# ПЕЧАТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

## КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ

Печатный излучатель представляет собой прямоугольную пластинку, возбуждаемую одним или несколькими штырями (рис. 7.1). Несмотря на простоту конструкции, это многофункциональный элемент, он может создавать поле излучения как с линейной, так и с круговой поляризацией, а также работать на одной или двух частотах с взаимно ортогональным расположением плоскостей поляризации излучаемых волн. Теория печатных излучателей может быть построена на базе различных физических моделей. Одна из таких моделей базируется на представлении печатного излучателя в виде разомкнутого отрезка несимметричной полосковой линии, возбуждаемого штырем через отверстие в экране.

При приближенном подходе, основанном на теории длинных линий, в отрезке учитывается возбуждение лишь квази-T-волны. В качестве продольной оси отрезка полосковой линии выбирается одна из осей симметрии прямоугольной пластинки. Предполагается, что энергия излучается через торцевые щели, образованные кромками отрезка полоскового проводника и экраном, а излучение из боковых щелей пренебрежимо мало. По сравнению с мощностью квази-T-волны, набегающей на щель, мощность, излучаемая торцевыми щелями, невелика, поэтому коэффициент отражения в плоскости торцевых щелей близок к единице. Распределение тока, а также поля вдоль оси полосковой линии между торцевыми щелями и возбуждающим штырем мало отличается от соответствующих распределений в несимметричной полосковой линии со стоячей квази-T-волной. На торцевые щели приходятся максимум напряженности электрического поля и нуль электрического тока. При определенной длине отрезка полосковой линии происходит синфазное сложение волн, отраженных от его концов, и волн, возбуждаемых штырем, что соответствует резонансному режиму работы. Интенсивность колебаний поля и тока, а также мощность излучения в резонансном режиме резко возрастают.

Рис. 7.1. Печатный излучатель

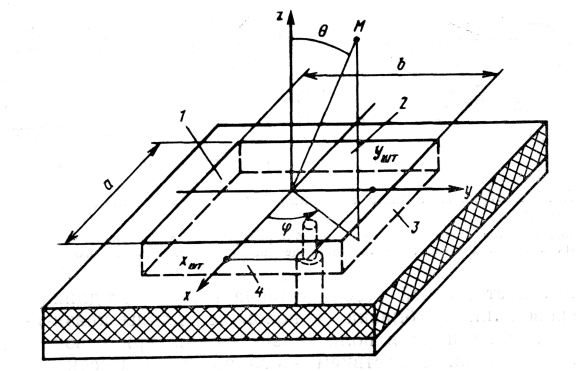


Рис. 7.2. Электрическое поле и эквивалентный магнитный ток в печатном излучателе:

а) силовые линии электрического поля; б) распределение электрического поля вдоль торцевых и боковых щелей; в — направление эквивалентного магнитного тока

Пусть направление оси отрезка полосковой линии совпадает с осью *y* (см. рис. 7.1). Тогда резонанс квази-T-волны, распространяющейся в этом направлении, определяется размером ***b*** пластинки. Размер *а* определяет входное сопротивление при резонансе. Торцевые щели 1, 3 излучают волны с основной

поляризацией, а боковые щели 2, 4 — волны с кроссполяризацией поля. Резонансный размер пластинки практически кратен половине длины квази-T-волны:

(7.1)



где ***λТ*** - длина квази-T-волны.



Распределение напряженности электрического поля вдоль торцевых и боковых щелей в резонансном режиме (рис. 7.2, *б*) соответствует низшей резонансной частоте, когда длина отрезка полосковой линии близка к половине длины квази-T-волны. Энергия, запасенная в поле квази-T-волны при резонансе, достаточно велика. Следствием этого являются высокая добротность и узкополосность рассматриваемых излучателей. Если резонансный размер излучателя кратен нечетному числу полуволн квази-T-волны

(7.2)



то колебания поля в торцевых щелях противофазны. Направление эквивалентного магнитного тока в торцевых и боковых щелях

(7.3)



где ***n*** - единичный вектор нормали к плоскости щелей, при ***m=0*** показано на рис. 7.2, *в*. sitednl.narod.ru/1.zip - база сотовых по Петербургу

Согласно (7.3) эквивалентные магнитные токи торцевых щелей при выполнении условия (7.2) синфазны. Излучение синфазных щелей имеет максимум в направлении нормали к плоскости экрана. На практике используются излучатели с резонансным размером, определяемым (7.2) при ***m=0*.** Такие излучатели имеют минимальные габаритные размеры пластинки. Колебания поля и тока в излучателе с указанной длиной в дальнейшем будем называть *низшим типом колебаний*.

Если длина отрезка полосковой линии кратна четному числу полуволн квази-T-волны, т. е.

(7.4)



то излучатель в направлении нормали к плоскости экрана практически не излучает.

Разработка эффективных печатных излучателей и ФАР, построенных на их основе, тесно связана с созданием математических моделей, содержащих полное электродинамическое описание конструктивных элементов излучателей. Подробные модели и реализующие их программы для ЭВМ существуют и используются в САПР при создании ФАР. Ниже приводится приближенная методика расчета печатных излучателей, позволяющая оценить их характеристики и выбрать исходные варианты для моделирования на ЭВМ. Кроме того, даются справочные сведения о характеристиках печатных излучателей в плоских ФАР, полученные численными методами с учетом взаимовлияния излучателей.

## ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА

Прямоугольная пластинка (рис. 7.3), расположенная над экраном, представлена отрезком

Рис. 7.3. Эквивалентная схема печатного излучателя с возбуждающим штырем, расположенным на оси симметрии пластинки

Рис. 7.4. Полная эквивалентная схема печатного излучателя, возбуждаемого штырем, смещенным относительно сред ней точки пластинки (а), и эквивалентные сопротивления нагруженных отрез ков двухпроводных линий в месте включения штыря (б)

эквивалентной двухпроводной линии, нагруженным на проводимости торцевых щелей. Эти проводимости являются комплексными величинами с емкостной реактивной частью, обусловленной концентрацией поля у торцевой кромки плоского проводника (см. рис. 7.2, *а*). Возбудители - штырь и отверстие связи - на эквивалентной схеме (см. рис. 7.3) представлены цепочкой элементов, состоящей из последовательно включенных реактивного сопротивления, штыря и параллельно включенных реактивной проводимости и идеального трансформатора, соответствующих переходу от линии передачи к излучателю через отверстие связи.

Если толщина экрана существенно меньше длины волны и штырь является продолжением центрального проводника коаксиального волновода, то коэффициент трансформации идеального трансформатора можно положить равным единице, а реактивность параллельно включенного элемента - нулю.

Входное сопротивление излучателя

(7.5)



где

(7.6)



- входное сопротивление отрезка эквивалентной двухпроводной линии длиной нагруженной на сопротивление торцевой щели ***ZЩ1***;



(7.7)



- входное сопротивление отрезка эквивалентной двухпроводной линии длиной нагруженной на ***ZЩ2; ZШТ*** — индуктивное сопротивление штыря.



В (7.5) — (7.7) ***W*** — волновое сопротивление полосковой линии; ***β*** — коэффициент фазы квази-T-волны, yШТ— смещение штыря вдоль оси *у* относительно средней точки.

Входное сопротивление (7.5) в рабочей полосе частот ведет себя как сопротивление параллельного контура, однако на частоте, соответствующей максимуму активной составляющей входного сопротивления, реактивная составляющая не обращается в нуль и равна индуктивному сопротивлению штыря ***ZШТ***.

Из-за наличия емкостной реактивной составляющей сопротивления щелей резонансный размер пластинки несколько меньше значения (7.2).

Укорочение одиночного излучателя, а также излучателя в решетке с учетом их взаимовлияния не превышает 20%. Проводимость излучения торцевых щелей [7.1]

(7.8)



где величины

(7.9)



представляют собой активную и реактивную составляющие проводимости. Здесь - волновое число свободного пространства**; *t*** - толщина подложки; ***λ0*** - длина волны в свобод ном пространстве; ***ε0,*** ***μ0*** - электрическая и магнитная постоянные.



Программа для разрезания и сшивания файлов, шифрования, а также удаления файлов с защитой от восстановления специальными утилитами.

acsoftware.narod.ru/download/demo/acdemo.zip

Сопротивление штыря

(7.10)



где ***ρ***—радиус штыря; - волновое число диэлектрика подложки.



Рассматривая печатный излучатель в резонансном режиме как полуволновый отрезок линии, нагруженный на активную составляющую сопротивления излучения щелей и возбуждаемый на расстоянии ***уШТ*** от среднего сечения (см. рис. 7.3), находим входное сопротивление

(7.11)



Поскольку *(WGa)<<1*, то

(7.12)



Входное сопротивление печатных излучателей в резонанс ном режиме существенно зависит от расположения штыря под пластинкой. Это позволяет получить нужное его значение на резонансной частоте и обеспечить согласование линии передачи с излучателем.

Печатный излучатель, эквивалентная схема которого дана на рис. 7.4, *а*, содержит две двухпроводные линии, соответствующие квази-T-волнам, возбуждаемым штырем в направлении осей симметрии пластинки. Будем считать, что дополнительно учитываемая квази-T-волна распространяется вдоль оси симметрии пластинки, параллельной оси *x* (см. рис. 7.1). Возбуждение второй квази-T-волны и излучение, связанное с ней, такие же, как в излучателе, схема которого представлена на рис. 7.3. Длина эквивалентной двухпроводной линии и ее волновое сопротивление определяются размерами пластинки ***а*** и ***b*** соответственно. Смещение линии передачи, эквивалентной устройству возбуждения, относительно средних сечений указанных отрезков двухпроводных линий равно смещению штыря вдоль соответствующих осей симметрии пластинки.

По эквивалентной схеме, представленной на рис. 7.4, можно проанализировать характеристики практически во всех режимах работы. Если обозначить входные сопротивления нагруженных отрезков двухпроводных линий в местах включения устройств возбуждения как ***Z1'*, *Z2'*,** то эквивалентная схема примет вид, показанный на рис. 7.4, *б*. Обозначим через *U* напряжение на входе излучателя. Тогда напряжения на сопротивлениях ***Z1,2'*** можно найти по формуле

(7.13)



Напряжения определяются в сечениях эквивалентных двухпроводных линий, в которые включено устройство возбуждения. Напряжения на торцевых щелях

(7.14)



где

(7.15)



По формулам (7.13) - (7.15) можно найти амплитуды и фазы возбуждения торцевых щелей прямоугольного излучателя на низших типах резонансных колебаний.

## НАПРАВЛЕННОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

При грубых оценках ДН прямоугольного печатного излучателя по полю с основной поляризацией можно рассматривать как ДН двух синфазных торцевых щелей с равномерным распределением поля. Точно так же ДН по полю с кроссполяризацией определяется как ДН двух противофазных боковых щелей с нечетным распределением поля.

Формулы для расчета ДН при основной поляризации и кросс поляризации имеют соответственно вид

(7.16)



где ***θ, ϕ*** - углы сферической системы координат (см. рис. 7.1). При основной поляризации, когда торцевые щели расположены параллельно оси ***х*** или ***y***, имеем соответственно

(7.17)



где



Для поля, излучаемого боковыми щелями, ориентированны ми параллельно осям ***у*** и ***х*,** уровни кроссполяризационной составляющей

(7.18)



(7.19)



где



В главных плоскостях ДН по полю с кроссполяризацией равна нулю, так как либо боковые щели не излучают из-за не четного распределения поля, либо излучение компенсируется из-за противофазности их возбуждения.

Диаграммы направленности печатного излучателя в решетке и одиночного существенно различаются. Причина этого — взаимная связь между излучателями, из-за которой токи индуцируются не только в возбуждаемом излучателе, но и в соседних (см. гл. 2). В результате в ДН могут появиться провалы. Глубина провала зависит от размеров решетки и положения излучателя относительно границы излучающего полотна. Если излучатели расположены вдали от границы и число их в излучающем полотне велико, то ДН излучателей практически одинаковы, а глубина провалов увеличивается с ростом размеров решетки и числа излучателей.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Потери энергии в печатных излучателях АР связаны с потерями в диэлектрике подложки и покрытия, а также в металлических элементах конструкции — пластинке и экране. Потери в покрытии существенно меньше потерь в подложке, и в первом приближении их можно не учитывать, так как напряженность электрического поля в пространстве между пластинкой и экраном существенно больше, чем в диэлектрике покрытия.

Программа для разрезания и сшивания файлов, шифрования, а также удаления файлов с защитой от восстановления специальными утилитами.

acsoftware.narod.ru/download/demo/acdemo.zip

Мощность потерь в подложке определяется через тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика подложки:

(7.20)



где **j**S - плотность тока на пластинке; ***t*** - толщина подложки; ***εа*** - абсолютное значение диэлектрической проницаемости под ложки; ***SПЛ*** - поверхность пластинки.

Мощности потерь в пластинке и экране

(7.21)



где Δδ угол диэлектрических потерь металла пластинки и экрана.

Отношение мощностей (7.21) и (7.20)

(7.22)



где ***ε*** - относительная диэлектрическая проницаемость под ложки.

*Пример*. Рассмотрим в качестве примера прямоугольный излучатель на резонансной частоте

(7.23)



где ***а*** - резонансный размер пластинки; ***х, у*** — координаты на пластинке, начало отсчета которых совпадает с центром пластинки.

Подставив (7.23) в (7.,22), получим

(7.24)



Рис. 7.5. Зависимость η печатного излучателя от тангенса угла диэлектрических потерь под ложки



Рис. 7.6. Зависимость η печатного излучателя от толщины подложки с потерями

На рис. 7.5 приведены результаты численного эксперимента по исследованию влияния качества диэлектрика подложки на КПД ФАР с прямо угольными печатными излучателями. На рис. 7.6 представлены зависимости ***η*** печатного излучателя от высоты пластинки над экраном при разных значениях ***tgΔ*.** Из графиков, приведенных на рисунках, следует, что уменьшение толщины подложки ***t*** приводит к росту потерь и уменьшению КПД ФАР.

Согласно (7.24) при уменьшении толщины подложки потери в экране и пластинке возрастают и могут существенно превышать потери в диэлектрике подложки. При использовании ВЧ диэлектриков с ***tgΔ<10-3*** и толщиной подложки ***t>0,01λ*** потери в печатных излучателях пренебрежимо малы.

При больших смещениях штыря относительно центра печатного излучателя

(7.25)



где Z0вх(yшт) - резонансное входное сопротивление излучателя без потерь, определяемое (7.13);

(7.26)



Здесь ***α*** - коэффициент затухания полосковой линии, отрезок которой с устройством возбуждения образует печатный излучатель.



## ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ПЕЧАТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ РАДИОВОЛН С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Поляризация излучаемых волн зависит от положения штыря и размеров пластинки. Одиночный излучатель с линейной поляризацией поля возбуждается штырем, расположенным на оси симметрии пластинки, параллельной стороне с резонансным размером. Положение штыря на оси симметрии пластинки определяется условием согласования излучателя с линией передачи, а рабочая полоса частот - толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки. Взаимодействие излучателей в ФАР приводит к существенному изменению их характеристик (рис. 7.7, 7.8).

Рис. 7.7. Зависимость резонансных размеров квадратной пластинки в ФАР с прямоугольной и треугольной сетками размещения излучателей от толщины подложки ***(\_ε=2,5; α=60°, 90°)***



Рис. 7.8. Зависимости активной составляющей входного сопротивления ***Ra*** прямоугольного излучателя на резонансной частоте от толщины под ложки при треугольной *(а)* и прямо угольной *(б)* сетках размещения излучателей

Расчет одиночного излучателя включает следующие этапы:

1. Определение резонансных размеров. Выбирают исходные значения толщины и диэлектрической проницаемости подложки. При произвольном положении штыря на одной из осей симметрии по (7.5) рассчитывают зависимость ***ZBХ=ZBX(b****)* или ***ZBX=ZВХ(а).*** Резонансному размеру пластины соответствует максимум активной составляющей ***ZBX.***
2. Согласование излучателя с линией передачи. Из условия ***Z0BX=Wл***, где ***Wл*** — волновое сопротивление линии передачи; ***Z0BX***- резонансное значение входного сопротивления излучателя [см. (7.12)], находят смещение штыря вдоль оси симметрии от средней точки пластинки. Предполагается, что *|****ZШТ|<<W***. Если это условие не выполняется, то производится компенсация ***ZШТ*** путем параллельного или последовательного включения в линию передачи емкостного сопротивления.
3. Определение рабочей полосы частот. Рассчитывают коэффициент отражения на входе излучателя . Рабочую полосу частот устанавливают из неравенства , где - максимально допустимое значение коэффициента отражения. Если полоса частот меньше требуемой, корректируют толщину и диэлектрическую проницаемость подложки и вновь выполняют п. 1,2. Если это не дает требуемого результата, то рассчитывают элемент широкополосного согласования.



## ДВУХЧАСТОТНЫЙ ПЕЧАТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ФАР

Печатные излучатели с прямоугольной формой металлической пластинки позволяют реализовать двухчастотный режим работы. В этом режиме используется резонанс квази-T-волн, распространяющихся в направлении осей симметрии металлической пластинки.

Возбуждение излучателя на двух частотах можно осуществить независимо с помощью двух штырей, расположенных на продольной и поперечной осях симметрии пластинки. Каждый из штырей (рис. 7.9) возбуждает лишь один тип колебаний на одной из частот. Пары торцевых щелей, излучающие энергию резонансных колебаний, расположены взаимно перпендикуляр но. Поэтому плоскости поляризации поля излучения на рабочих частотах образуют угол 90°.

Значение каждой из резонансных частот ***f1,2*** так же, как и в одночастотном режиме, зависит от одного из размеров пластинки и практически не зависит от другого. Отношение резонансных частот определяется отношением размеров сторон пластинки: ***f1/f2=a/b*.** Если разность резонансных частот превышает рабочую полосу частот каждого из каналов, то входное сопротивление в этой полосе и ДН можно найти по методике расчета одночастотного излучателя.



На практике интерес представляет двухчастотный одноканальный печатный излучатель, возбуждаемый одним штырем. Сигналы с частотами ***f1 , f2*** разделяются в цепях СВЧ, связанных с излучателем. Такая конструкция отличается простотой. Двух частотный режим работы обеспечивается смещением штыря с оси симметрии пластины (см. рис. 7.1). Штырь возбуждает два низших типа колебаний (см. рис. 7.4).

Рис. 7.9. Печатный излучатель с независимым возбуждением рабочих типов колебаний с помощью двух штырей, расположенных на продольной и поперечной осях симметрии пластинки

Если рабочие частоты разнесены по частотной оси достаточно далеко друг от друга, то на каждой из них одно из сопротивлений ***Z1*** или ***Z2*** существенно меньше другого, как сопротивление параллельного контура при сильной расстройке, а входное сопротивление двухчастотного излучателя практически равно входному сопротивлению одночастотного излучателя на соответствующей резонансной частоте. Штырь надо располагать так, чтобы значения входных сопротивлений на каждой из рабочих частот были одинаковыми.

Двухканальный излучатель рассчитывают по методике расчета одноканального одночастотного излучателя с линейной поляризацией поля излучения.

## ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ПЕЧАТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ РАДИОВОЛН С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Печатный излучатель с круговой поляризацией может быть двух- и одноканальным. Конструкция двухканального излучателя такая же, как двухчастотного, возбуждаемого двумя штыря ми (см. рис. 7.9). Каждый из каналов при излучении волн круговой поляризации настраивают на одну частоту ***f0***- Для создания круговой поляризации волн каналы излучателя должны иметь одинаковые амплитуды и разность фаз (равную 90°). Такое возбуждение обеспечивает, например, тройник, электрическая длина одного из плеч которого отличается от другого плеча на ***λ/4*.** При малой толщине подложки взаимная связь между каналами невелика и рассчитать характеристики каждого из каналов можно по методике расчета одноканального излучателя с линейной поляризацией поля излучения (см. § 7.5).

Рис. 7.10. Изменение направления вращения плоскости поляризации из-за перемещения штыря относительно осей симметрии

Для выполнения одноканального излучателя возбуждающий штырь располагают вне осей симметрии, что позволяет одновременно возбуждать два низших типа колебаний, соответствующих возбуждению квази-T-волн, распространяющихся вдоль осей симметрии пластинки. Для реализации круговой поляризации поля излучения необходимо обеспечить равенство амплитуд указанных колебаний и фазовый сдвиг, равный 90°. При расчете пользуются эквивалентной схемой, приведенной на рис. 7.4. Для создания необходимого фазового сдвига излучатель расстраивают по каждому типу колебаний так, чтобы фазовый сдвиг между напряжениями на нагруженных отрезках с сопротивлениями ***Z1,2*** (см. рис. 7.4,*б*) имел заданное значение. Расстройку осуществляют путем изменения размеров пластинки относительно резонансных (один из размеров увеличивают, а другой - уменьшают). Равенство амплитуд колебаний обеспечивается вы бором положения штыря под пластинкой. Требуемое направление вращения плоскости поляризации поля излучения зависит от выбора увеличиваемого (или уменьшаемого) размера при настройке излучателя. Если, например, увеличивается размер а, то реактивная составляющая сопротивления ***Z1*** имеет емкостный характер, a ***Z2*** - индуктивный. Напряжение ***Uz1*** опережает ***Uz2*** на 90°. Поляризация излучаемой волны - правая. Если увеличен размер ***b*,** то направление вращения плоскости поляризации меняется на противоположное. Изменить направления вращения плоскости поляризации можно симметричным перемещением штыря (рис. 7.10), при котором фаза одного из колебаний меняется на 180°.

Расчет излучателя включает несколько этапов. На первом этапе определяют резонансные размеры пластинки. Пластинка одиночного излучателя с резонансными размерами имеет форму квадрата, а в решетке - форму прямоугольника, размеры сторон которого зависят от соотношения шагов решетки. На втором этапе при некотором фиксированном положении штыря, например на одной из диагоналей пластинки, находят размеры сторон пластинки, обеспечивающие необходимые фазовые соотношения между напряжениями ***Uz1,2*** (см. рис. 7.4,*б*). Фазы каждого из напряжений изменяются практически независимо за счет изменения размера соответствующей стороны пластинки. Размеры сторон подбираются так, чтобы фазы напряжений ***Uz1,2*** в эквивалентной цепи, схема которой дана на рис. 7.4, *б*, отличались на ±45° от фазы тока. Равенство модулей указанных напряжений достигается подбором положения штыря под пластинкой. Выбор положения штыря должен обеспечивать также согласование излучателя с линией передачи. Поэтому при определении положения штыря рассчитывают не только фазы напряжений ***Uz1,2,*** но и входное сопротивление излучателя.

На последнем этапе определяют ДН излучателя и другие характеристики.

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ

Рис. 7.11. Печатный излучатель с элементом широкополосного согласования

Рабочая полоса частот может быть расширена за счет использования встроенных в излучатель согласующихся элементов. В печатном излучателе с широкополосным согласующим устройством штырь через отверстие в пластинке соединен с разомкнутым шлейфом (рис. 7.11), образованным пластинкой излучателя и прямолинейным плоским проводником, параллельным пластинке. Между пластинкой и ленточным проводником может находиться диэлектрическая подложка. Длина шлейфа на центральной частоте равна ***λш/4***, где ***λш -*** длина волны в отрезке полосковой линии, образующем шлейф. На частоте ***f0*** входное сопротивление разомкнутого шлейфа равно нулю, а входное сопротивление излучателя остается таким же, как у излучателя без согласующего устройства. При изменении частоты относительно *f0* реактивные составляющие сопротивлений шлейфа и излучателя становятся не равными нулю, но знаки их противоположны. При определенном выборе волнового сопротивления шлейфа можно обеспечить существенное уменьшение диапазона изменения реактивной составляющей входного сопротивления соединения излучателя и согласующего устройства по сравнению с диапазоном излучателя без шлейфа.

Положение штыря под пластинкой выбирают так, чтобы на резонансной частоте значение КБВ было равно допустимому. В этом случае резонансное сопротивление излучателя должно удовлетворять условию

(7.27)



Если функции соответственно четная и нечетная относительно переменной *(f—f0)*, то граница полосы согласования определяется условием



(7.28)



Здесь ***ZШ*** - входное сопротивление шлейфа:

(7.29)



***f1,2*** - граничные частоты полосы согласования; *X(f1)*≈*X(f2)*; ***WШ*** - волновое сопротивление шлейфа; ***lШ*** — длина шлейфа; ***λШ*** — длина волны в полосковой линии, отрезок которой образует шлейф.

Вблизи резонансной частоты

(7.30)



где ;



(7.31)



- волновое сопротивление шлейфа, компенсирующее реактив нулю составляющую входного сопротивления излучателя в рабочей полосе частот [см. (7.28), (7.30)]. Более точное значение *WШ* можно получить при использовании (7.29) вместо (7.30).