Премии СовМина СССР, 2000г. - Лауреат Гос. Премии РФ

За кратким перечнем этих дат стоят годы напряжённого труда В.Я. и руководимых им коллективов учёных на благо Великой Страны Советов. Я не оговорился. 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.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ ПЛАЗМА - ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК (1959 - 1964гг.)

2.1. Становление учёного.

2 октября 1962 году (*после окончания МИФИ в 1961 году и года работы после распределения на предприятии п/я 1598*) я поступил на работу в ИРЭ АН СССР на должность м.н.с. в новую лабораторию, которую руководство отдела СВЧ электроники в лице Н.Д. Девяткова и З.С. Чернова организовали для В.Я. Кислова. Детали этого события, если останется время, я готов рассказать. *Как бы то ни было, оно сыграло решающую роль в моей жизни.*

Но я продолжаю. В этой связи я не могу свидетельствовать лично о том, что предшествовало решению руководства отдела. Поэтому обращаюсь к воспоминаниям моего коллеги Николая Николаевича Залогина, выпускнику

ФИЗТЕХа, проходившему с 1957 года в отделе практику после 3-го курса, а в 1960г. поступившем на работу в ИРЭ АН СССР на должность м. н. с. в ту же лабораторию.

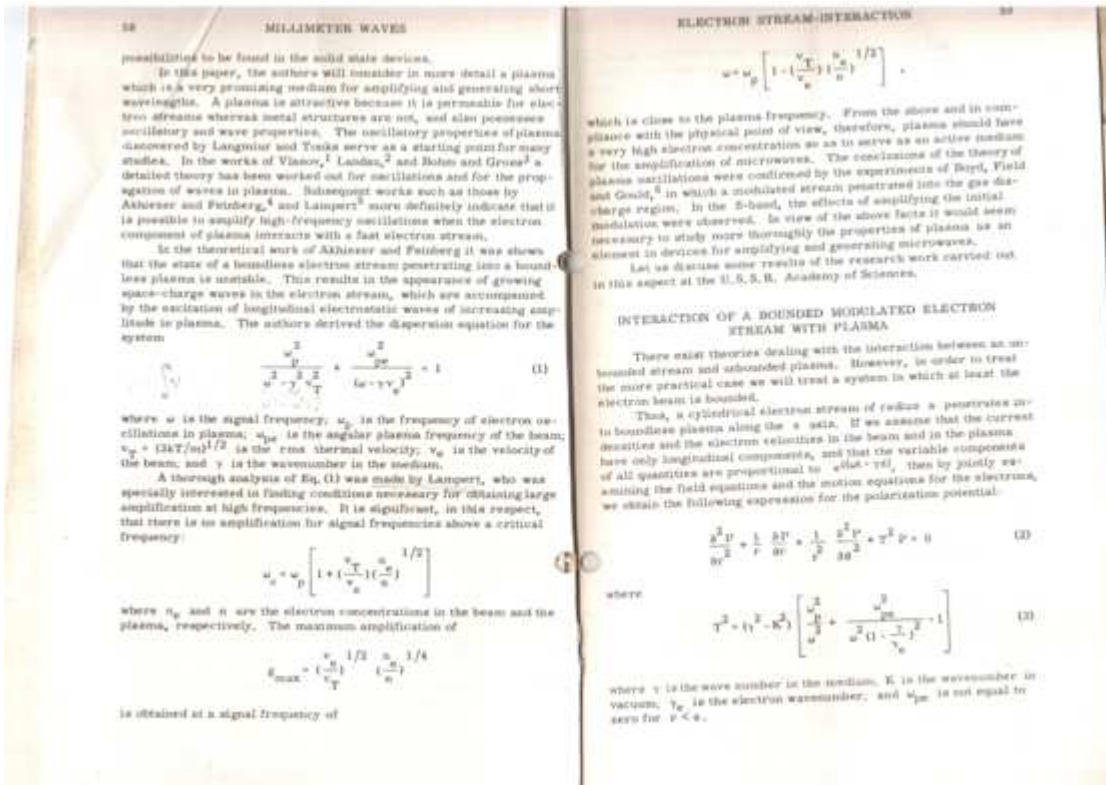
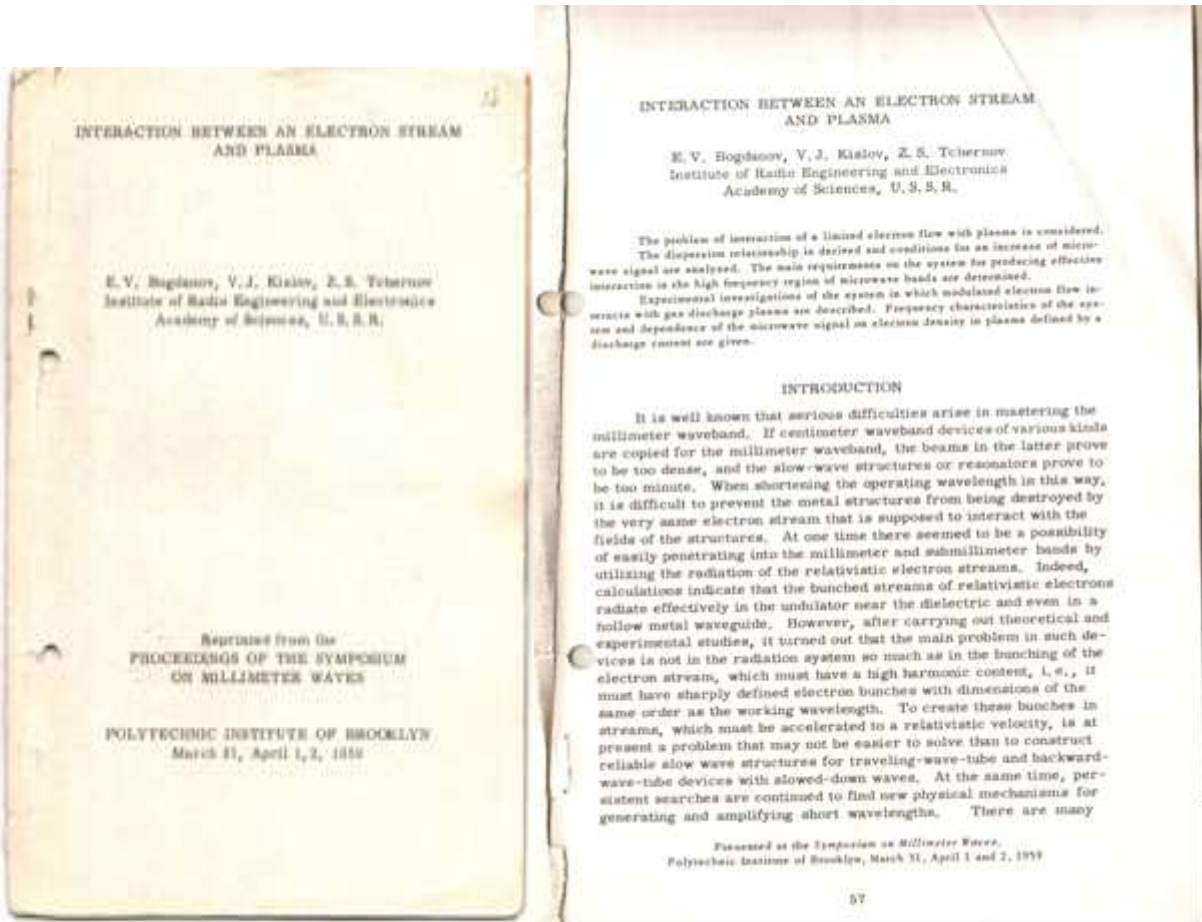
Вот как он сообщает об этом в книге «Фрязинская школа электроники, к 80-летию электронной промышленности в наукограде Фрязино» [1], 2012, Изво Янус-к, С. 413 – 426:

«В ИРЭ в лаборатории №161 (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 ИАЭ именно в подразделения, занимавшиеся плазмой. 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 лаб. №162, 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 для исследования возможного использования плазмы в миллиметровых приборах с длительным взаимодействием. **А работа В.Я. была пионерской.***

Поэтому к этой краткой справке Н.Н. Залогина я хотел бы привести документальные свидетельства. Вот доклад в США на Международной конференции по Миллиметровым и инфракрасным волнам, который сделал З.С. Чернов по результатам этой теоретической работы В.Я. Кислова и эксперимента, который подготовил и блестяще провёл Е.В. Богданов, ставший затем моим учителем при проведении экспериментов. Политехнический институт Бруклина издал этот доклад отдельной брошюрой.



80 MILLIMETER WAVES

Dividing the space into two regions, one of which (for $0.5 < x < a$) contains the electron stream and plasma, and the other (for $x > a$) only plasma, and matching the solutions at the boundary of the beam ($x = a$), we obtain the dispersion equation:

$$\text{Th} \frac{J_1(\gamma a)}{J_0(\gamma a)} = \nu_0 \frac{H_0^{(2)}(\gamma a)}{H_1^{(2)}(\gamma a)}, \quad (4)$$

where

$$\gamma^2 = (\gamma_0^2 - k^2) \left(\frac{\epsilon^2}{\epsilon_0} - 1 \right) \quad \text{if } \epsilon^2 > 0, \quad (5)$$

and

$$\text{Th} \frac{J_1(\gamma a)}{J_0(\gamma a)} = \nu_1 \frac{K_1(\gamma_1 a)}{K_0(\gamma_1 a)} \quad \text{if } \epsilon^2 < 0, \quad (6)$$

where $\gamma_1^2 = -\epsilon^2$, $H_0^{(2)}$ is a zero-order Hankel function of the second type corresponding to the wave traveling out from the electron stream, and K_0 is a modified Bessel function.

We will consider only waves in the system with a phase velocity near to ν_0 . For this case we may neglect terms of the order k^2/γ^2 in the dispersion equation and take $\gamma = \gamma_0$ in the right-hand side. The right-hand side of the dispersion equation turns out to be a function of $\nu_0 a$ and ω/ω_0 , and may be easily calculated. The left-hand side of the dispersion equation $\text{Th}(x) = J_1(x)/J_0(x)$ may also be plotted throughout the complex plane. It is plotted, for example, in Ref. 7. Comparing the functions describing the right and left-hand sides of the dispersion equations (4) and (6) we obtain a relationship between Th and ν_0 . This enables us to find the propagation constant and its imaginary part directly. The amplification per unit length of the system is expressed by the following simple formula:

$$\Gamma = k_0 \frac{\text{Im} \gamma}{\gamma_0} \quad (7)$$

where $\gamma_0 = \omega/\nu_0$ is the plasma wavenumber of the electron stream. A curve of the quantity Γ is shown in Fig. 1. The quantity $\nu_0 a$ is equal to $(\omega/mc) \sqrt{1 - \epsilon^2} (a/2) \sim \omega_0 (1 - \epsilon^2/2)^{1/2} a/2$, that is, it is directly proportional to the square root of the permeance of the beam. The quantity ϵ is a function of two parameters: $\nu_0 a$ and ω/ω_0 . (The method for computing $\epsilon(\nu_0 a, \omega/\omega_0)$ is described in the Appendix.)

A very important relationship is the one between amplification and ω_0^2/ω^2 , or when considering the amplification at some definite frequency, between amplification and the relative concentration ω_0/ω .

81 ELECTRON STREAM-INTERACTION

where ν_0 corresponds to plasma resonance for the given frequency. This relationship is of the following form: for $n < n_0$ there is no amplification; starting with $n = n_0$ the amplification sharply rises, and the dependency on concentration becomes weak. For a further increase in n the amplification gradually becomes smaller and asymptotically approaches zero.

For large $\nu_0 a$, when, for practical purposes we approach the plane case, the relationship between amplification and concentration becomes more resonant, and in the limit when $\nu_0 a \rightarrow \infty$, it approaches ideal resonance at $\omega = \omega_0$. As always, at ideal resonance losses should be taken into account, i.e., the effect of collisions and thermal scattering. Since $\Gamma_{\text{th}} \ll 1$, it is more significant to take into account thermal scattering. A strict statistical approach is given in the Appendix. This approach leads to Eqs. (4) and (6); however, in the expression for Γ and ν_0 , thermal terms appear:

$$\Gamma^2 = (\gamma^2 - k^2) \left[\frac{\nu_0^2}{\omega^2 [1 - (\gamma/\gamma_0)^2]} + \frac{\nu_0^2}{\omega^2 [1 - (\gamma^2/\gamma_0^2) - 1]} \right] \quad (8)$$

82 MILLIMETER WAVES

$$\gamma^2 = (\gamma_0^2 - k^2) \left[\frac{\epsilon^2}{\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon^2}{\epsilon_0} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

As has already been mentioned, inclusion of these thermal terms is significant at resonance, which occurs for large $\nu_0 a$. Taking $\nu_0 a \rightarrow \infty$, we actually approach the plane case, where in the equation for Γ there is an dependency on the radius, and the dispersion equation has the form: $\Gamma^2 = 0$. This coincides with the equation obtained by Akhiezer. In practice, however, the plane case can hardly be realized.

The dependency on the ν_0 of the beam is of interest. The amplification of ordinary tubes, e.g., traveling-wave-type tubes, is greatly reduced at the short end due to the higher ν_0 of the slow-wave structure. This is connected with the fact that the high-frequency fields are concentrated close to the slow-wave structures. In the case of plasma, such reduction does not naturally exist since plasma is permeable to the electron stream, and there is no falling off of the fields influencing the efficiency of the interaction. Amplification in plasma becomes greater with higher ν_0 . This enables effective interaction to be obtained at higher frequencies with comparatively larger transverse dimensions of the electron stream.

The major conclusion is that it is necessary to create plasma concentrations greater than some critical value determined by Langmuir. We have:

$$n > \left(\frac{f}{3000} \right)^2$$

For example: if $f = 3,000$ megacycles, $n = 10^{12} \text{ 1/cm}^3$;
if $f = 30,000$ megacycles, $n = 10^{14} \text{ 1/cm}^3$.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INTERACTION BETWEEN AN ELECTRON BEAM AND PLASMA

Theoretical analysis shows that high concentrations of electrons in plasma are required to obtain amplification in the range of short wavelengths in the plasma-beam system.

The discharge gap shown in Fig. 2 was set up to permit the study of different kinds of discharges. The discharge gap consists of a heated ring-shaped cathode with an oxide coating and a ring-shaped anode standing opposite it. A discharge is fired between these two ring-shaped electrodes in the presence of mercury vapor at a pressure of some microns. The discharge current can be varied from zero to

83 ELECTRON STREAM-INTERACTION

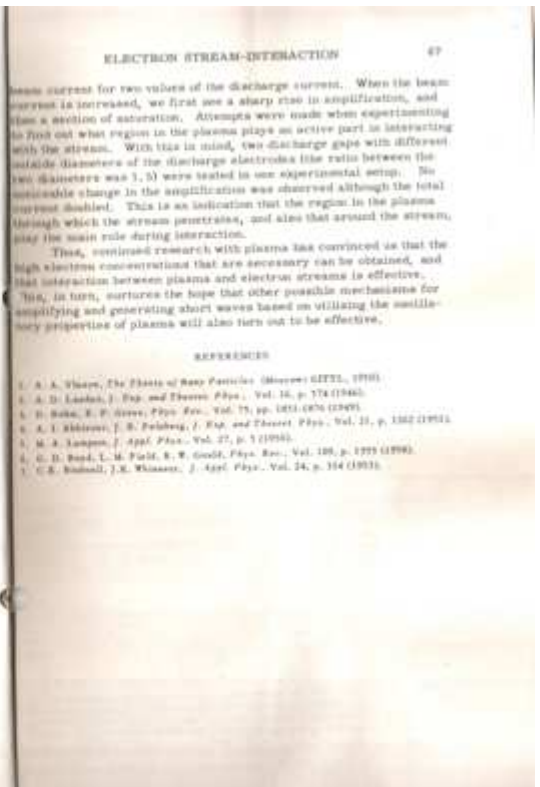
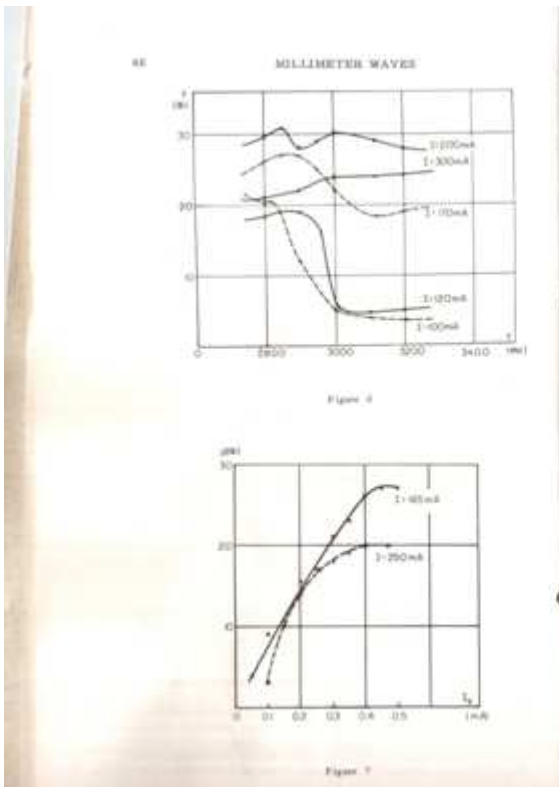
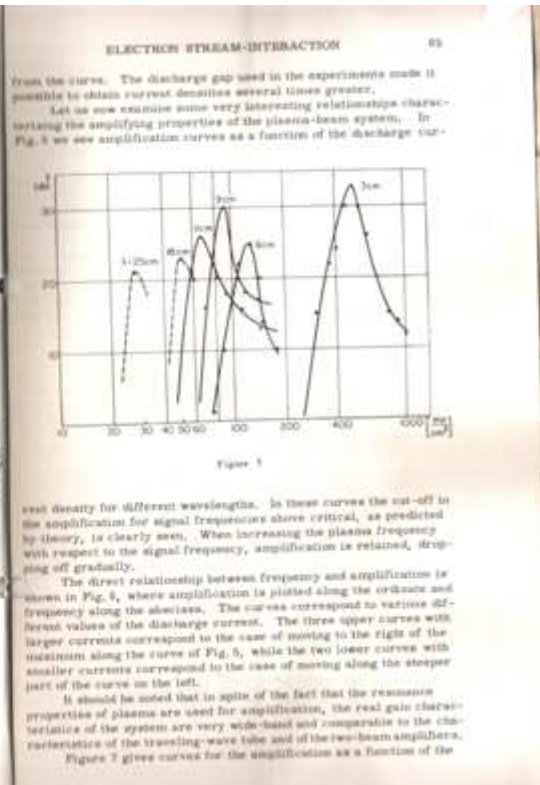
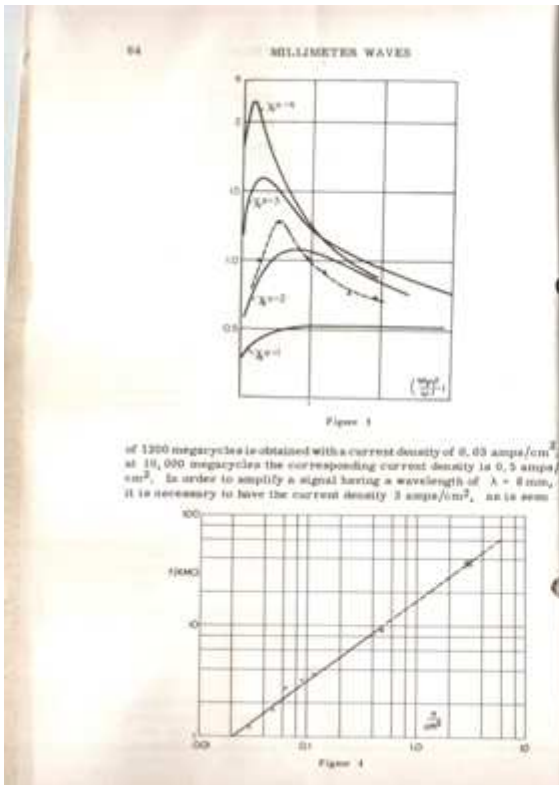
several amperes. The discharge gap was situated between magnet coils. They set up a magnetic field distribution in the region of the discharge of the kind that is used in plasma traps with magnetic mirrors. Thus, plasma with a high electron concentration was obtained and studies could be carried out on the plasma-electron stream system over a wide frequency range.

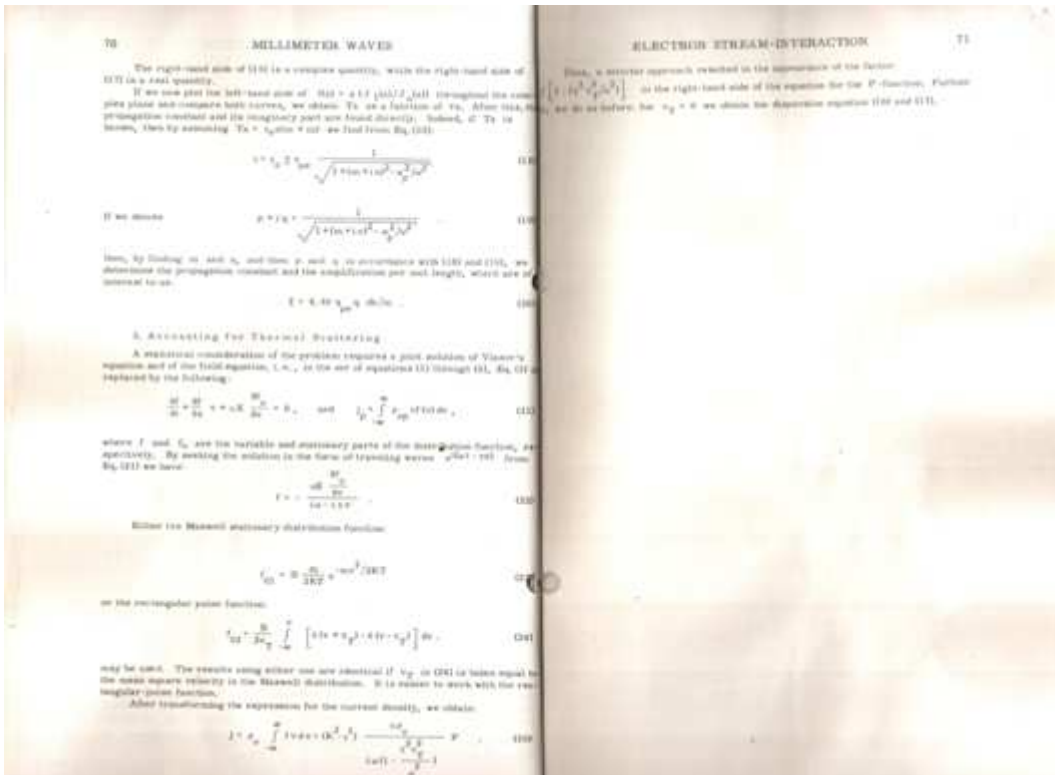
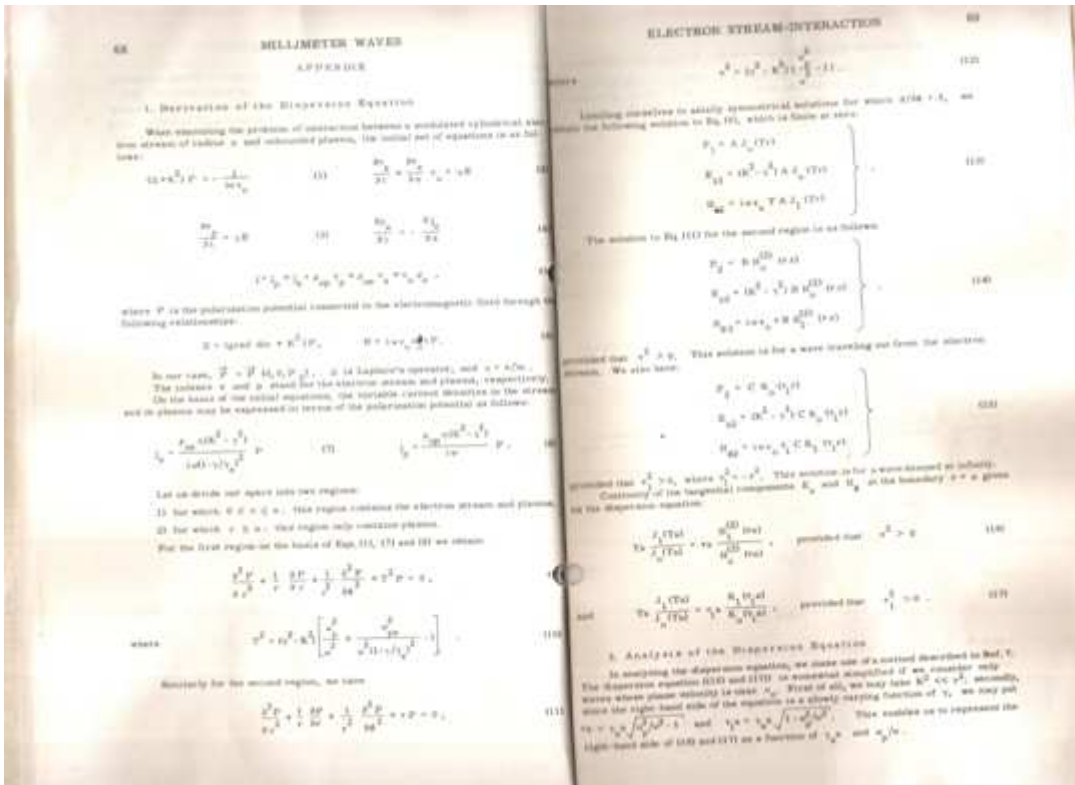
In the experimental setup the electron stream (formed by a special grid) passes through the input modulating section of the helix, then through the helix in the cathode and anode, the space where interaction occurs (filled with plasma), and finally through the output section of the helix. When the discharge is fired, the electron current collected at the end of the system remains constant. This is necessary in order to obtain reliable data on interaction between the stream and plasma. Plasma amplification from 20 to 40 db was obtained with the experimental setup described for wavelengths from 20 to 3 centimeters. Here, the discharge current amounted to 100-200 ma, while the stream current was less than 1 ma.

The relationship between the amplification and the discharge current allowed the results of the theoretical analysis to be compared with the experimental ones. Figure 3 given curves of Γ (the amplification parameter) vs $(\omega_0^2/\omega^2) - 1$.

The solid curves were calculated and stand for different values of $\nu_0 a$. The experimental curves are shown by dashed lines. It should be noted that the calculated and experimental values for maximum amplification compare well, as does the general run of the corresponding curves. Moreover, it is seen that the actual $\nu_0 a$ of the stream is the plasma gap is of the order of 2.5.

A very important curve is given in Fig. 4; it shows that plasma may be used to amplify short waves. The signal frequency in megacycles is plotted along the ordinate, and along the abscissa is plotted the current density in the discharge, which gave maximum amplification at corresponding frequencies. Maximum amplification at a frequency





В данном случае последовательность этого открытия такова: теория предсказала – эксперимент подтвердил выводы теории.

Затем последовало развитие этих исследований, результаты которых отражены в открытой печати в работах: [2] Е.В. Богданов, В.Я. Кислов, З.С. Чернов// Взаимодействие электронного потока с плазмой. РЭ. 1960. Т. 5. №

2 С. 229 – 238; [3] В.Я. Кислов, Е.В. Богданов // Взаимодействие медленных плазменных волн с потоком электронов. РЭ. 1960. Т. 5. №12.

Хочу обратить внимание аудитории на то, что экспериментальный инструментарий, как и расчётный, существенно отличался от сегодняшнего. Не было ни широкополосных анализаторов спектра, ни персональных компьютеров. В распоряжении экспериментаторов находились перестраиваемые узкополосные приёмники, а расчёты производились на механических арифмометрах. Позднее расчёты осуществлялись в Академическом расчетном центре на БЭСМ – 6, начиная только с 1967 года.

2.2. Генерация СВЧ шума в плазменной ЛОВ

В конце 1962г. была обнаружена генерация шумовых колебаний в системе плазменной ЛОВ, и наших открытых публикаций, содержащих описание экспериментов, до 1979г [4] (**Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием// РЭ. Т. 24. № 6. С.1118 - 1130**) с упоминанием о генерации шума не было. Вот как об этом событии сообщает 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 $65kT_0$. Это соответствует $2,6 \cdot 10^{-13}$ Вт/МГц. У нас же СПМШ на 8 порядков, т.е. в 100 миллионов раз больше! Т.е. 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 (**АС № 28547 с приоритетом от 15 апреля 1963г.**)



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 наткнулись на эту работу только во второй половине 70-х годов. На русский язык статья была переведена в 1981 году.

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

В данном случае последовательность открытия этого эффекта шумовой генерации такова: эксперимент обнаружил явление – теория объяснила.

По-видимому, следует объяснить молодым людям, что это за анализатор спектра ИВ-66. Так вот, это анализатор спектра 3см 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 3х 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 об СВЧ электронике, т.к. окончил факультет теоретической и экспериментальной физики МИФИ, где этот курс не читали, то вся эйфория, связанная с этим открытием, не произвела на меня *особого* впечатления. Но, начав вникать в суть проблемы, читая приведенную ранее литературу и отчёты, а также принимая участие в специфических 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 самообразованием, 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 профессиональный игрок.

Когда я поступил на работу, лаборатория вела исследования по внутренней НИР «Исследование радиофизических свойств электронно - ионной плазмы» Шифр « Финиш- АН», которую успешно окончила в декабре 1964г. Само название говорит о том, что к моменту начала работы В.Я. казалось, что основные исследования по плазменной тематике завершаются. Но, в связи с обнаружением шумовой генерации в плазменной ЛОВ, ситуация изменилась. Поэтому уже в марте 1964г, т.е. 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 -1965гг. *В дальнейшем я буду вести повествование 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 [1], я, не надеясь на свою память, просмотрел все отчёты в библиотеке 10го отдела. Поэтому воспроизвожу слово в слово часть Аннотации к отчёту по этой работе, не содержащую непубликуемой 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 во Введении: «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».

3. ГЕНЕРАЦИЯ СВЧ ШУМА В СИСТЕМЕ СПИРАЛЬ-ПЛАЗМА - ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК. (1964 – 1965гг.)

Генератор с задержанной обратной связью в виде длинного кабеля на базе мощной ЛБВ диапазона 300МГц – 600МГц непрерывного режима работы на выходную мощность 10кВт при напряжении 11кВ, наполненной рабочим газом. Получен режим генерации шумовых полос с $\Delta f = 1.5\text{МГц}$ $\Delta f_{\text{ш}} = 1\text{МГц}$ с выходной мощностью 0.5кВт в непрерывном режиме при напряжении 6кВ и токе 1А.

Руководители ИРЭ и Аксель Иванович Берг и затем 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 коллажом 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, В.Я. Кислов придумал сделать её на базе промышленной **мощной** ЛБВ («Веснянка»). 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 10кВт и напряжение 11кВ. Поэтому вместо поглотителя между модулирующей и выходной секциями промежутки дрейфа организован за счёт вывода мощности с выхода 1ой секции на внешнюю нагрузку, охлаждаемую водой. Такая же нагрузка установлена на входе 2ой секции для устранения усиления отражений от выходного вывода энергии. На выходе лампы размещался специфический направленный коаксиальный ответвитель, охлаждаемый водой с ответвлением в «плечо» - 35дБ. Он был предназначен для измерительных целей. Диапазон лампы был 300МГц – 600МГц. *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 6кВ) и токе (до 1А). В этой связи и коэффициент усиления у неё был не высоким. Лампа работала в магнитной фокусирующей системе в виде соленоида с величиной фокусирующего поля ~ 400Гаус с экранированной от поля электронной пушкой.

Тем не менее, генератор, созданный на её основе, путём подачи части мощности с выхода на её вход с помощью дополнительного ответвителя и коаксиального кабеля разной длины (30м, 60м, 90м) за счёт подбора давления рабочего газа и напряжения замедляющей системы генерировал сигнал со спектром в полосе усиления ЛБВ в виде шумовых полос. С кабелем РК-2 длиной 60м (задержка в 300нсек) расстояние между ними было 1.5МГц, а их ширина 0.5МГц. Интегральная мощность генерируемого сигнала в непрерывном режиме была 0.5кВт. **Такой спектр тоже устраивал Заказчика, но, всё-таки, желательно было уменьшить «дыры» между шумовыми полосами.**

Как не 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. *Не обошлось без небольшого ЧП частного порядка.....*

Отчёт о работе ФТИ был также предъявлен комиссии как Приложение к основному отчёту ИРЭ АН СССР. *И здесь при демонстрации работы генератора на ЛБВ «Веснянка» также не обошлось без небольшого ЧП.* Работа была предъявлена Заказчику с выполнением всех пунктов ТЗ и принята с рекомендациями о необходимости продолжения исследований.

4. ШУМОТРОН (1966-1967гг.)

Но работа и так продолжалась. Потерпев такое фиаско из – за того, что работавшая не в оптимальном режиме **мощная** ЛБВ («Веснянка») имела малое усиление, (а именно с этим связывали тогда получение только дискретного спектра) решили проверить возможность возбуждения многочастотного сигнала и сближения собственных частот в генераторе, состоящем из маломощной ЛБВ 10 см диапазона с усилением 30-35дБ и того же длинного кабеля переменной длины. Цель эксперимента была в выяснении соотношения между предельной длиной кабеля, т.е. 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 1966г. – декабрь 1967г.)



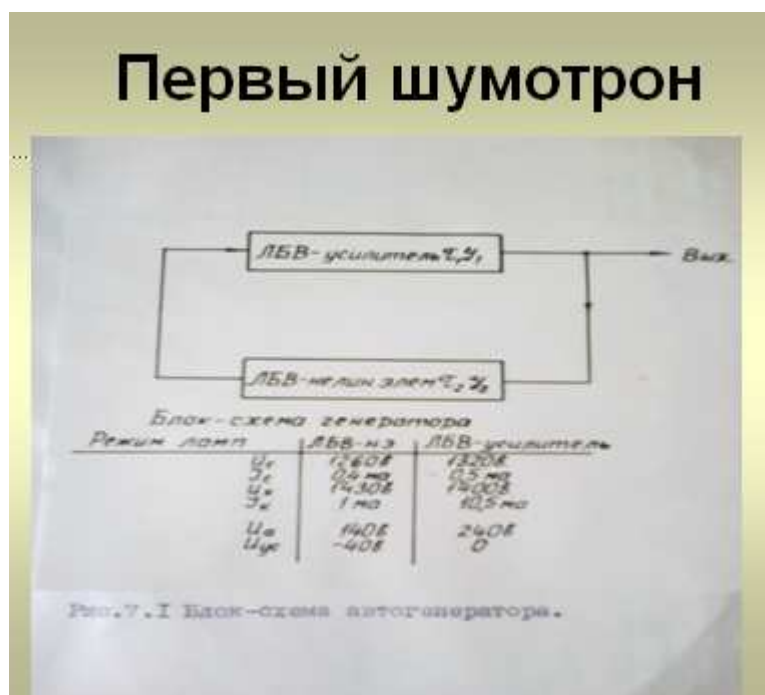
В.Я. Кислов поручил провести это моделирование мне, так как я был ответственным за стенд с мощной ЛБВ. Нужно было понять, что ещё можно сделать, чтобы попытаться улучшить спектр шумовой генерации.

Хочу заметить, что в лаборатории было не более 3-х пакетированных в магнитную систему ЛБВ малой мощности ($P_{\text{вых}} = 1\text{Вт}$). 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 до насыщения по выходу она добирается при входном сигнале порядка 1мВт. 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 аттенюатор с дискретным ослаблением 0дБ, 5дБ, 10дБ, 15дБ. Ну и начал включать *те же отрезки кабеля* в цепь обратной связи. Осторожно изменяя ослабление аттенюатора, 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 («Веснянкой») без плазмы.

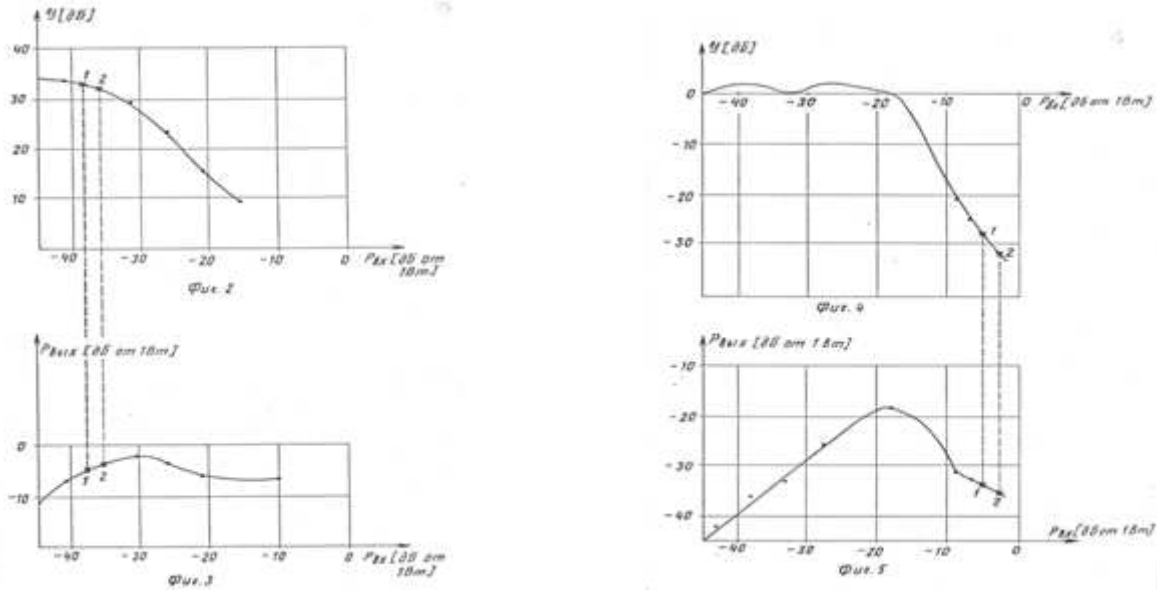
В процессе эксперимента ослабление аттенюатора на входе первой лампы можно было уменьшать (в соответствии с измерением мощности входного сигнала), снижая рабочий ток 2ой ЛБВ, т.е. уменьшая усиление. В конце концов, аттенюатор был удалён, а в этой ЛБВ пришлось *существенным образом снизить рабочий ток до 1мА, вместо 10мА по паспорту. В таком режиме работы усиление её было близко к 0. Таким образом, оказалось*

возможным использовать самый короткий отрезок кабеля, т.е. 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 аттенюатора на её входе, выводя его даже в «0». И вот, когда это в первый раз случилось, 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 существенно улучшилась, хотя расстояние между максимумами существенно увеличилось. Схема первого шумотрона приведена на рисунке с режимами работы ламп.



Не говоря пока никому об этих событиях, я измерил амплитудные характеристики обеих ламп на одной из частот диапазона. Они представлены на графиках, присутствуют, естественно, в Заявке на изобретение, в моей диссертации и в статье: **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 - 2168.**

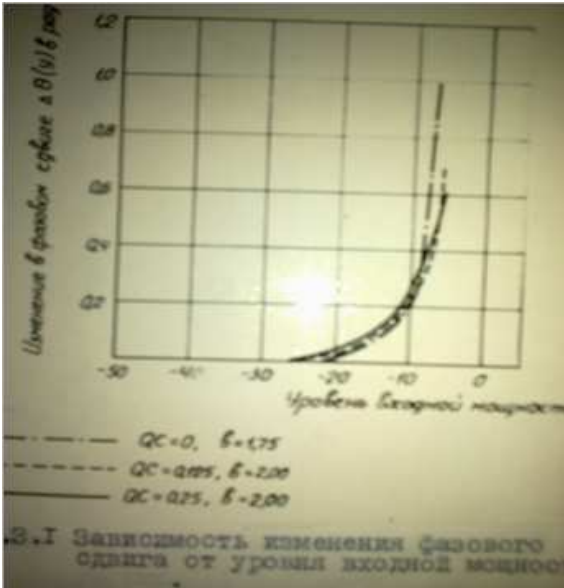


После этого пошёл к В.Я. с докладом. То, что всё в этом режиме определяет ЛБВ – нелинейный элемент сомнений не было. Но что заставляет систему генерировать шумовой сигнал с непрерывным спектром?

В данном случае, как и в случае с плазменной ЛОВ, последовательность событий этого открытия такова: эксперимент обнаружил, а теория призвана объяснять причину наблюдаемого явления.

Было проведено бесконечное число дискуссий по этому поводу и между авторами и внутри отдела, 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. И возникать она должна в нелинейном режиме работы ЛБВ. И такая возможность, как показал в работе «*Nonlinear Electron Wave Interaction Phenomena*» *E. Row* имеет место в ЛБВ, так как существует нелинейный набег фазы, зависящий от амплитуды сигнала.

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 бифуркации удвоения периода, а спектр сигнала обогащается модуляционными частотами. 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

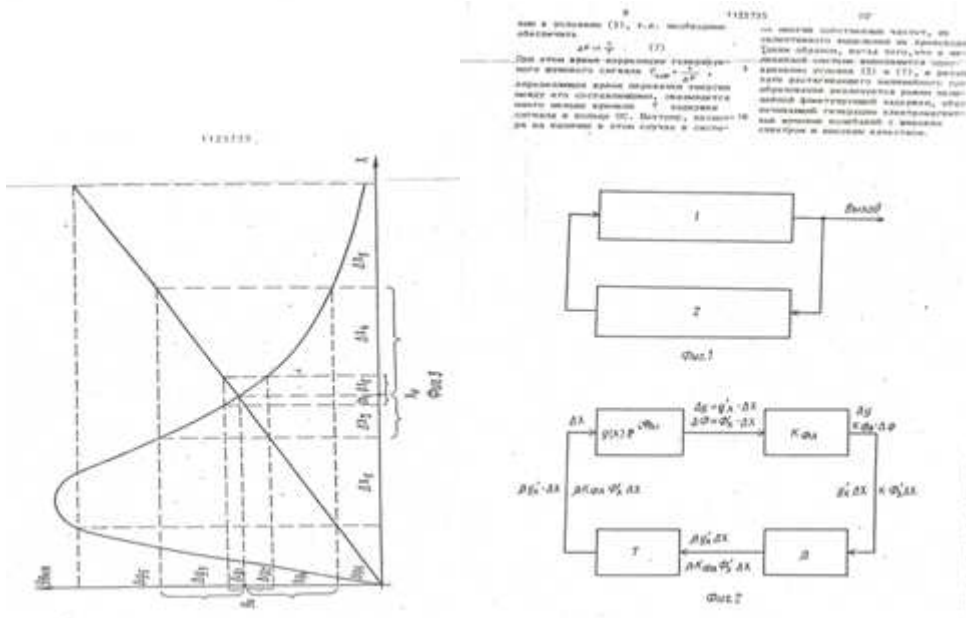
выявлены и исследованы позднее. **Закрытая заявка №984513/18-09 на изобретение была подана 22 июня 1967г. А.С. № было получено. Суть этой заявки, которую с большим трудом удалось рассекретить, представлена в открытом виде двумя А.С. на способ и его реализацию - генератор.**



Формула изобретения

- Генератор сврхвысокочастотных шумовых колебаний на активных элементах типа «О» или «М» в виде усилителя с замкнутой кольцевой обратной связью, отличающийся тем, что с целью получения широкополосного прямошумового сигнала, в упомянутую цепь обратной связи усилителя дополнительно включён активный элемент, например лампа бегущей волны, установленный в режим нелинейной флюктуирующей задержки с резкой зависимостью фазы от мощности электромагнитных колебаний.

Авторское свидетельство на генератор

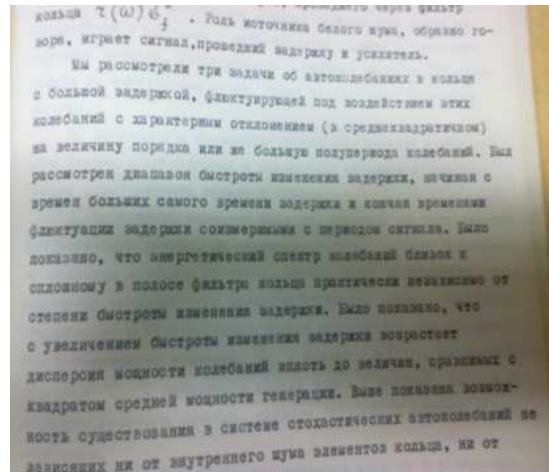


Авторское свидетельство на способ генерирования

Естественно, к исследованию этой версии объяснения подключился теоретик Всеволод Николаевич Данилов. Он исследовал в этой работе возможность хаотизации колебаний в кольцевой системе с фильтром и задержкой при её медленном и быстром изменении и показал, что в обоих случаях такая возможность реализуется. В этой НИР ещё присутствовали исследования плазменных систем, но уже с 1968 г. вся лаборатория переключилась на исследования работы шумотронов разных диапазонов и выходных мощностей.

Теоретическая модель В.Н.Д.

- Рассматривается кольцевая система, состоящая из 4-х элементов: источника шума η и сигнал на его выходе f_η , фильтра K с передаточной функцией $K(i\omega)$ и f_k , задержки T и f_T , нелинейный усилитель $\Gamma(f_T)$ и f_Γ , где $f_T = f_k(t-T)$, $f_\Gamma = \Gamma(f_T)$, $f_\eta = f_\Gamma + \eta$, $f_k = L_T f_\eta$.
- $L_T \exp(i\omega t) = [1/K(i\omega)] \exp(i\omega t)$, где L_T - диф. оператор фильтра. Положим $f = f_k$
- $L_T f - \Gamma[f(t-T)] f(t-T) = \eta(t)$ (1)
- $T = T_0 + \theta[f(t-T)]$, (2)
- где $\psi = \theta[f(t-T)]$ – переменная часть задержки и θ – заданная функция f ,



5. ПРОДОЛЖЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ (1968-1980гг.)

Дальнейшие исследования были направлены как на изучение механизма генерации СВЧ шума, так и на создание устройств для конкретных применений. Хочу отметить, что в 1965 году наши теперешние партнёры (США) ввели в Южный Вьетнам войска для поддержки борьбы правительственных войск с партизанами (Вьетконгом). Естественно, СССР помогал оружием Северному Вьетнаму, а тот, в свою очередь, партизанам.

Начиная с 1967 года, интервенты начали бомбить города Северного Вьетнама. Так вот постановщики помех задавили 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. 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 заниматься более детальной разработкой моделей. Я не могу рассказывать о деталях внедрения шумотрона в системы. Скажу только, что на предприятии Радиопрома в период с 1970г. была поставлена ОКР и созданная в результате её выполнения система была принята на вооружение.

Хочу заметить, что информация, которая в деталях присутствовала в зарытых отчётах и закрытой печати, в общем виде становилась достоянием, во-первых, сотрудников других лабораторий отдела, во-вторых, должны были печататься аспиранты В.Я., и, наконец, В.Я., чтобы привлечь внимание

Заказчиков на всяких закрытых НТС, рекламировал результаты в присутствии представителей других организаций. Но 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 Диссертацией, посвящённой формированию и фокусировке различных электронных потоков. Диссертацию эту он успешно защитил в 1969 г., получив 28.01.1970г. утверждение ВАК. Защита проходила в Нижнем Новгороде, где его радушно принял и оставил ночевать М.И. Рабинович. С ним-то В.Н. и поделился трудностями, возникающими при рассмотрении модели амплитудной неустойчивости и связи её с изменением задержки в контуре генератора, приводящей к генерации шума. И пока мы не могли публиковать результаты своих исследований, в открытой печати начали появляться и нарастать как снежный ком публикации, посвящённые как генераторам с обратной связью, так и этому явлению. *Вот неполный список публикаций на эту тему.*

1.Заславский Г.М., Чириков Б.В./УФН 1971

2.Ruelle D., Takens . On the Nature of Turbulence.// Comm. Math. Phys. 1971.

3.Рогашкова А.И. , Дихтяр В. Б., Рогашков С.А.Спектр колебаний в автогенераторе с запаздывающей обратной связью.//РЭ 1973. Т18. №5. С.1075-1077.

4.Дихтяр В.Б., Анализ влияния формы частотной характеристики и усиления на тип колебаний, формируемых автогенераторами с внешней запаздывающей обратной связью. // РЭ. 1973. Т22. №5 С.969 -977.

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

За период с 1970 г. по 1980 г. в лаборатории по этой тематике защитили кандидатские диссертации, кроме меня, еще три человека: Ю.В. Анисимова, В.Б. Дихтяр, Г.М. Воронцов, а В.Я. Кислов в 1978 году 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.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог моему повествованию, можно, не боясь ошибиться, утверждать, что результаты исследования генерации СВЧ шума, проведенные в ИРЭ АН СССР под руководством В.Я. Кислова по

нелинейной хаотизации колебаний в электронно – волновых системах с запаздыванием, явились основой нового научного направления. Это направление-«нелинейная хаотическая динамика автоколебательных систем». Действительно, в конструкции шумотрона был выделен элемент, который однозначно указывал на причину хаотизации колебаний в ЛБВ с задержанной обратной связью, т.е. на 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, а во- вторых, искать и находить новые схемы его реализации, например, на основе твердотельной элементной базы.