

Предисловие

Объектами исследования настоящей монографии являются транзисторные автогенераторы гармонических СВЧ колебаний. К таким устройствам относят нелинейные устройства, самостоятельно и без внешних воздействий преобразующие мощность источника питания в мощность высокочастотных электрических колебаний основной частоты и ее гармоник. Вопросы теории и расчета данных нелинейных устройств рассмотрены как в отдельных учебных пособиях и публикациях об автогенераторах, например [1–4], так и в ряде книг, посвященных проектированию радиопередающих [5–7], радиоприемных [8], усилительно-ограничительных [9, 10], радиоизмерительных [11, 12] и синтезаторных [13–15] устройств. В отличие от известных работ в данной монографии исследуются ориентированные на применение современных программ автоматизированного моделирования новые методы проектирования СВЧ автогенераторов и автогенераторов гармоник.

Для удобства изложения материала первая глава посвящена общим сведениям об СВЧ автогенераторах. Во второй и четвертой главах изучаются процессы автогенерации колебаний основной частоты и ее гармоник соответственно. Кроме этого, в четвертой главе предлагаются новые типы устройств, которые одновременно с основной частотой генерируют колебания одной или двух любых выбранных ее гармоник с близкими друг к другу уровнями мощностей. Третья глава посвящена особенностям проектирования генераторов, управляемых напряжением. В пятой главе рассмотрены новые приемы уменьшения в автогенераторах уровней амплитудных и фазовых шумов, а также описаны созданные с их использованием устройства. В основе одних приемов лежат методы уменьшения в автогенераторах неизохронности, связанной с их активным элементом. Другие способы снижения уровня шумов в автогенераторах относятся к схемотехническим приемам. В последней главе продемонстрированы методы и примеры проектирования (и измерения) высокостабильных генераторов.

Все использованные в монографии материалы получены в результате научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, которые в течение более тридцати лет проводилась доктором технических наук А.В. Барановым и кандидатом физико-математических наук М.А. Кревским в АО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород). Настоящая монография является попыткой систематизировать эти результаты, а также обобщить опыт, который в процессе разработки СВЧ автогенераторов накоплен ведущими специалистами АО «НПП «Салют». Монография в значительной степени основывается на журнальных статьях авторов и их изобретениях. Вместе с тем авторы благодарны всем соавторам совместных публикаций. Кроме этого, авторы признательны коллегам по работе: Ф.Ф. Архипцеву, А.П. Барабанову, А.Л. Козикову, Г.А. Кузнецову, Э.Л. Приверу, В.А. Точкову, кандидатам физико-математических наук Г.М. Коробкову, В.М. Пасхину, В.В. Свешникову, а также кандидатам технических наук Ю.А. Булину, А.Ф. Лунькову, Ю.И. Никитину, которые в процессе подготовки материалов для монографии поделились своими знаниями и опытом. Особую благодарность авторы выражают доктору технических наук С.Л. Моругину и доктору физико-математических наук А.В. Якимову за полезные дискуссии и поддержку работ по данной тематике.

Материалы монографии являются частью курса «Проектирование устройств СВЧ», который в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева читается студентам, обучаемым по специальности «Проектирование и технология электронных средств».

Предисловие, заключение, глава 1, разделы 5.1–5.4, 5.5.4 и 6.1 написаны авторами совместно. Глава 6, разделы 4.7 и 5.5.5 написаны М.А. Кревским, а главы 2, 3 и разделы 5.5.1–5.5.3 и 4.1–4.6 — А.В. Барановым.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОРАХ

Во вводной главе использованы материалы работ [1–3, 6, 9–13]. Дана классификация известных автогенераторов, обсуждаются принципы их построения и автогенерации колебаний, рассмотрены основные технические показатели автогенераторных устройств и предъявляемые к ним требования, затронуты также общие вопросы уменьшения нестабильности частоты и улучшения шумовых характеристик автогенераторов. Отмечены некоторые типовые способы проектирования автогенераторов.

1.1. Принципы автогенерации колебаний

Автогенераторы — это нелинейные устройства, самостоятельно и без внешних воздействий преобразующие мощность источника питания в мощность высокочастотных электрических колебаний основной частоты и ее гармоник. Любое автогенераторное устройство обычно содержит нелинейный управляемый активный элемент (АЭ), селективный линейный элемент или колебательный контур (КК) и цепь положительной обратной связи (ОС). В отличие от генераторов с внешним возбуждением (ГВВ) (или усилителей мощности (УМ)) воздействовать на данное устройство входным сигналом здесь не требуется. Поэтому данные преобразователи мощности часто называют просто автогенераторами (АГ).

На рис. 1.1 представлена типовая блок-схема автогенератора с использованием положительной обратной связи. Данное устройство содержит перечисленные выше элементы: нелинейный активный элемент — усилитель 1, линейные фильтрующую цепь 2 и цепь обратной связи 3, а также источник питания E_{DC} . Автогенератор

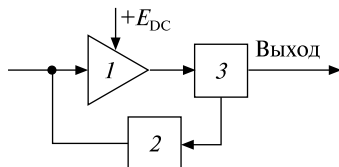


Рис. 1.1. Типовая блок-схема автогенератора с положительной обратной связью

представляет собой замкнутую колебательную систему, в которой энергия от источника питания через нелинейный элемент (транзистор) подается в колебательный контур — резонатор, а колебание с

его выхода через цепь обратной связи поступает на вход управления транзистором. Если амплитуда и фаза возбуждающего колебания удовлетворяют определенным условиям, то в энергетическом отношении автогенератор представляет собой генератор с самовозбуждением и ведет себя так же, как генератор с постоянным возбуждением, с тем отличием, что частота и амплитуда автоколебания в установившемся режиме определяется только параметрами самого генератора, а не навязывается внешним возбудителем.

Работу автогенератора можно пояснить следующим образом. Когда отключено напряжение питания или разомкнута цепь обратной связи, на выходе автогенератора отсутствуют колебания, а сам он находится в состоянии покоя. При включении питания и замыкания цепей в резонансной цепи возникает состояние неустойчивого равновесия, в результате которого появляются свободные колебания. В момент запуска они вызваны ударным возбуждением колебательной системы и флуктуациями тока транзистора. В зависимости от того, в каком из режимов работает колебательная система (в режиме диссипации или режиме роста), эти первоначальные колебания или гаснут или возрастают. При работе автогенератора в режиме роста свободные колебания усиливаются, так как транзистор передает в нагрузку мощность, которая больше той, что теряется в колебательной системе. Амплитуда свободных колебаний растет, пока нелинейность коэффициента передачи транзисторного усилителя не замедлит этот процесс. Другими словами, возрастание амплитуд колебаний прекращается, когда наступает энергетический баланс, при котором мощность, передаваемая управляемым элементом в нагрузку, становится равной диссипируемой в системе мощности. В этот момент заканчивается переходный период в колебательной системе и начинается стационарный режим работы автогенератора, амплитуда и частота которого на выходе остаются практически постоянными, если не брать в расчет их флуктуационные характеристики. Таким образом, нелинейность активного элемента является необходимым условием для установления и поддержания в автогенераторе стационарного режима. По этой причине работа транзисторного усилителя 1 в автогенераторе на рис. 1.1 характеризуется коэффициентом усиления с определенной компрессией его амплитудной характеристики. Вместе с нелинейным усилителем обязательными элементами колебательной системы являются линейные цепи: селективная цепь 2 (колебательный контур) и цепь положительной обратной связи 3. При этом селективная цепь 2 обычно описывается характеристическим сопротивлением контура и его добротностью, а цепь обратной связи 3 характе-

ризуется коэффициентам обратной связи и коэффициентам включения.

Описанные принципы автогенерации колебаний являются общими для любой колебательной системы, а ее представление в виде блок-схемы на рис. 1.1 является стандартным. К такому стандартному виду может быть сведена эквивалентная схема практически любого автогенератора.

1.2. Классификация автогенераторов

Различают автогенераторы гармонических и негармонических (периодических) колебаний, последние в монографии не рассматриваются.

Автогенераторы гармонических колебаний классифицируются:

- по физическим принципам работы;
- по назначению:
 - задающий автогенератор (ЗГ) — local oscillator (LO);
 - генераторы, управляемые напряжением (ГУН) или током (ГУТ), — voltage controlled oscillator (VCO) или current controlled oscillator — YIG tuned oscillator (YTO);
 - высокостабильные автогенераторы — ОСХО, ТСХО, VCХО — ovened (temperature, voltage) controlled (compensated) crystal oscillator;
 - генератор с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) — PLL (phase locked loop)-oscillator и другие;
- по типу используемого в АГ активного элемента (ламповый, диодный или транзисторный автогенератор);
- по режимам и классам работы активных элементов автогенератора;
- по типу используемых в КК элементов (АГ на сосредоточенных, распределенных элементах или АГ элементах волноводного типа и т. д.);
- по типам резонаторов в колебательном контуре автогенератора:
 - АГ с резонатором на двух и более LC -элементах;
 - АГ на объемных резонаторах (ОР);
 - АГ на диэлектрических резонаторах (ДР) следующих типов:
 - на кварцевых резонаторах (КР) на основе пьезокварцевого кристалла;
 - на коаксиальных керамических резонаторах;
 - на резонаторах на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) — surface acoustic wave (SAW);

- на резонаторах на лейкосапфире, в том числе на резонаторах на моде шепчущей галереи — whispering gallery mode (WGM));
 - на резонаторах в виде отрезков микрополосковых линий (МПЛ) с диэлектрическим заполнением;
 - на ферромагнитных резонаторах на железиттриевом гранате (ЖИГ) — yttrium-iron garnet (YIG);
 - на резонаторах в виде оптоэлектронных линий задержки;
- по КПД или экономичности преобразования мощности постоянного тока в мощность выходного СВЧ сигнала;
 - по диапазону и полосе рабочих частот;
 - по схемотехнической реализации АГ;
 - по технологическому исполнению автогенераторов (электровакуумное, гибридно-интегральное, монолитное исполнение и др.).

В свою очередь, по физическим принципам работы различают автогенераторы, в которых процесс возникновения и поддержания незатухающих колебаний основан на следующих эффектах:

- на эффекте положительной обратной связи;
- на эффекте «внутренней» положительной обратной связи, реализуемой при помощи отрицательного участка вольтамперной характеристики (ВАХ) туннельного диода;
- на параметрическом эффекте — за счет преобразования варикапом (его нелинейно-параметрическим реактивным сопротивлением) энергии накачки в колебание необходимой частоты.

В данной монографии АГ с внутренней обратной связью и параметрические автогенераторы рассматриваться не будут по причине более узкого круга их применения. Напротив, будут рассмотрены более востребованные автогенераторы с использованием положительной обратной связи. Среди них выделяются фильтровые и осцилляторные (трехточечные) автогенераторы, а также представляющие меньший интерес в СВЧ диапазоне автогенераторы с трансформаторной связью. В фильтровых автогенераторах положительная обратная связь реализована в виде отдельного фильтра, а в осцилляторных автогенераторах она образована элементами эквивалентных трехточечных схем.

Если активный элемент автогенератора является транзистором, то такие автогенераторы являются типичными представителями усилительно-ограничительных устройств [9], поэтому по режимам и классам работы активного элемента они классифицируются так



Рис. 1.2. Характерные области работы активного элемента автогенератора

же, как и любое устройство усиления и ограничения колебаний, т. е. по следующим признакам:

- по типам схем включения одного или нескольких транзисторов по отношению к входному и выходному сигналам:
 - с общим эмиттером (ОЭ);
 - с общей базой (ОБ);
 - с общим коллектором (ОК);
 - однотактное или двухтактное включение транзисторов;
 - с непосредственной связью двух транзисторов по схеме ОЭ–ОЭ;
 - с каскодным включением двух транзисторов по схеме ОЭ–ОБ;
 - с каскодным включением двух транзисторов по схеме ОК–ОБ;
- по состоянию АЭ или в зависимости от того, в какой из перечисленных областей ВАХ (рис. 1.2) работает транзистор:
 - в активной области или в области управления;
 - в области отсечки;
 - в состоянии насыщения;
 - в состоянии пробоя;
- по положению (или перемещению) рабочей точки на ВАХ транзистора:
 - класса А;
 - класса АВ;
 - класса В;
 - класса С;
- по углам отсечки тока θ , $\theta_{нас}$, или по углам протекания тока 2θ , $2\theta_{нас}$ (рис. 1.3):
 - недонапряженный режим;

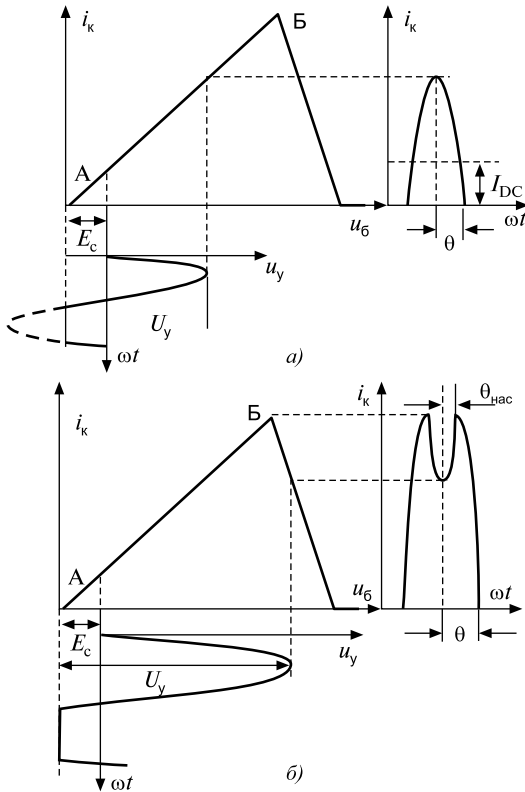


Рис. 1.3. Недонапряженный (а) и перенапряженный (б) режимы работы АЭ

- перенапряженный режим;
- критический режим;
- ключевой режим;
- по способу управления выходным током и напряжением АЭ:
 - режим генератора тока;
 - управляемый внешней цепью ключевой режим.
 - по числу гармоник, которыми управляется выходная цепь усилителя.

Среди отмеченных выше классификационных режимных признаков рассмотрим некоторые из тех, что требуют большего пояснения. Для этой цели, например, отметим на рис. 1.2 характерные состояния (или области работы) активного элемента, в качестве примера которого используется полевой транзистор. Здесь на нагрузочной прямой также нанесем точки, которым соответствуют работа транзисторного усилителя в различных классах — А, АВ, В и С при напряжениях на затворах U_g от нуля до напряжения от-

сечки $-U_{отс}$. Кроме того, на рис. 1.3 представим проходные динамические характеристики $i_k = f(u_{y(б)}, u_k = \text{const})$, а также управляющие (базовые) напряжения на входе $u_{y(б)}(\omega t)$ и коллекторные токи выходе $i_k(\omega t)$, которые соответствуют работе транзистора в недонапряженном (а) и перенапряженном (б) режимах. Длительности пребывания транзистора в указанных состояниях полностью определяется углами отсечки θ , $\theta_{нас}$ или углами протекания тока 2θ , $2\theta_{нас}$ [16]. В недонапряженном режиме выходной импульс тока формируется при работе транзистора в области управления, когда $\theta_{нас} = 0$, а $i_k < u_k/R_{нас}$, где $R_{нас}$ — сопротивление транзистора в состоянии насыщения. Величина $R_{нас}$ определяется графическим способом из рис. 1.2, используя угол наклона линии между областями управления и насыщения. Если транзистор работает в режиме с отсечкой тока θ , а $\theta_{нас} \rightarrow \theta$, то импульс выходного тока формируется в основном при работе транзистора в состоянии насыщения, когда $i_k = u_k/R_{нас}$, а $\theta_{нас} \approx \theta$. Такой режим работы транзистора в усилительно-ограничительных устройствах называется ключевым. На рис. 1.2 ему бы соответствовала траектория движения текущей точки $\{i_k(\omega t), u_k(\omega t)\}$, которая проходила бы сначала вблизи оси U_{ds} , а затем вблизи оси I_d , вычертив образованный осями угол. Примерами ключевых устройств являются усилители мощности классов D, E, F и их комбинации DE, FE [10, 17]. Промежуточное между рассмотренными режимами состояние транзистора соответствует перенапряженному режиму, когда при выполнении условия $\theta_{нас} < \theta$ выходной ток формируется при чередовании фаз управления и насыщения.

Более полную картину описания различных режимов работы транзистора получим, используя дополнительный классификационный признак — способ управления выходным током и напряжением транзистора. В зависимости от этого признака выделяют два режима работы АЭ — режим генератора тока и управляемый внешней цепью ключевой режим [18, 19].

Режимом генератора тока называют такой режим, при котором транзистор работает как источник тока, а его i_k и u_k полностью определяются (зависят) от управляющего сигнала u_y . Данному режиму соответствует работа усилителей в классах А, АВ, В, С. Как исключение, сюда относят и УМ класса F₁, в котором i_k и u_k дополнительно управляются на одной из гармоник основного сигнала с помощью внешней цепи. Работа транзистора в качестве источника тока позволяет англоязычным авторам [20] относить данный режим и соответствующие ему классы к «линейным», хотя по сути усилители классов АВ, В, С лишь весьма условно можно считать линейными

устройствами, например, только по амплитудной характеристике, а не по виду выходного колебания.

Второй режим, управляемый внешней цепью, реализуется в ключевом усилителе мощности тогда, когда i_k и u_k транзистора определяются только его выходной цепью, а сам транзистор во включенном и выключенном состояниях работает в двух режимах — насыщения и отсечки соответственно. Примерами ключевых устройств этого типа являются усилители мощности классов D, E, F, S, DE и FE.

При классификации автогенераторов гармонических колебаний по схемотехнической реализации выделяют однопортовые, двухпортовые и трехпортовые автогенераторы [2, 11]. В однопортовых схемах АГ активный элемент и цепь обратной связи замещается эквивалентным отрицательным сопротивлением. Однопортовыми схемами обычно описывают диодные автогенераторы (на диоде Ганна, лавинно-пролетном, туннельном и других диодах). В двухпортовых автогенераторах два вывода активного элемента — как правило, транзистора нагружены, а третий — заземлен, а частотодающая цепь положительной обратной связи включена между двумя этими портами. Автогенераторы называются трехпортовыми, если нагружены все три вывода (порта) активного элемента на транзисторе. В этом случае нельзя однозначно ответить на вопрос, какой из его электродов (эмиттер, база или коллектор) является общим в схеме.

Перечисленные в разделе разновидности автогенераторов дают лишь общее представление о том, какие бывают автогенераторы. Процесс их классификации не закончен и в настоящее время продолжается. Например, среди автогенераторов на отрезках МПЛ с диэлектрическим заполнением сейчас выделяют автогенераторы с резонаторами на петле Мёбиуса [21], а также генераторы с резонаторами на связанных двухпроводных [22] и трехпроводных линиях с одинаковой [23] и разной [24] длиной.

1.3. Основные технические показатели автогенераторов

Свойства автогенераторов описываются набором следующих основных показателей и характеристик:

- рабочей частотой и диапазоном ее перестройки;
- стабильностью (или правильнее — нестабильностью) рабочей частоты при воздействии различных дестабилизирующих факторов (времени, температуры окружающей среды и питающих напряжений);
- уровнями фазового и амплитудного шумов;

- выходной мощностью;
- изменениями выходной мощности в диапазонах рабочих частот и температуры окружающей среды;
- уровнями гармонических и побочных составляющих по отношению к мощности основного колебания в выходном спектре;
- потребляемой мощностью и связанным с ней КПД;
- чувствительностью перечисленных параметров к изменениям нагрузки;
- надежностью.

Обычно генерация только одной рабочей частоты имеет место в задающих генераторах или в опорных источниках колебаний (в автогенераторах с резонаторами на кварце, ПАВ или на ДР). Вместе с тем, дополнив автогенератор системой управления частотой, между величинами минимальной f_{\min} и максимальной f_{\max} частот со средним значением $f_{\text{ср}} = (f_{\max} - f_{\min})/2$ устанавливается некоторый интервал (диапазон) частот $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$, который характеризуется коэффициентом перекрытия

$$K_{\text{пер}} = \frac{\Delta f}{f_{\text{ср}}} = \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\max} + f_{\min}}. \quad (1.1)$$

Если в выражении (1.1) $K_{\text{пер}} < 0,2$, перестройка автогенератора считается узкополосной. Перестройка величиной меньшей октавы в автогенераторе является широкополосной, когда $0,2 < K_{\text{пер}} < 0,666$ при условии $f_{\max}/f_{\min} < 2$. Если величины перестройки частот превышают октаву, автогенераторы считаются сверхширокополосными [11]. При этом увеличение значений $K_{\text{пер}}$, как правило, приводит к росту нестабильности частоты.

Если изменения частотно-зависимых параметров элементов автогенераторов не связаны с целенаправленным действием разработчика, а определяются различными (временными t , температурными T , режимными (изменениями напряжения питания E и нагрузки R) и др.) причинами, то говорят не о процессах управления частотой f_0 , а о процессах ее дестабилизации. Если в автогенераторах предпринимаются попытки уменьшения влияния перечисленных дестабилизирующих факторов на частоту, то такой процесс называется стабилизацией. В отличие от процессов управления частотой стабилизация частоты АГ зависит от других, весьма специфических причин, которые описаны в разд. 1.4. Относительные изменения (нестабильность) рабочей частоты δf_0 при воздействии различных дестабилизирующих факторов характеризуются следующим показателем:

$$\delta f = \frac{|f_{0\text{нач}}(p\{t; T; E; R\dots\}) - f_{0\text{кон}}(p\{t; T; E; R\dots\})|}{f_{0\text{кон}}(p\{t; T; E; R\dots\})}, \quad (1.2)$$

где $f_{0\text{нач}}(p\{t; T; E; R \dots\})$ и $f_{0\text{кон}}(p\{t; T; E; R \dots\})$ — значения рабочей частоты f_0 при начальном и конечном параметре $p\{t; T; E; R \dots\}$. Например, если время усреднения (наблюдения) t за частотой автогенератора условно меньше 1 секунды [6], то говорят о кратковременной нестабильности частоты. Вместе с тем периоды наблюдения, большие минуты, часа, суток, месяца и года, используются для оценки долговременной нестабильности.

Несмотря на принятые меры по частотной стабилизации, выходные колебания автогенераторов испытывают стохастическую (случайную) фазовую и амплитудную модуляцию, обусловленную фазовыми и амплитудными флуктуациями (или шумами) компонент автогенератора, системы управления частотой и системы частотной стабилизации [11]. К источникам флуктуаций фазы и амплитуды колебания автогенератора относятся естественные и технические шумы [25]. Причиной естественных шумов (теплового и дробового шумов) является тепловое движение носителей заряда и его дискретная природа. Технические шумы обусловлены фликкерным шумом и флуктуациями параметров, связанных с элементами радиоэлектронных схем. В настоящее время термин «технический шум» практически не применяется [26], а вместо него в литературе закрепился термин «фликкерный шум» или «фликкер-шум». На практике показателями амплитудных и фазовых шумов автогенераторов являются математические (двухсторонние) энергетические спектры $S_\alpha(\Omega)$ и $S_\varphi(\Omega)$ случайных функций, которые описывают относительные отклонения амплитуды и фазы. Здесь $\Omega = 2\pi f_m$ — циклическая частота анализа или отстройки от частоты $2\pi f_0$, $\Omega \in \{-\infty; +\infty\}$, а значения $S_\alpha(\Omega)$, $S_\varphi(\Omega)$ приводятся к полосе 1 Гц. При малых девиациях фазы односторонний фазовый шум принято описывать значением спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых флуктуаций или шумов — $L_\varphi(f_m) = 0,5S_\varphi(f_m)$ в одной боковой полосе на выбранной частоте отстройки (анализа) f_m от несущей частоты f_0 , как на рис. 1.4.

Величина СПМ фазовых шумов определяется следующим образом:

$$L_\varphi(f_m) = \frac{P_S \text{ 1Гц}(f_m)}{P_S} = \frac{S_\varphi(f_m)}{2}, \quad (1.3)$$

где P_S — мощность сигнала на основной частоте f_0 , а $P_S \text{ 1Гц}(f_m)$ — плотность мощности фазовых шумов в полосе 1 Гц на частоте анализа (отстройки) — $f_m > 0$. Поэтому по отношению к несущей частоте величина $L_\varphi(f_m)$ выражается дБн/Гц. Амплитудный шум описывается аналогичным (1.3) уравнением для СПМ амплитудных

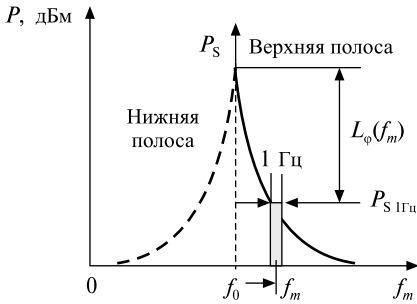


Рис. 1.4. Спектральная плотность мощности шума

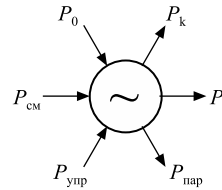


Рис. 1.5. Баланс мощностей в модели автогенератора

флуктуаций — $L_{\alpha}(f_m)$. Общие сведения о данных шумовых характеристиках автогенераторов и традиционных путях их уменьшения представлены в разд. 1.5. Там же показано, что формула (1.3) справедлива в приближении малости амплитудных шумов по сравнению с фазовыми или в том случае, когда при малых частотах отстройки форма линии колебания определяется лишь фазовыми шумами.

Не менее важные свойства автогенераторов описываются их энергетическими показателями (уровнями выходной мощности P колебания основной частоты и ее гармонических P_k и побочных «паразитных» $P_{\text{пар}}$ составляющих, КПД), а также характеристиками чувствительностей этих параметров δP , δP_k и $\delta P_{\text{пар}}$ при изменении дестабилизирующих факторов.

Энергетический баланс в АГ поясняется при помощи рис. 1.5. В данной модели АГ P_k — выходная мощность k -й гармоники основного колебания, $P_{\text{пар}}$ — мощность побочного колебания, P_0 — мощность, поступающая в коллекторную цепь АЭ автогенератора, $P_{\text{см}}$ — мощность, поступающая в цепь смещения транзистора АГ, $P_{\text{упр}}$ — мощность, поступающая в цепь управления частотой. Используя эти мощностные характеристики, определим энергетическую эффективность, или коэффициент полезного действия (КПД) автогенератора. Если считать, что КПД характеризуется эффективностью преобразования энергии только с помощью управляемого движения электронов в транзисторе, то по аналогии с усилителями мощности [6] определим «электронный» (коллекторный или стокковый) КПД в виде

$$\eta = \left(\frac{P}{P_0} \right) \cdot 100 \%. \tag{1.4}$$

В зарубежной литературе в уравнении (1.4) под мощностью P_0 понимается вся поступающая в транзистор мощность постоянного