

УДК 621.371

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Е. В. Галузо, В. И. Канавец

(кафедра радиофизики СВЧ)

Введение. В радиофизике СВЧ и квантовой радиофизике широко рассматривается распространение электромагнитных волн в активных резонансных средах, состоящих из большого числа возбужденных нелинейных осцилляторов [1]. В диапазоне СВЧ особое место занимают среды, состоящие из классических осцилляторов, которыми могут быть циклотронные осцилляторы в плазме и электронных пучках, атомы и молекулы на высоких уровнях энергии, колебательные контуры с нелинейными отрицательными сопротивлениями в радиотехнике и т. д.

Физические процессы в активных и пассивных резонансных средах можно моделировать с помощью нелинейных активных резонансных линий передачи радиодиапазона [2]. Линии передачи представляют и самостоятельный интерес, так как могут быть использованы в качестве распределенных генераторов, узкополосных усилителей и т. д.

При определенных ограничениях колебания и волны в активной резонансной линии могут описываться уравнениями, аналогичными уравнениям Максвелла. Резонансные контуры, включенные в линию и содержащие отрицательные сопротивления, играют роль возбужденных нелинейных осцилляторов. Их связь через линию передачи аналогична связи между молекулами через поле излучения в активной квантовой среде [1]. Зависимость отрицательного сопротивления контура от частоты имеет резонансный характер. Отстраивая собственную частоту от частоты синхронных колебаний в линии, можно, меняя активные и реактивные параметры системы в зависимости от координаты, тем самым моделируя пространственно неоднородную среду.

Процессы в активных резонансных средах могут приводить к образованию нескольких видов диссипативных структур — неравновесных состояний с высокой степенью упорядоченности [3]. Предпосылкой для этого является кооперативное (синхронное) поведение подсистем (осцилляторов), моделировать которое желательно с помощью активных линий передачи.

Из-за большой сложности процессов в активных резонансных линиях теоретический анализ их можно проводить только с помощью численных методов [4—6].

1. Проблемы моделирования. Моделирование волновых и колебательных процессов обычно производится с помощью активной резонансной линии передачи, содержащей нелинейные сопротивления R_n или проводимости G_n : $R_n = R_0 + R_1 i + R_2 i^2 + \dots$; $G_n = G_0 + G_1 U + G_2 U^2 + \dots$. Величины R_n и G_n могут принимать как положительные, так и отрицательные значения при R_0 , $G_0 < 0$. Последнее может приводить или к усилению колебаний, поступающих на вход линии, или к самовозбуждению системы. Линия, как правило, дискретна, число ее звеньев и параметры определяют ограниченную протяженность и неоднородность эквивалентного резонансного слоя. Колебательные степени свободы моделируются резонансными контурами (рис. 1), связанны-

ми с линией активными или реактивными элементами $Z_{св}$. При замене $Z_{св}$ малой емкостью $C_{св}$, $R_{св}$ или $L_{св}$ приходим к различным моделям активных сред, обсужденным в работе [6].

В настоящей работе рассматриваются линии передачи с активными резонансными элементами, связанными с линией через сопротивления или емкости.

2. Экспериментальная установка (линия передачи с нелинейными резонансными элементами, состоящими из автогенератора (АГ) и генератора шума).

Линия передачи представляет собой фильтр нижних частот, состоящий из 57 ячеек (см. рис. 1). Основные параметры линии, соответствующие параметрам численного эксперимента [6], следующие: $C_{л} = 120$ пФ, $L_{л} = 9,6$ мкГ, $G_{л} = 0,147 \cdot 10^{-3}$ Ом $^{-1}$, $f_{кр} = 9,4$ МГц — критическая частота, $R_0 = R_N = 288$ Ом — волновое сопротивление. На частотах 1,6—4,0 МГц связь между индуктивностями слабо влияет на свойства линии. Линия слабо неоднородна из-за разброса параметров $L_{л}$ и $C_{л}$, нарушения симметрии в расположении элементов, взаимной связи резонансных элементов.

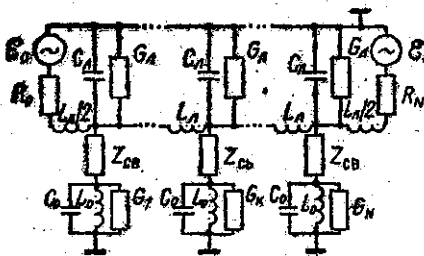


Рис. 1. Схема линии передачи с дополнительными резонансными элементами

Для ослабления волн, отраженных от неоднородностей, в каждую ячейку линии была включена малая проводимость $G_{л}$. Без резонансных элементов КСВ линии составляет 1,09, с введением их КСВ увеличивается.

Для измерений использовался панорамный спектроанализатор С4-8, измерения велись в условных единицах шкалы прибора. Спектроанализатор подключался через емкость $C \approx 20$ пФ, чтобы уменьшить его влияние на исследуемую цепь. Внешний сигнал подавался с генератора ГСС-6А через сопротивление $R = 400$ Ом. После настройки линии при учете всех неоднородностей было достигнуто значение КСВ $= 1,25$.

В линии при отсутствии связи сдвиг фазы на ячейку дается выражением $\Delta\varphi = \arccos(1 - \omega^2 L_{л} C_{л} / 2)$. На частоте $f/f_{кр} = 0,38$, где f — частота сигнала, на длине волны укладывается 8 ячеек линии. Согласование линии на концах осуществлялось с помощью переменных сопротивлений $R = 0-470$ Ом.

Резонансными элементами служили цепи с трансформаторной обратной связью, включающие полупроводниковые триоды. Последние следует рассматривать как нелинейные четырехполюсники, коэффициенты передачи, входные и выходные сопротивления которых являются нелинейными функциями токов и напряжений. Резонансный контур помещен в цепь коллектора (рис. 2). Отношение витков в первичной и вторичной обмотках трансформаторов на ферритовых кольцах Ф-200 составляет 50 : 10. При определенных условиях цепь самовозбуждается. Собственная частота автоколебаний, нормированная на критическую частоту линии, лежит в пределах 0,22—0,25.

Особенность АГ состоит в том, что в качестве нелинейной емкости используется запертый $p-n$ -переход (см. рис. 2). Величина его емкости зависит от приложенного напряжения, что позволяет использовать эту емкость как электрически управляемую реактивность для частотной модуляции частоты генератора шумом. Можно также осуществлять электрическое управление частотой АГ. В качестве нелинейной емкости

использовались варикапы КВ102В. АГ узкополосны, и поскольку разрешение спектроанализатора С4-8 не позволяет заметить сужение спектральной линии, ее приходится уширять приблизительно в 5 раз с помощью генератора шума.

Для определения параметров АГ его схема (см. рис. 2) заменяется эквивалентной схемой (рис. 3), для которой запишем уравнения

$$i_s r = U_s = M \frac{di_L}{dt} - L_1 \frac{di_s}{dt};$$

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = \frac{1}{C} \int i_c dt + M \frac{di_s}{dt},$$

где $r = f_1(U_s)$, $\alpha' = f_2(U_s)$ — нелинейные функции. Для узкополосных генераторов всегда справедливы условия: $L_1 \frac{di_s}{dt} \ll M \frac{di_L}{dt}$, $M \frac{di_s}{dt} \ll \ll L \frac{di_L}{dt}$. Учитывая это, легко получить уравнения для напряжения

$$\frac{dU_s}{dt} + \frac{1}{L} \left(R - \frac{\alpha'}{r} \frac{M}{C} \right) U_s + \frac{1}{LC} \int U_s dt = 0.$$

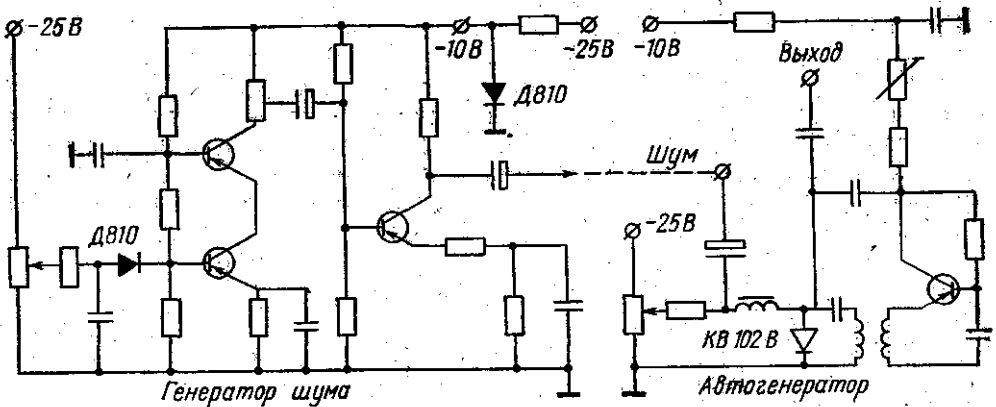


Рис. 2. Схема АГ с генератором шума

Так как $U_s = M di_L/dt$ и контур генератора имеет высокую добротность, $U_s = MU_K/L$. Можно сделать следующие простые преобразования:

$$\frac{\alpha'}{r} = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_s} \frac{\Delta i_s}{\Delta U_s} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_s} \frac{1}{R_H} = \frac{\beta}{R_H},$$

что позволяет заменить две нелинейные зависимости одной, где $\beta = \Delta U_K/\Delta U_s$. Проводя сравнение с канонической схемой АГ (см. рис. 1), можно получить связь между G_K и β :

$$\beta = \beta_0 + aU + bU^2, \quad G = G_0 + G_1U + G_2U^2,$$

откуда следует

$$G_0 = \frac{C}{L} R - \frac{M}{LR_H} \beta_0, \quad G_1 = -\frac{M}{LR_H} a, \quad G_2 = \frac{M}{LR_H} b.$$

Схема генератора шума представлена на рис. 2. В качестве источника шума использовались стабилитроны Д810 в режиме ла-

винного пробы, удовлетворяющие основным требованиям, предъявляемым к миниатюрным генераторам белого шума. Такие шумовые генераторы позволяют увеличить ширину спектральной линии в 10 раз.

3. Сравнение результатов теории и эксперимента. Рассматривался ряд процессов, происходящих в линии передачи с включенными в нее АГ, в том числе взаимная и принудительная синхронизация АГ, усиление внешнего сигнала.

При включении одного АГ в линию через сопротивление $R_{св} = 2$ кОм и в отсутствие ЭДС на концах линии в обе стороны от АГ распространялись бегущие волны.

Была исследована связь двух АГ, расположенных в соседних ячейках линии и связанных с ней через сопротивление $R_{св} = 2$ кОм. Частоты АГ совпадали: $f_1 = f_2 = 0,24$. Наблюдалось сужение спектральной линии АГ приблизительно в 1,8 раза. Численными методами при тех же параметрах было получено сужение в 2 раза [6]. Под воздействием внешнего сигнала на частоте $f_c = 0,27$ (сигнал находится в пределах полосы синхронизации) спектральная линия двух синхронизованных генераторов сужалась дополнительно. Процесс синхронизации АГ иллюстрируется рис. 4.

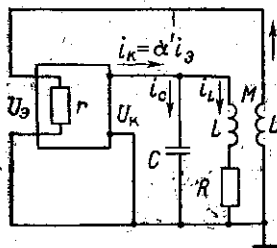


Рис. 3. Эквивалентная схема АГ

Будем рассматривать излучение активного слоя, состоящего из 7 АГ, включенных в линию через сопротивления $R_{св} = 2$ кОм и настроенных так, что на границах активного участка их частоты равны собственной частоте колебаний АГ, а по мере приближения к центру активного участка расстройка возрастает: $f_1 = f_7 = 0,23$, $f_2 = f_6 = 0,24$, $f_3 = f_5 = 0,25$, $f_4 = 0,26$. На границах активного участка отрицательное

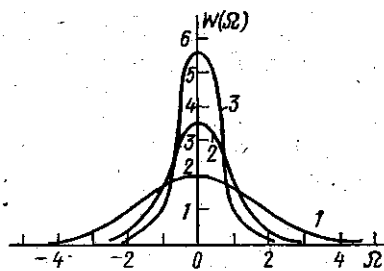


Рис. 4. Синхронизация АГ при связи с линией передачи через сопротивление: 1 — спектр свободного АГ; 2 — спектр двух взаимно синхронизованных АГ; 3 — спектр двух АГ при синхронизации внешним сигналом

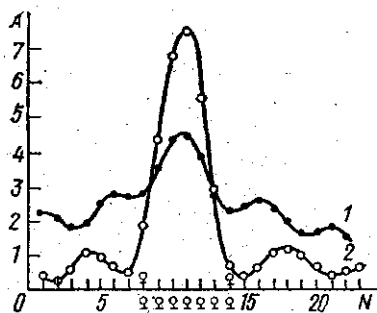


Рис. 5. Излучение активного слоя (А — амплитуда напряжения в линии передачи в относительных единицах шкалы прибора, N — номер ячейки в линии, \odot — ячейка с АГ: 1 — слой из 7 АГ, 2 — два АГ, включенные через 5 ячеек

сопротивление максимально, к центру оно уменьшается. Волна, идущая от центра, отражалась внутрь активного участка, происходило взаимодействие встречных волн. Энергия сосредоточена на активном участке, излучение из него мало (рис. 5, 1) [6]. Результат, описанный выше, можно получить, не вводя расстроек в АГ. Для этого два АГ, настроенные на частоту 0,26, включались в линию через 5 ячеек, $R_{св} = 2$ кОм.

Сдвиг фаз на ячейку линии составляет $\pi/6$, а на границах активного участка π . Таким образом, на границах активного участка колебания вычитались, а внутри него складывались (рис. 5, 2). Аналогичные результаты были получены численно [6].

Режим усиления внешнего сигнала в активной среде при связи АГ с линией через емкость может служить примером образования неоднородной диссипативной структуры. Активный участок состоит из двух АГ с частотами $f_1 = f_2 = 0,24$, включенных в соседние ячейки линии через емкости $C_{св} = 51$ пФ. В отсутствие внешнего сигнала АГ излучают равномерно в обе стороны. При подаче внешнего сигнала на частоте $f_0 = 0,27$ (сигнал находится в пределах полосы синхронизации) АГ ведут себя аналогично до тех пор, пока амплитуда внешнего сигнала не превысит некоторой критической величины, при которой генераторы синхронизируются внешним сигналом и переходят от режима равномерного излучения в обе стороны к излучению в направлении распространения внешнего сигнала. Формирование структуры в этом случае происходит скачком в результате фазового перехода, при этом степень симметрии уменьшается. Коэффициент усиления α определяется как отношение суммарной амплитуды напряжения (сигнал воздействует на АГ) к сумме амплитуд внешнего сигнала и синхронизованных АГ: $\alpha = A_z / (A_{гс} + A_{г})$. При $\alpha > 1$ имеем усиление, при $\alpha < 1$ — поглощение внешнего сигнала. Усиление растет с увеличением числа АГ и зависит от их амплитуды: при увеличении амплитуды улучшаются условия синхронизации; при достижении определенного значения все АГ синхронизованы, наступает насыщение усиления; при дальнейшем увеличении амплитуды модуль отрицательной проводимости $(G_0 + G_2 U^2)$ уменьшается, проходит через 0 и проводимость становится положительной, что соответствует поглощению внешнего сигнала.

Таким образом, с помощью радиотехнической линии передачи удается провести моделирование ряда режимов, относящихся к образованию диссипативных структур и перспективных для практического применения. Экспериментальная модель подтверждает правильность расчетов, полученных численными методами. Она является действующей моделью распределенного усилителя или генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К. Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1967, 10, № 9—10, с. 1414. [2] Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов. радио, 1977. [3] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир, 1979. [4] Канавец В. И., Стабинис А. Ю. Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1972, 15, № 8, с. 1264. [5] Канавец В. И., Стабинис А. Ю. Радиотех. и электроника, 1972, 17, № 10, с. 2124. [6] Галузо Е. В., Канавец В. И. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1983, 24, № 5, с. 27.

Поступила в редакцию
27.09.82