

УДК 538.574.6

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГЕНЕРАТОРЕ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ***Г. С. Воробьев, А. И. Цвык*

Приведены результаты экспериментальных исследований гистерезисных явлений в энергетических и частотных характеристиках генератора дифракционного излучения (ГДИ) миллиметрового диапазона длин волн. Рассмотрены случаи возбуждения генератора в мягком и жестком режимах при наличии одного вида СВЧ колебания или нескольких колебаний, близких по частоте. Впервые проанализированы наблюдаемые в ГДИ явления типа контурного гистерезиса.

Одной из актуальных задач, возникающих при исследовании приборов типа ГДИ [1], является анализ нелинейных процессов, которые ограничивают КПД и мощность генерации, вызывают в энергетических и частотных характеристиках ряд нежелательных эффектов, в частности гистерезисные явления, асимметрию характеристик, ухудшение качества спектра СВЧ сигнала. В этом плане в последние годы появилось несколько теоретических и экспериментальных работ [2-5], в которых нелинейные процессы рассматриваются применительно к отдельным характеристикам ГДИ, что в некоторых случаях не позволяет выявить специфических особенностей изучаемого эффекта (в частности, слабо изучены гистерезисные явления при многочастотном режиме генерации и поведении спектра в областях неустойчивости колебаний). Поэтому научный и практический интерес представляют комплексные исследования энергетических, частотных и спектральных характеристик колебаний при проявлении гистерезисных эффектов.

В данной работе приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований одночастотного и многочастотного режимов возбуждения ГДИ четырехмиллиметрового диапазона длин волн со сфероидальным и сфероцилиндрическим открытым резонаторами, на плоском или же цилиндрическом (вдоль его образующей) зеркалах которых располагалась дифракционная решетка [1]. Радиус кривизны сферических зеркал составлял  $R = 110$  мм, апертура зеркал — 55 мм. Электронный поток сечением  $(0,2 \times 5)$  мм<sup>2</sup> формировался диодной электронной пушкой и фокусировался постоянным полем электромагнита. Щель связи размером  $(0,05 \times 3,6)$  мм<sup>2</sup> располагалась в центре сферического зеркала и обеспечивала минимальное влияние нагрузки на характеристики генератора. Условия возбуждения ГДИ в одночастотном или же многочастотном режимах определялись путем исследования спектров колебаний, используемых в эксперименте открытых резонаторов при изменении расстояния между зеркалами ( $H$ ), а различная сгущенность спектра для заданного интервала  $H$  достигалась вариацией размеров зеркал ( $L$ ) по оси пучка.

**1. Одночастотный режим возбуждения ГДИ.** В процессе экспериментальных исследований одночастотного режима возбуждения ГДИ установлено, что изменение мощности, крутизны электронной перестрой-

ки частоты, ширины спектральной линии СВЧ сигнала и степень проявления гистерезисных эффектов определяются областью пространства взаимодействия и типом возбуждаемого колебания, соотношением между рабочим ( $I$ ) и пусковым ( $I_{\text{п}}$ ) токами, величиной магнитного поля и другими факторами. Характерной особенностью таких колебаний ГДИ в зоне электронной перестройки является асимметрия энергетических и частотных зависимостей относительно точки максимальной мощности ( $P_{\text{max}}$ ). При этом для большинства колебаний в длинноволновой области зоны генерации наблюдается плавное нарастание мощности с увеличением напряжения  $U_0$  (мягкий режим возбуждения генератора), а в коротковолновой — резкий срыв колебания (жесткий режим генерации), где обычно проявляются гистерезисные явления. Ширина зоны генерации ( $\Delta U_0$ ) и гистерезисной петли ( $\delta U$ ) зависит от длины волны возбуждаемых колебаний и соотношения  $I/I_{\text{п}}$ . Для большинства колебаний при токах  $I = (1,1 \div 1,2) I_{\text{п}}$  наблюдается слабое проявление гистерезисных эффектов. С ростом электронного тока увеличивается интервал  $\Delta U_0$  и абсолютное значение ширины петли гистерезиса. Однако относительное значение  $\delta U/\Delta U_0$  для  $I \gtrsim 2I_{\text{п}}$  практически остается неизменным. Это наглядно видно из рис. 1а, где для колебания с частотой  $f_0 = 72,8$  ГГц ( $H/R = 0,24$ ;  $L = 30$  мм) и для различных значений параметра  $I/I_{\text{п}}$  показаны зоны генерации ГДИ по мощности (в относительных единицах  $P/P_0$ ), электронная перестройка частоты ( $f$ ) и ширина спектральной линии СВЧ сигнала ( $\Delta F$ ), измеряемые при токе  $I = 3,2I_{\text{п}}$  (для других  $I$  эти зависимости имеют аналогичный вид). С увеличением тока пучка зоны генерации уширяются,

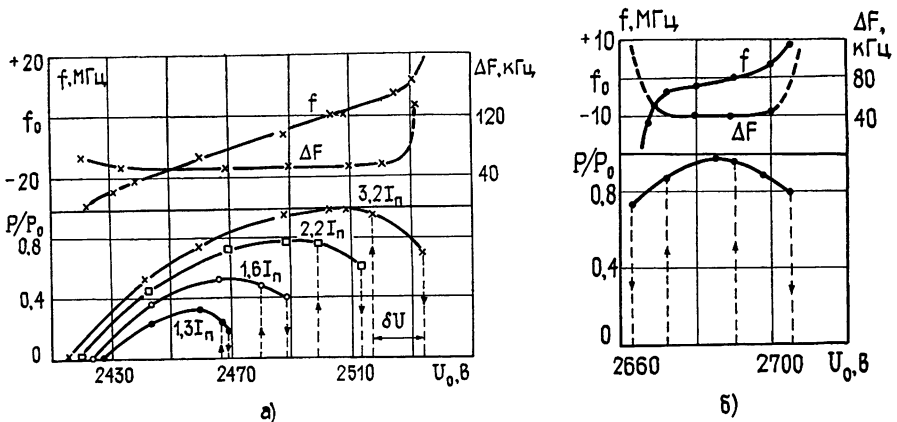


Рис. 1.

а максимум мощности сдвигается в коротковолновую область, где примерно на уровне  $0,7 P_{\text{max}}$  наблюдается резкий срыв колебания с проявлением гистерезисного эффекта. Крутизна электронной перестройки частоты колебания незначительно зависит от величины тока пучка и в пределах зоны генерации имеет, в основном, линейный характер. Ширина спектральной линии примерно остается постоянной и составляет  $50$  кГц за время анализа  $0,3$  с. Значительное уширение спектра происходит в областях неустойчивости колебаний и проявления гистерезисных эффектов, где существенно увеличивается крутизна электронной перестройки частоты. Наблюдаемые на рис. 1а асимметрия зоны генерации и гистерезисные эффекты непосредственно связаны с нелинейными процессами, протекающими в приборах с длительным взаимодействием [2, 3, 6]. Отметим, что для таких колебаний гистерезис по частоте практически отсутствует.

При возбуждении высших типов колебаний в открытом резонаторе (например,  $TE_{M_{21q}}$ ) характер изменения зоны генерации и электронной перестройки частоты может существенно отличаться от приведенных на рис. 1а. Такие колебания имеют более высокие значения пусковых токов, и возможны случаи, когда при относительно малом  $I/I_{\text{п}}$  генератор возбуждается только в жестком режиме с проявлением гистерезисных эффектов в длинноволновой и в коротковолновой областях зоны генерации (рис. 1б;  $I = 1,3 I_{\text{п}}$ ). Это явление может быть связано как с увеличением количества вариаций СВЧ поля вдоль пространства взаимодействия [1], так и с появлением низкочастотного конкурирующего колебания при сгущении спектра открытого резонатора.

**2. Многочастотный режим возбуждения генератора.** Возможность возбуждения ГДИ в многочастотном режиме определяется как геометрическими параметрами электродинамической системы, так и электрическими, в частности величиной  $I/I_{\text{п}}$ . Путем изменения параметра  $I/I_{\text{п}}$ , расстояния между зеркалами и размеров их по оси пучка электронов можно получать различную сгущенность спектра колебаний и выделить одночастотный и многочастотный режимы возбуждения ГДИ. В частности, для исследуемой электродинамической системы при  $L = 30$  мм наибольшая вероятность возбуждения высших типов колебаний, близких по частоте генерации и ускоряющему напряжению к основному, существовала в коротковолновой области спектра открытого резонатора ( $f_0 = 77 \div 80$  ГГц) для  $H/R = 0,14 \div 0,23$ , а с увеличением  $L$  это явление наблюдалось и в диапазоне  $f_0 = 74 \div 77$  ГГц при  $H/R = 0,23 \div 0,3$ .

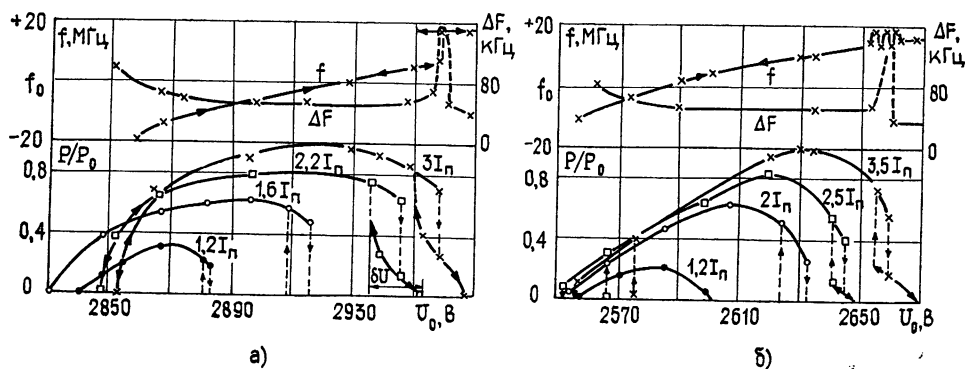


Рис 2

Проведенные экспериментальные исследования показали, что если в резонаторе возбуждаются два или несколько конкурирующих колебаний, близких по частоте, то в области жесткого режима возбуждения зоны генерации наблюдаются явления типа контурного гистерезиса [7]. В частности, на рис. 2а, б приведены энергетические, частотные и спектральные характеристики генератора, когда в резонаторе возбуждаются два близких по частоте колебания: основное — на частоте  $f_0$  и конкурирующее — на частоте  $f_1$  (а)  $f_0 = 78,5$  ГГц,  $f_1 = f_0 + 20$  МГц; б)  $f_0 = 75,0$  ГГц,  $f_1 = f_0 + 6$  МГц). Из графиков видно, что для токов пучка  $I < 2I_{\text{п}}$  характеристики генератора практически не отличаются от зависимостей, приведенных на рис. 1а, т. е. при этих токах паразитное колебание полностью подавляется основным. Однако для токов  $I > 2I_{\text{п}}$  начинает проявляться обратный процесс — подавление основного колебания паразитным. В этом случае в длинноволновой области зоны наблюдается смещение точки начала генерации к  $U_0$ ,

соответствующему возбуждению генератора в линейном режиме, и более быстрый рост мощности колебания (рис. 2а;  $L = 30$  мм,  $H/R = 0,19$ ) с возможностью возникновения жесткого режима возбуждения ГДИ (рис. 2б;  $L = 40$  мм,  $H/R = 0,26$ ) при появлении конкурирующего низкочастотного колебания. В коротковолновой области срыв генерации основного колебания происходит до уровня мощности паразитного колебания с существенно меньшей крутизной перестройки частоты и шириной спектральной линии. При этом вблизи скачка мощности, где пусковой ток основного колебания выше паразитного, наблюдается значительное уширение  $\Delta F$ . Отметим, что в случае, показанном на рис. 2а, гистерезис по мощности сопровождается затягиванием частоты основного колебания паразитным, в то время как для рис. 2б это явление практически отсутствует, но в области срыва колебания наблюдаются осцилляции частоты, которые также приводят к значительному уширению спектральной линии СВЧ сигнала.

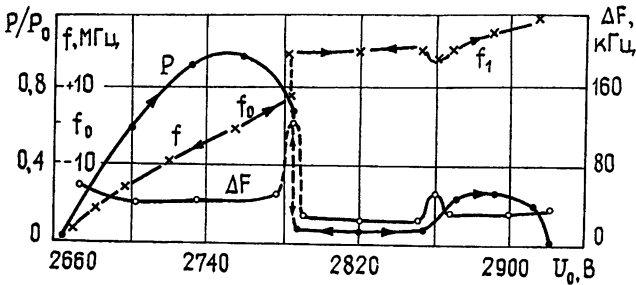


Рис. 3.

Для ГДИ с увеличенными апертурами зеркал ( $L = 50$  мм) обнаружены колебания, когда разность частот между основным и конкурирующим порядка 1 ГГц и более. В частности, характеристики такого колебания для  $I = 2,1 I_{\text{п}}$  показаны на рис. 3 ( $f_0 = 75,3$  ГГц,  $f_1 = 76,3$  ГГц). Особенности этой зоны генерации являются: возбуждение прибора в мягком режиме в коротковолновой и длинноволновой областях; достаточно большая ширина зоны генерации ( $\Delta U_0 = 260$  В) по сравнению с рис. 1, рис. 2, где  $\Delta U \approx 80$  В для  $I = 2I_{\text{п}}$ ; наличие жесткого режима возбуждения колебания в центральной области зоны генерации.

Такую зону можно разделить на три области: область I — интервал  $2660 \text{ В} \leq U_0 \leq 2784 \text{ В}$ , где формируется основное колебание на частоте  $f_0$ ; область II — интервал  $2856 \text{ В} \leq U_0 \leq 2920 \text{ В}$ , где формируется конкурирующее колебание на частоте  $f_1$ ; область III — переходная, расположенная в интервале значений  $U_0$  между областями I и II.

В первой области изменение характеристик основного колебания происходит подобно тому, как это имело место на рис. 1а. Однако здесь мощность с увеличением  $U_0$  падает не до нуля, а гистерезисные эффекты проявляются незначительно.

Во второй области со стороны коротковолнового диапазона генератор возбуждается в мягком режиме, а в длинноволновом — мощность и частота плавно переходят в третью область зоны СВЧ колебания.

Особенностями третьей области являются постоянство мощности генерации, достаточно малая крутизна электронной перестройки частоты и существенное уменьшение ширины спектральной линии высокочастотного сигнала.

**3. Сравнительный анализ.** Для сравнения степени проявления электронного и контурного гистерезисов в коротковолновой области зоны.

генерации на рис. 4 приведены графики зависимостей  $\delta U/\Delta U_0$  от соотношения  $I/I_{\text{п}}$  (кривые 1, 2, 3 соответствуют зонам генерации, показанным на рис. 1а, рис. 2а, б). Видно, что для электронного гистерезиса уширение петли наблюдается при увеличении тока до  $2I_{\text{п}}$ , а для  $2I_{\text{п}} < I \leq 3,5I_{\text{п}}$  соотношение  $\delta U/\Delta U_0$  остается постоянным. В случае контурного гистерезиса в этих характеристиках появляется провал, указывающий на оптимальные условия, при которых ширина петли гистерезиса по отношению к ширине возбуждаемой зоны минимальна. Так, если для электронного гистерезиса при токах  $1,7I_{\text{п}} \leq I \leq 2,2I_{\text{п}}$  гистерезисная петля охватывает примерно (12—15) % зоны генерации, то при наличии контурного гистерезиса для  $I \approx 2,2I_{\text{п}}$  величина  $\delta U/\Delta U_0$  составляет 5%. Этот факт указывает на то, что при наличии конкурирующего колебания в области появления контурного гистерезиса происходит уменьшение ширины петли гистерезиса основного колебания.

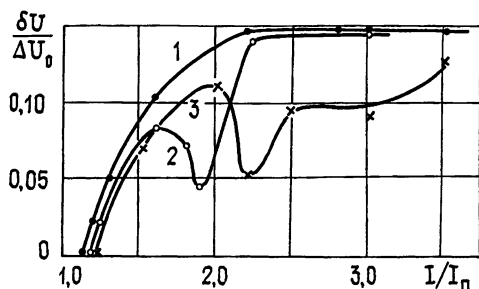


Рис. 4.

ренные на рис. 1—3 изменения в характеристиках наблюдаются при больших значениях  $I$ , что связано с увеличением пускового тока генератора [8]. В этом случае условия возбуждения прибора можно корректировать путем юстировки его в магнитном поле, выбирая минимальное значение  $I_{\text{п}}$ .

Таким образом, общей причиной появления гистерезиса типа контурного и срыва генерации на рабочей частоте является конкуренция основного и паразитного колебаний, вызванная сгущением спектра резонатора и изменением параметров электронного потока.

В заключение отметим, что в зонах генерации ГДИ минимальная ширина спектра основного колебания наблюдалась при токах  $I = (1,5 \div 3) I_{\text{п}}$ . Для  $I_{\text{п}} < I \leq 1,5I_{\text{п}}$  с уменьшением  $I$  ширина спектра возрастает (особенно при токах, близких к пусковому), что связано с уменьшением прочности предельного цикла колебаний автогенератора [9]. При значениях  $I > 3I_{\text{п}}$  ( $I_{\text{п}} \approx 40 \div 50$  мА) динамика генератора усложняется за счет увеличения пространственного заряда и усиления проявления нелинейных процессов, что также может приводить к увеличению ширины спектральной линии. С увеличением тока пучка до значений  $I \approx 4I_{\text{п}}$  в спектре ГДИ существенных изменений (по сравнению с  $I \approx 3I_{\text{п}}$ ) не наблюдалось. Для  $I > 4I_{\text{п}}$  экспериментальные исследования выше описанных характеристик не проводились в связи с ограничением величины рабочего тока, создаваемого катодом электронной пушки. Однако при значительном уменьшении пускового тока (путем увеличения количества пролетов электронов в пространстве взаимодействия [10]) такие исследования показали, что с увеличением тока пучка в приборах типа ГДИ, как и в ЛОВО [11], наблюдается переход от одночастотного режима генерации к многочастотному, а затем — к стохастическим колебаниям. При этом в ГДИ шумоподобные колебания возбуждались при значениях токов пучка  $I = (30 \div 100) I_{\text{п}}$ , а ширина

спектра этих сигналов примерно соответствовала полосе пропускания открытого резонатора (30—40 МГц).

Таким образом, из проведенных исследований следует:

1) Изменение энергетических, частотных и спектральных характеристик ГДИ в пределах зоны генерации существенно зависит от вида возбуждаемого в резонаторе колебания.

2) При одномодовом и одночастотном возбуждении колебаний ГДИ длинноволновая область зоны генерации возбуждается в мягком режиме, а коротковолновая — в жестком режиме с проявлением электронного гистерезиса по мощности.

3) Для высших типов колебаний возможны случаи возбуждения ГДИ только в жестком режиме с проявлением гистерезисных эффектов.

4) При сгущении спектра резонатора и наличии паразитных колебаний, близких по частоте к основному, в зоне генерации ГДИ возникает гистерезис типа контурного, сопровождаемый явлениями затягивания частоты, что связано с конкуренцией основного и паразитного колебаний.

5) В пределах зоны генерации в ГДИ миллиметрового диапазона могут возбуждаться колебания, в которых разность частот между основным и паразитным достигает 1 ГГц и более. В этом случае зона генерации имеет ряд особенностей, не присущих другим колебаниям.

6) В одночастотном режиме при токах пучка  $I \approx (1,5 \div 4) I_{\text{п}}$  в пределах зоны генерации минимальная ширина ( $\Delta F$ ) спектра наблюдается в центре зоны (в области максимальной мощности и линейного участка изменения крутизны электронной перестройки частоты), и спектр уширяется в областях мягкого и жесткого режимов возбуждения генератора. Существенное уширение спектра происходит при возбуждении шумоподобных колебаний, где величина  $\Delta F$  может достигать значения, равного полосе пропускания открытого резонатора.

7) Гистерезисные явления присущи всем приборам типа ГДИ, однако степень проявления их зависит от геометрических параметров используемой электродинамической системы, величины электронного тока в пространстве взаимодействия и связи резонатора с нагрузкой, что необходимо учитывать при разработке таких приборов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника.— Харьков: Вища школа, 1976.
2. Бакай А. С., Лукин К. А., Шестопалов В. П. Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 9, с. 1115.
3. Ваврив Д. К., Третьяков О. А., Шматько А. А. Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 11, с. 2354.
4. Ревин И. Д. Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам — Харьков: ИРЭ АН УССР, 1978, 1, с. 21.
5. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И. Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.— Харьков: ИРЭ АН УССР, 1978, 1, с. 31.
6. Кац А. М., Ильина Е. М., Манькин И. А. Нелинейные явления в приборах О-типа с длительным взаимодействием — М.: Сов. радио, 1975.
7. Верин О. Г.—Электронная техника Сер 1. Электроника СВЧ, 1977, вып. 10, с. 21.
8. Цвык А. И.— Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 8, с. 1216.
9. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах.— М.: Наука, 1968, с. 10.
10. Балаклицкий И. М., Воробьев Г. С., Цвык А. И., Шестопалов В. П.— ДАН УССР, серия А, 1976, с. 822.
11. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н.— Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 7, с. 1037.

# EXPERIMENTAL STUDY OF HYSTERESIS PHENOMENA IN A GENERATOR OF DIFFRACTION RADIATION

G. S. Vorob'ev, A. I. Tsvyk

The results of experimental investigations are presented for hysteresis phenomena in energetic and frequency characteristics of diffraction radiation generator (DRG) in millimeter wave range. Cases have been considered of the generator excitation in soft and rigid regimes in the presence of one form of VHF oscillation or some oscillations close in frequency for the first time. Phenomena of the type of the contour hysteresis observed in DRG have been analysed.

---

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, т. XXII, № 2, 1982 г.

(Окончание)

**А. П. Кропоткин.** Развитие неоднородностей плотности в авроральной плазме, инжектируемой из плазменного слоя

В области плазменного слоя и частично-кольцевого тока плазменный параметр  $\beta \geq 1$ , вследствие этого возможна раскачка желобковой (перестановочной) неустойчивости. Ее развитие рассмотрено с учетом эффектов конечного ларморовского радиуса ионов и насыщения из-за эффектов конечного ларморовского радиуса ионов и насыщения из-за нелинейности. Получены оценки электрических полей возмущения и продольных токов. Найденные значения соответствуют эксперименту.

**М. Б. Гохберг, О. А. Похотелов, Ю. Г. Хабазин.** О фазовых наблюдениях геомагнитных пульсаций

Показано, что азимутальные волновые числа гидромагнитных волн, измеренные вблизи экваториальной плоскости магнитосферы, и числа, измеренные для соответствующих волнам геомагнитных пульсаций на поверхности Земли, должны отличаться одни от других. Разница возникает вследствие азимутальной зависимости времени распространения гидромагнитного возмущения от экваториальной плоскости до поверхности Земли.

**А. В. Гусев, А. П. Поляков, Н. И. Успенский, М. Б. Ярцев.** О структуре крайне-низкочастотных электромагнитных полей в Северном ледовитом океане

Исследуется структура естественных КНЧ-электромагнитных полей в Северном Ледовитом океане. Описаны аппаратура, методика измерений и обработки результатов наблюдений. Подтверждена гипотеза об основном вкладе в изучаемые процессы возбуждения волновода Земля—ионосфера, получены и обсуждаются характеристики распространения КНЧ-электромагнитных волн в океане.

**Т. В. Гайворонская, Л. А. Юдович, Л. Лоис.** Волновые процессы в период магнитосферного возмущения 15 II 1978 г

**Б. В. Ткаченко.** Влияние вариаций электрического поля в авроральной ионосфере на амплитудные характеристики КВ радиосигналов

**М. И. Белоглазов, И. Н. Забавин.** Об эффективной модели невозмущенной авроральной ионосферы для СДВ

**В. В. Вассков, А. В. Гуревич.** Собственные колебания ионосферной плазмы, генерируемые в поле мощной радиоволны

Исследуется поведение запертых собственных колебаний замагниченной плазмы ( $z$ -моды), возбуждаемых в ионосфере при рассеянии обыкновенной радиоволны на вытянутых вдоль магнитного поля квазистационарных мелкомасштабных неоднородностях. Рассмотрено распространение  $z$ -моды от точки генерации к области плазменного резонанса, ее поглощение и рассеяние на ионосферных неоднородностях. Определен поток энергии  $z$ -моды в области плазменного резонанса.