

На правах рукописи

ПЕРФИЛЬЕВ Алексей Анатольевич

**ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ В
АВТОГЕНЕРАТОРАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

Специальность 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения

Береза

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2001

Работа выполнена на кафедре Формирования колебаний и сигналов Московского энергетического института (Технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор КУЛЕШОВ В. Н.

Официальные оппоненты. доктор физико-математических наук,
профессор ХОТУНЦЕВ Ю. Л.,
кандидат технических наук,
профессор НАРЫШКИН А. К.

Ведущая организация: Московский НИИ приборостроения.

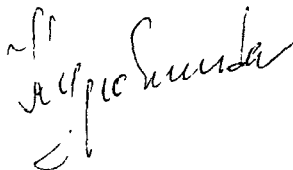
Защита состоится 21 июня 2001 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного Совета Д 212.157.05 Московского энергетического института (Технического университета) по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, ауд. А-402.

Отзывы, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Автореферат разослан «18» мая 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к. т. н., доцент



Курочкина Т. И.

2001-А
3315

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие радиоэлектроники требует создания источников колебаний СВЧ со всё более низкими уровнями побочных шумовых излучений и всё меньшей кратковременной нестабильностью частоты. В настоящее время в СВЧ диапазоне одними из наилучших по шумовым характеристикам являются автогенераторы (АГ) на биполярных транзисторах (БТ).

Особенность анализа СВЧ АГ на БТ состоит в том, что адекватные таким АГ модели являются весьма сложными. Форму колебаний на нелинейных элементах таких систем, как правило, нельзя считать гармонической. Поэтому даже в недонапряженном режиме (НР) одnogармонический (ОГ) расчет флуктуаций дает результаты, ценность которых, как правило, невелика. Кроме того, в ряде случаев, например при проектировании маломощных АГ с автономным питанием и АГ с повышенной амплитудной стабильностью, необходим расчет флуктуаций в перенапряженном режиме (ПР).

Расчет флуктуаций в АГ в описанных выше случаях с приемлемой для практических целей точностью можно выполнить только полигармоническим (ПГ) методом, позволяющим учесть как сложный гармонический состав напряжений на переходах БТ, так и шумовое воздействие на АГ в окрестностях частот высших гармоник. Поэтому задачи анализа и исследования флуктуационных характеристик АГ на БТ полигармоническим методом являются весьма актуальными.

Цели работы:

- разработка методов анализа и параметрического синтеза маломощных АГ на БТ, в основу которых положен полигармонический расчет стационарного режима и флуктуаций;
- разработка программ, позволяющих рассчитывать параметры и характеристики АГ на основе этих методов;
- исследование флуктуационных характеристик АГ на БТ, работающих в недонапряженном и перенапряженном режимах и анализ возможностей снижения флуктуаций. Определение зависимости минимально достижимых уровней СПМ относительных естественных флуктуаций частоты от рабочей частоты, мощности и КПД.

Новые научные результаты, полученные в диссертации.

1 Получены выражения для полигармонического расчета флуктуаций в АГ с нелинейной зарядовой СВЧ моделью БТ, работающих как в недонапряженном, так и в перенапряженном режимах.

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 2001 акт/33

2 На примере СВЧ АГ на БТ исследованы особенности практического использования полигармонического метода анализа флуктуаций в автономных системах с периодическими колебаниями.

3. Введено обобщенное понятие прочности предельного цикла в АГ с периодическими, но негармоническими колебаниями, в котором принимаются во внимание как уравнение смещения, так и уравнения баланса высших гармоник.

4 Разработан метод полигармонического параметрического синтеза АГ на заданные рабочую частоту, мощность в нагрузке и КПД.

5. Исследованы погрешности одногармонических расчетов флуктуаций в АГ на БТ в различных диапазонах рабочих частот и режимах.

6. Для емкостной трёхточечной схемы АГ на СВЧ БТ исследованы зависимости минимально достижимого уровня СПМ естественных флуктуаций частоты от рабочей частоты, мощности в нагрузке, КПД и добротности колебательной системы в коллекторно-базовой ветви цепи обратной связи (ЦОС).

7. Исследовано влияние степени захода в перенапряжённый режим на энергетические и флуктуационные характеристики СВЧ АГ на БТ.

8. Исследовано влияние нелинейностей барьерных емкостей переходов БТ на энергетические и флуктуационные характеристики СВЧ АГ.

9 Проведено исследование соотношения вкладов различных источников естественных шумов в общий уровень флуктуаций амплитуды и частоты в АГ в различных диапазонах рабочих частот и режимах.

Практическая значимость результатов работы.

1. Создан комплекс программ для исследования АГ с использованием СВЧ модели БТ, позволяющий в рамках единого спектрального подхода проводить:

- полигармонический анализ стационарного режима и флуктуаций в АГ, работающих как без открывания, так и с открыванием коллекторного перехода БТ;
- анализ устойчивости стационарного режима АГ;
- параметрический полигармонический синтез АГ на заданные параметры стационарного режима с параллельным анализом устойчивости и флуктуаций.

2. Результаты исследования взаимосвязи между флуктуационными и энергетическими характеристиками АГ позволяют правильно формулировать требования к маломощным экономичным малшумящим СВЧ АГ на БТ при их разработке.

Реализация результатов работы

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре Формирования колебаний и сигналов МЭИ (ТУ) при выполнении студентами курсовых и дипломных проектов и бакалаврских работ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Получены системы уравнений и разработаны алгоритмы комплексного ПП расчета стационарного режима, устойчивости и флуктуаций в АГ СВЧ на БТ, работающих как в недонапряженном, так и в перенапряженном режимах.

2. На основе этих уравнений разработан метод параметрического синтеза АГ, позволяющий при заданных рабочей частоте и энергетических показателях (мощность и КПД) оптимизировать АГ по флуктуациям частоты.

3. Для типовой схемы АГ, построенного на БТ СВЧ диапазона, проведено исследование зависимостей минимально достижимого уровня естественных флуктуаций частоты от частоты автоколебаний, мощности в нагрузке, КПД и добротности ненагруженной колебательной системы. Для оптимизированных таким образом АГ рассчитаны уровни фликкерных флуктуаций частоты.

4. Проведен анализ влияния числа учитываемых гармоник на точность расчета спектральных характеристик флуктуаций и оценены погрешности приближенных одногармонических методов.

5. Исследовано влияние степени перенапряженности режима на энергетические и флуктуационные характеристики СВЧ АГ на БТ.

6. Проведено исследование соотношения вкладов различных источников естественных шумов в общий уровень флуктуаций частоты и амплитуды в широком диапазоне рабочих частот АГ.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и семинарах.

1. Ежегодная НТК студентов и аспирантов ВУЗов России “Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве”, 25 – 26 февраля 1998, г. Москва.

2. Пятая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”, 2 – 3 марта 1999, г. Москва.

3. Научно-технический семинар МНТОРЭС имени А. С. Попова, секция “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”, 29 ноября – 3 декабря 1999, г. Москва.

4. Шестая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”, 1 – 2 марта 2000, г. Москва.

5. Научно-технический семинар МНТОРЭС имени А. С. Попова, секция “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”, 20-24 ноября 2000, г. Москва.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в пяти работах [1-5].

Объём и структура работы.

Диссертационная работа изложена на 146 страницах, иллюстрирована 54 рисунками и содержит 7 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 64 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, определены цели исследования, сформулированы новые научные результаты, приведены положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации работы.

В первой главе приводится краткое изложение используемого в данной работе полигармонического метода анализа флуктуаций в АГ.

Рассматривается модель автономной системы с одним нелинейным элементом, описываемая символическим уравнением

$$u + W(p)f(u) = u_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $p = d/dt$, $W(p)$ – символический коэффициент передачи устойчивой стационарной линейной системы, $f(u)$ – характеристика нелинейного элемента, $u_{\text{ш}}$ – малое внешнее шумовое воздействие.

Проблема анализа флуктуаций в АГ заключается в том, что допущение о малости отклонения движения $u(t)$, возмущенного действием малого шума $u_{\text{ш}}$, от периодического решения (1) при $u_{\text{ш}}=0$ несправедливо. Это связано с тем, что в автономной системе уход фазы возмущенного колебания $u(t)$ от фазы периодического $u_{\text{п}}(t)$ с течением времени может стать сколь угодно большим и, следовательно, разность $u(t) - u_{\text{п}}(t)$ будет того же порядка, что и $u_{\text{ш}}(t)$.

Для решения этой проблемы вводится собственное время системы

$$t_c = t + \varphi(t)/\omega_0,$$

где $\varphi(t)$ – медленная часть разности фаз первых гармоник возмущенного и невозмущенного колебаний, спектр которой отличен от нуля только при $|\omega| \leq \omega_v$, где $\omega_v \ll \omega_0$ – частота, выбираемая с некоторой степенью произвола; ω_0 – частота автоколебаний. Это позволяет искать решение (1) в виде суммы невозмущенного

периодического колебания $u_n(t_c)$ и малого флуктуационного отклонения $u_\phi(t_c)$, вызванного действием $u_{ш}$, как функций собственного времени системы:

$$u(t_c) = u_n(t_c) + u_\phi(t_c), \quad (2)$$

и провести линеаризацию (1) в окрестности $u_n(t_c)$.

Представим процессы $u_n(t_c)$ и $u_\phi(t_c)$ в виде отрезков рядов

$$u_n(t_c) = \sum_{n=-N}^N U_n e^{in\omega_0 t_c}, \quad (3)$$

$$u_\phi(t_c) = \sum_{n=-N}^N U_n^\phi(t_c) e^{in\omega_0 t_c}, \quad (4)$$

и разделим процессы $U_n^\phi(t_c)$, $n = -N \dots N$, на медленные и быстрые части

$$U_n^\phi(t_c) = U_n^{\phi M}(t_c) + U_n^{\phi B}(t_c) \quad (5)$$

таким образом, чтобы спектры медленных частей были отличны от нуля только при $|\omega| \leq \omega_0$. Поскольку начало отсчета времени в автономной системе может быть выбрано произвольно, выберем его так, чтобы была равна нулю начальная фаза первой гармоники:

$$\text{Im } U_1 = 0. \quad (6)$$

Определению подлежат параметры периодического режима – частота ω_0 и комплексные полуамплитуды U_n , $n = -N \dots N$, и спектральные характеристики процессов $u = r\phi/\omega_0$, $U_n^{\phi M}$ и $U_n^{\phi B}$, $n = -N \dots N$, в предположении, что известны спектральные характеристики внешнего воздействия

$$u^w(t_c) = \sum_{n=-N}^N U_n^w(t_c) e^{in\omega_0 t_c} = \sum_{n=-N}^N \left(U_n^{wM}(t_c) + U_n^{wB}(t_c) \right) e^{in\omega_0 t_c}. \quad (7)$$

Смысл ограничения сверху спектра процесса $\phi(t)$ частотой ω_0 и разделения процессов $U_n^\phi(t_c)$ на медленные и быстрые части состоит в том, чтобы в получаемых уравнениях для быстрых частей отсутствовал процесс ϕ , а при надлежащем выборе частоты ω_0 для расчета медленных флуктуаций можно было использовать квазистатический подход. Таким образом, ограничением сверху на выбор частоты ω_0 является условие применимости квазистатического расчета медленных флуктуаций. Ограничением снизу на выбор ω_0 является условие $\omega_0 \gg \Delta\omega_{nN}$, где $\Delta\omega_{nN}$ – ширина спектральной линии гармоники с максимальным номером ($n = N$).

Подстановка (2) в (1) с учетом (3), (4), (5), (7), приводит к системе уравнений

стационарного режима

$$U_n + W(in\omega_0)F_n = 0, \quad n = -N, \dots, N, \quad (8)$$

где F_n – коэффициенты Фурье функции $f(u_n(t_c))$ и к системам уравнений для флуктуаций $\{U_n^{\text{ФМ}}\}$ и $\{U_n^{\text{ФБ}}\}$:

$$\hat{C}(0)\bar{U}_{\text{ФМ}}(t_c) = -\bar{D}y(t_c) + \bar{U}_{\text{шм}}(t_c), \quad (9)$$

$$\hat{C}(p_c)\bar{U}_{\text{ФБ}}(t_c) = \bar{U}_{\text{шб}}(t_c), \quad (10)$$

где

$$\hat{C}(p_c) = \|\delta_{nk} + W(p_c + in\omega_0)\sigma_{n-k}\|, \quad n, k = -N, \dots, N,$$

$$\bar{D} = \|in\omega_0 W'(in\omega_0)F_n\|, \quad n = -N, \dots, N,$$

$$\bar{U}_{\text{ФМ, ФБ, шм, шб}}(t_c) = \|\|U_n^{\text{ФМ, ФБ, шм, шб}}(t_c)\|\|,$$

где σ_n , $n = -2N, \dots, 2N$, – коэффициенты Фурье функции $f'(u_n(t_c))$, $p_c = d/dt_c$ – оператор дифференцирования по собственному времени, δ_{nk} – символ Кронекера.

В ходе решения нелинейной системы (8) с учетом условия (6) определяются частота автоколебаний ω_0 и комплексные полуамплитуды U_n . Если решение найдено верно, то в соответствии с теоремой Пуанкаре об автономных системах должно выполняться условие

$$\det \hat{C}(0) = 0.$$

Уравнение (9) с учетом условия $\text{Im} U_i^{\text{ФМ}}(t_c) = 0$, аналогичного (6), может быть представлено в виде:

$$\hat{C}_a \bar{U}_y(t_c) = \bar{U}_{\text{шм}}(t_c),$$

где

$$\hat{C}_{a_{nk}} = \begin{cases} C_{nk}(0), & k \neq \pm 1 \\ C_{n,-1}(0) + C_{n,1}(0), & k = 1, \\ D_n, & k = -1 \end{cases}$$

$$U_{y_n}(t_c) = \begin{cases} U_{\text{ФМ}_n}(t_c), & n \neq -1 \\ y(t_c), & n = -1 \end{cases}.$$

Решая его, можно найти квазистатистические выражения для процессов $U_n^{\text{ФМ}}(t_c)$ и $y(t_c)$. Таким образом получают все исходные данные для расчета форм и крыльев спектральных линий колебания $u_n(t)$ при $|\omega - \omega_0| \leq \omega_v$, $n = -N, \dots, N$, а также для квазистатистического расчета флуктуаций амплитуд квазигармоник колебания $u(t)$.

Решение уравнения (10) проводится в частотной области. Пусть $\hat{S}_m(\omega)$ – известная спектральная матрица вектора $\bar{U}_m(t_c)$. Тогда спектральная матрица вектора $\bar{U}_{\Phi\delta}(t_c)$ определяется выражением

$$\hat{S}_{\Phi\delta}(\omega) = \hat{C}^{-1}(\omega)\hat{S}_m(\omega)\hat{C}^{-1*}(\omega), \quad \omega_v < |\omega| < \omega_0/2,$$

где знак “*” означает операцию сопряжения по Эрмиту.

Совокупность диагональных элементов матрицы $\hat{S}_{\Phi\delta}(\omega)$ определяет СПМ генерируемого колебания в полосе частот $|\omega| < (N + 0.5)\omega_0$, за исключением окрестностей центров спектральных линий $|\omega - n\omega_0| \leq \omega_v$, $n = -N, \dots, N$. В этих окрестностях спектр колебания находится по результатам квазистатистического расчета флуктуаций. Рассчитываемая СПМ должна быть непрерывна при $\omega = n\omega_0 \pm \omega_v$, и эта непрерывность является одним из критериев верности расчетов.

Для расчета флуктуаций амплитуды $m_n(t)$ и фазы $\varphi_n(t)$ n -й квазигармоники автоколебаний используются формулы:

$$m_n(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{U_n^\Phi(t)}{U_n} + \frac{U_{-n}^\Phi(t)}{U_{-n}} \right),$$

$$\varphi_n(t) = \frac{n\omega_0}{p} y(t) + \frac{1}{2i} \left(\frac{U_n^\Phi(t)}{U_n} - \frac{U_{-n}^\Phi(t)}{U_{-n}} \right).$$

Таким образом, если известна спектральная матрица источника шума $\hat{S}_m(\omega)$, то с помощью флуктуационных уравнений (9), (10) находится СПМ автоколебания в полосе частот $|\omega| < (N + 0.5)\omega_0$ и СПМ флуктуаций амплитуд и фаз его квазигармоник на частотах анализа от нулевой до $(\omega_0/2)$.

Анализ устойчивости автоколебаний проводится путем построения годографа характеристического определителя $\Delta(i\omega) = \det \hat{C}(i\omega)$, представляющего при $N \rightarrow \infty$ замкнутую кривую, проходящую через начало координат. Для устойчивости автоколебаний необходимо и достаточно, чтобы этот годограф не охватывал начало координат.

К новым результатам, полученным в первой главе, относится обобщение понятия прочности предельного цикла на случай существенно негармонических автоколебаний

$$П = \frac{1}{\left(\hat{C}_a^{-1} \right)_{l,-1} + \left(\hat{C}_a^{-1} \right)_{l,1}}$$

и вывод выражения для спектральных характеристик выходного колебания АГ $v(t)$, определяемого символическим уравнением $v = W_1(p)F(u) + W_2(p)u_m$, где $W_1(p)$ и

$W_2(p)$ – символические коэффициенты передачи устойчивых стационарных линейных систем.

Вторая глава посвящена описанию используемой в работе модели БТ и полигармоническому анализу режима и флуктуаций в АГ, работающих в недонапряженном режиме.

Используемая в работе эквивалентная схема БТ приведена на рис. 1, где $\beta_{п}$ ($\beta_{и}$) – статический прямой (инверсный) коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ (ОК); $\tau_{пн}$ ($\tau_{ти}$) – прямое (инверсное) время движения носителей через базу;

$$i_{кп,ки} = I_s (\exp(u_{б'з'}/\varphi_T) - 1),$$

где I_s тепловой ток насыщения, φ_T – тепловой потенциал;

$$C_{эб} = C_{эо} (1 - u_{б'з'}/\varphi_3)^{-\gamma_3}, \quad C_{ка} = C_{као} (1 - u_{б'к'}/\varphi_k)^{-\gamma_k},$$

где $C_{эо}$ ($C_{као}$) – барьерная емкость эмиттерного (активная часть барьерной емкости коллекторного) перехода при $u_{б'з'} = 0$ ($u_{б'к'} = 0$), φ_3 (φ_k) – контактная разность потенциалов эмиттерного (коллекторного) перехода; $i_{рп}^{ш}$, $i_{ри}^{ш}$ и $i_{д}^{ш}$ – некоррелированные источники шумовых токов (рекомбинационного, рекомбинационного инверсного и дробового) с автокорреляционными функциями $B_{рп,ри}(t, \tau) = q_e (i_{кп,ки}(t)/\beta_{п,и}) \delta(\tau)$ и $B_{д}(t, \tau) = q_e (i_{кп}(t) + i_{ки}(t)) \delta(\tau)$

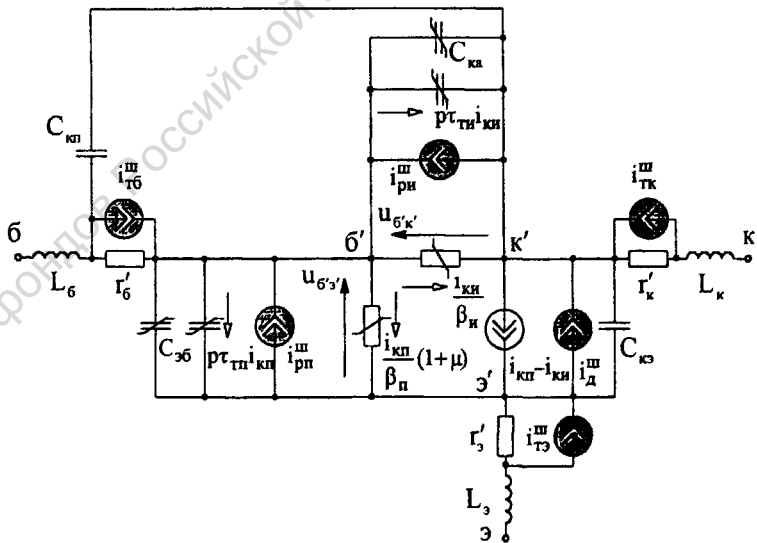


Рис 1. Эквивалентная схема транзистора.

соответственно; $i_{\Gamma 6}^{\text{ш}}$, $i_{\Gamma \text{к}}^{\text{ш}}$, $i_{\Gamma 3}^{\text{ш}}$ – источники тепловых шумовых токов сопротивлений Γ_6' , $\Gamma_к'$, Γ_3' со СПМ $2k_B T / \Gamma_{6,к,3}'$ соответственно; $\mu(t)$ – процесс, описывающий относительные фликкерные флуктуации рекомбинационной проводимости, СПМ которого определяется выражением

$$S_{\mu}(\omega) = S_{\mu}^{\text{ш}} (I_{\text{кн}} / I_{\text{кп0}})^{\alpha} (\omega_{\text{н}} / \omega)^{\gamma},$$

где $I_{\text{кп0}}$ – постоянная составляющая тока $i_{\text{кп}}$; $S_{\mu}^{\text{ш}}$, α , γ – параметры аппроксимации, причем обычно $\gamma \approx 1$.

Эквивалентная схема БТ непосредственно в рассмотренном виде используется в IV главе, посвященной анализу АГ с учетом нелинейности емкости $C_{\text{ка}}$ и захода в перенапряженный режим. Во второй и третьей главах используется упрощенная модель, описываемая схемой рис. 1 при $i_{\text{кн}} = 0$ и $\gamma_{\text{к}} = 0$.

Приводится рассматриваемая в работе схема АГ (рис. 2) и обсуждается его модель, используемая во второй главе. Хотя конкретные расчеты выполнены применительно к этому частному виду АГ, соотношения, полученные в диссертации, применимы для расчета режима и флуктуаций в любых эквивалентных схемах АГ, включающих рассмотренную эквивалентную схему БТ и не содержащих других нелинейных элементов.

Особенностью рассматриваемой модели является то, что все содержащиеся в ней нелинейные элементы управляются одной координатой – напряжением на эмиттерном переходе $u_{\text{б'}}$. Относительно этого напряжения записано основное исходное дифференциальное уравнение АГ в символической форме. Для расчета характеристик выходного колебания записано символическое выражение для напряжения на нагрузке. При анализе учитываются тепловые шумы всех элементов, входящих в эквивалентную схему АГ.

Приводятся уравнения и выражения для полгармонического расчета режима и флуктуаций, полученные из исходных символических уравнений методами, изложенными в первой главе. В соответствии с этими выражениями разработаны алгоритм и программа полгармонического анализа режима и флуктуаций в АГ, работающих в недонапряженном режиме, без учета нелинейности коллекторной емкости. Расчет стационарного режима и квазистатический расчет флуктуаций при $N=20$ и $\gamma_3=0$ занимает 2-3 с времени на ЭВМ с процессором типа PentiumII-500. Построение

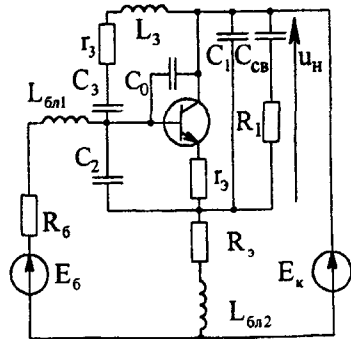


Рис.2. Ёмкостная трёхточечная схема АГ.

одографа характеристического определителя и расчет СПМ флуктуаций в 100 частотных точках занимают соответственно 3 и 25 с

Приведены примеры расчета спектральных характеристик флуктуаций в типовой схеме СВЧ АГ полигармоническим методом. На рис. 3 в качестве примера приведены графики СПМ флуктуаций напряжения $u_n(t)$, вызванных действием различных источников естественных шумов, в логарифмическом масштабе по частоте на каждом из интервалов $(nf_0, (n \pm 0.5)f_0)$, $n=0,1,\dots,12$. Минимальные отстройки от несущей равны $\pm 0.001f_0$

Исследуется зависимость погрешности стыковки квазистатического расчета СПМ флуктуаций с расчетом по уравнению, аналогичному (10), от вычислительной погрешности решения системы уравнений стационарного режима. В качестве количественной меры этой погрешности предложено использовать значение нормированного характеристического определителя $\tilde{\Delta}(i\omega) = \Delta(i\omega) / \max(\text{Re } \Delta(i\omega))$ при $\omega = 0$. Установлено, что для указанной стыковки СПМ с требуемой для практики точностью, как правило, необходимо, чтобы выполнялось условие $\tilde{\Delta}(0) < 10^{-5}$.

Исследованы зависимости величин разрывов СПМ автоколебания при $\omega = p\omega_0 + \omega_0/2$, $p=0,1,\dots,N-1$ от числа учитываемых гармоник N . Установлено, что величины разрывов достаточно быстро убывают с увеличением N . Так, например, в типовой схеме при $N=30$ величины разрывов при $p=0,1,\dots,28$ не превышают 10^{-3} дБ.

Предложен метод параметрического синтеза АГ на заданную рабочую частоту f_0 , мощность в нагрузке P_n , КПД η и СПМ естественных флуктуаций амплитуды первой гармоники напряжения u_n на нулевой частоте анализа S_{me}^0 . В основу этого метода положено решение системы уравнений гармонического баланса при заданной частоте f_0 , дополненной уравнениями для P_n , η и S_{me}^0 . Заданными считаются также добротность коллекторно-базовой ветви цепи обратной связи и условие работы АГ в критическом режиме, который определен условием равенства нулю минимального значения напряжения на коллекторном переходе. В ходе решения этой системы, состоящей из $2N+4$ нелинейных уравнений, одно из которых (для S_{me}^0) включает всю процедуру полигармонического расчета флуктуаций, определяются параметры L_3 , E_6 , R_1 , R_3 .

В соответствии с предложенным методом разработаны алгоритм и программа полигармонического синтеза АГ. Программа позволяет, начиная с анализа АГ с какими-либо известными параметрами схемы (L_3, E_6, \dots), проводить синтез на заданные параметры режима (f_0, P_n, \dots) путем пошагового изменения последних от значений, полученных в результате анализа, до требуемых. Как правило, для получения требуемых результатов (если они достижимы) необходимо провести не более 10-20 итераций,

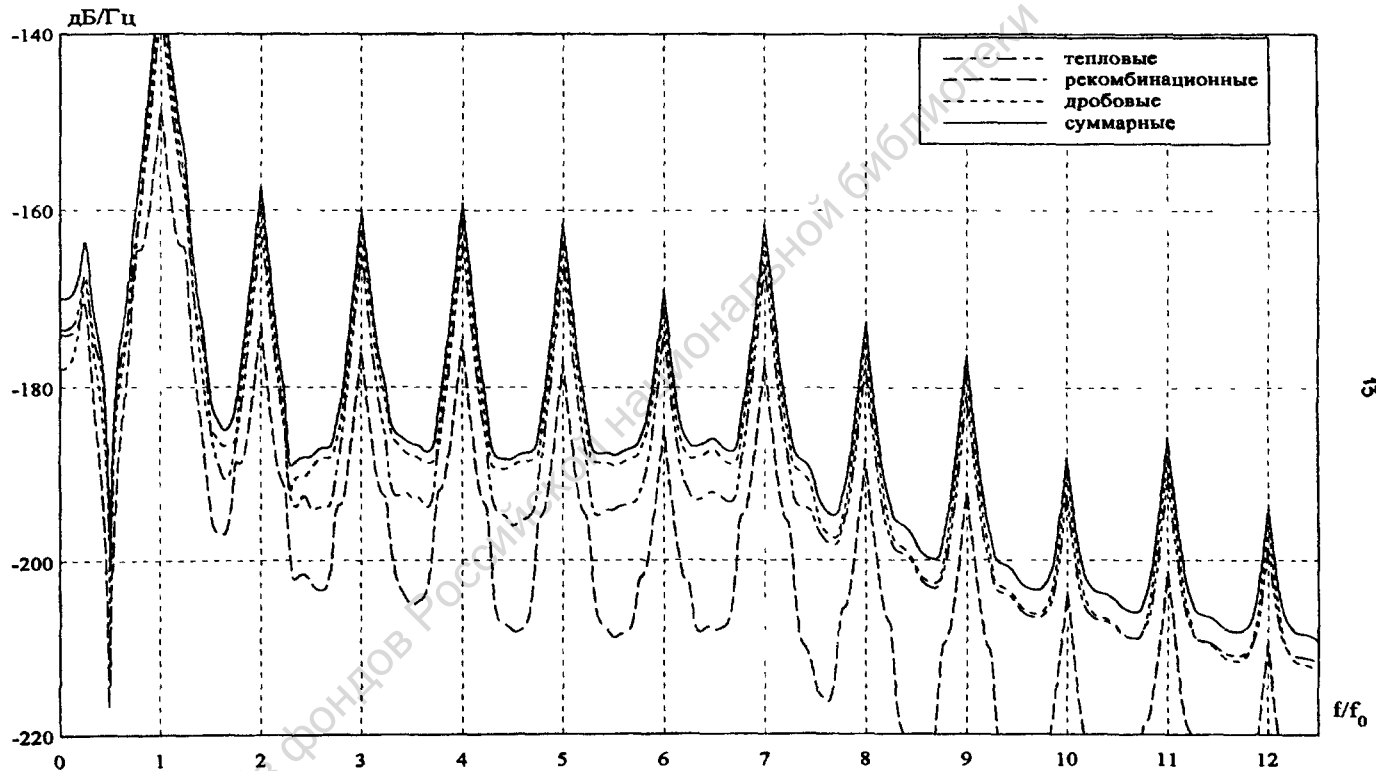


Рис. 3. СПМ флуктуаций напряжения $u_n(t)$, вызванных действием различных источников естественных шумов.

причем одна итерация при $N = 10$ занимает в среднем около секунды процессорного времени.

Программа может быть эффективно использована для проектирования АГ. Основное же ее применение в данной работе – оптимизация АГ по флуктуациям частоты и исследование флуктуационных характеристик при заданных энергетических характеристиках.

Приведены уравнения АГ относительно напряжения $u_{б'з}$ и заряда емкости эмиттерного перехода $q_3 = \tau_{тп} i_{кл} + q_{зб}$, полученные при условии $\gamma_3 = 0$ и представленные в виде уравнения с одним нелинейным элементом (1). Установлена простая связь между этими уравнениями.

Проведен подробный анализ погрешности одногармонического метода расчета флуктуаций частоты в простейшем АГ с безынерционной кусочно-линейной моделью БТ. Установлено, что при типовом значении угла отсечки $\theta = 70^\circ$ ОГ метод дает значение СПМ флуктуаций частоты, вызванных тепловым шумом сопротивления базы, заниженное на 5 дБ. Величина этой погрешности практически не зависит от остальных параметров АГ при $Q \gtrsim 5$.

Обсужден вопрос о числе гармоник, которые необходимо учитывать для расчета режима и флуктуаций в СВЧ АГ с приемлемой для практики точностью и для надежного ответа на вопрос об устойчивости автоколебаний в таких АГ.

Установлено, что расчеты флуктуаций частоты при учете одной гармоники напряжения $u_{б'з}$ и одной гармоники заряда q_3 в типовых схемах могут иметь погрешности порядка 20 и 10 дБ соответственно. Поэтому одногармонические методы в общем случае непригодны даже для оценки уровня флуктуаций в СВЧ АГ. Для расчета СПМ флуктуаций частоты в СВЧ АГ с погрешностью не более 1-2 дБ необходимо учитывать не менее четырех гармоник напряжения $u_{б'з}$.

Построение годографов характеристических определителей $\tilde{\Delta}(i\omega)$ для различных схем показало, что для надежного ответа на вопрос об устойчивости автоколебаний в СВЧ АГ, как правило, необходимо учитывать не менее 15-20 гармоник.

Третья глава посвящена исследованию флуктуационных характеристик АГ на БТ, работающих в критическом режиме, без учета нелинейности барьерной емкости коллекторного перехода. Основное внимание уделено обсуждению результатов оптимизации АГ по естественным флуктуациям частоты на нулевой частоте анализа S_{ue}^0 .

Описывается постановка задачи оптимизации АГ. Заданными считаются вид схемы АГ (рис. 2) и модель транзистора, используемая во II главе (учитывается нелинейность барьерной емкости эмиттерного перехода, но не учитывается нелинейность

емкости коллекторного перехода). Блокировочные элементы предполагаются такими, что они не влияют на результаты расчета режима и флуктуаций.

При рассматриваемом варианте оптимизации АГ минимизации подлежит функция

$$S_{ye}^0 = S_{ye}^0(\bar{X}; f_0, P_n, \eta, S_{me}^0, Q_0),$$

где $Q_0 = \omega_0 L_3 / \tau_3$, S_{me}^0 – СПМ естественных флуктуаций частоты на нулевой частоте анализа, по вектору параметров схемы АГ

$$\bar{X} = (C_1, C_2, C_3, \tau_3, C_0, R_6).$$

Оставшиеся параметры схемы – $L_3, E_6, R_1, R_3, \tau_3$ – определяются наряду с S_{ye}^0 по вектору \bar{X} и параметрам режима $f_0, P_n, \eta, S_{me}^0, Q_0$ путем полигармонического расчета-синтеза. Напряжение питания E_k рассчитывается из условия работы АГ в критическом режиме. В результате получается зависимость

$$S_y^{\min}(f_0, P_n, \eta, S_{me}^0, Q_0) = \min_{\bar{X}} S_{ye}^0(\bar{X}; f_0, P_n, \eta, S_{me}^0, Q_0).$$

Различные сечения этой зависимости, а также соответствующих зависимостей оптимальных параметров \bar{X}^{opt} и $L_3^{\text{opt}}, E_6^{\text{opt}}, R_1^{\text{opt}}, R_3^{\text{opt}}, \tau_3^{\text{opt}}, E_k^{\text{opt}}$ были получены для типового маломощного СВЧ БТ с помощью программы полигармонического синтеза.

Во всех рассмотренных случаях оптимальными оказались нулевые значения параметров C_0 и R_6 .

Проведено обсуждение зависимости \bar{S}_y^{\min} от f_0, P_n, η, Q_0 , где

$$\bar{S}_y^{\min} = S_y^{\min} / S_{y_0}^{\min} -$$

нормированная СПМ флуктуаций частоты, где

$$S_{y_0}^{\min} = \frac{k_6 \Gamma}{2} \frac{1}{(1-\eta)^2 Q_0^2} \frac{1}{P_n / \eta} \quad (11)$$

минимально достижимый уровень СПМ флуктуаций частоты, вызванных тепловыми шумами контура, в АГ при стремлении рабочей частоты к нулю.

Зависимость $\bar{S}_y^{\min}(f_0)$ приведена на рис. 4. Оказалось, что в некотором диапазоне рабочих частот S_{ye}^0 имеет несколько локальных минимумов. Каждому из этих минимумов соответствует своя кривая на рис. 4. Там же приведены вклады в \bar{S}_y^{\min} различных источников естественных шумов. Установлено, что на низких для транзистора частотах (левая ветвь на рис. 4) оптимальной является схема с наличием ООС по току. На более высоких частотах оптимальным является значение $\tau_3 = 0$. Важно от-

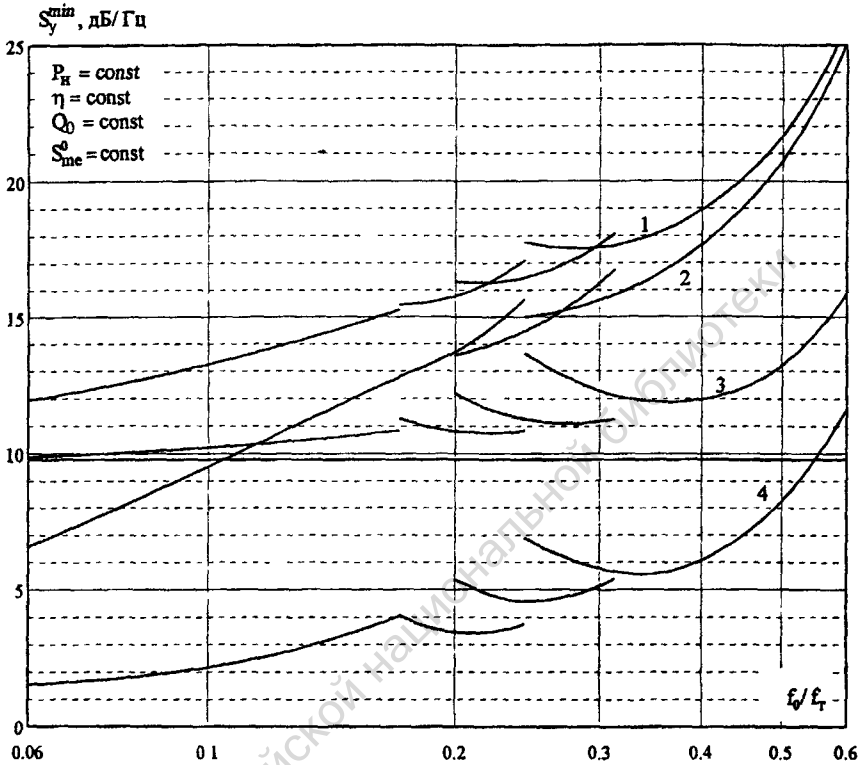


Рис. 4. Зависимость S_y^{\min} от рабочей частоты (1) и вклады в S_y^{\min} различных источников естественных шумов (2 – дробовых, 3 – тепловых, 4 – рекомбинационных).

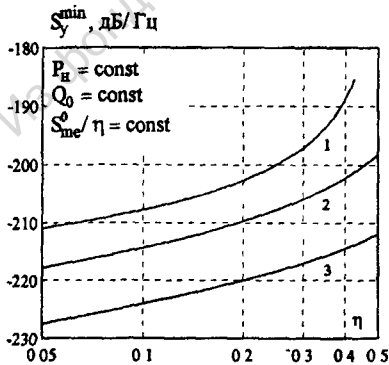


Рис. 5. Зависимости минимально достижимых уровней СПМ флуктуаций частоты от КПД: 1 – при $f_0/f_T \approx 0.3$; 2 – при $f_0/f_T \rightarrow 0$; 3 – при $f_0/f_T \rightarrow 0$ и учета действия только тепловых шумов контура.

метить, что S_y^{min} лежит ниже уровня S_{ye}^0 типовых схем АГ, получаемых методами синтеза, не учитывающими требования к флуктуационным характеристикам, на 10 и более децибеллов.

От мощности P_n и добротности Q_0 величина \tilde{S}_y^{min} зависит незначительно. Так, в декадном диапазоне изменения мощности P_n , верхняя граница которого соответствует работе транзистора вблизи границы области допустимых режимов, как на низких, так и на высоких рабочих частотах \tilde{S}_y^{min} меняется в пределах одного децибелла, т. е. S_y^{min} идет приблизительно как $1/P_n$. При увеличении Q_0 от 10 до ∞ , \tilde{S}_y^{min} увеличивается всего на 2 дБ, т. е. S_y^{min} даже при относительно небольших значениях добротности ($Q_0 = 10 \dots 50$) изменяется почти пропорционально $1/Q_0^2$.

На рис. 5 показаны зависимости $S_y^{\text{min}}(\eta)$ на низкой и высокой рабочих частотах, а также график функции $S_{y0}^{\text{min}}(\eta)$, определяемой выражением (11). Зависимости такого типа могут представлять существенный интерес при проектировании маломощных АГ с автономным питанием.

Приведены зависимости погрешностей одногармонических расчетов мощности в нагрузке и СПМ флуктуаций частоты в оптимальных схемах АГ от рабочей частоты. Установлено, что на частотах $f_0 = (0,4 + 0,6)f_1$ одногармонический метод расчета флуктуаций частоты относительно заряда q_0 в оптимальных схемах АГ имеет погрешность 2-3 дБ и может быть использован в оценочных расчетах.

Показано, что нелинейность барьерной емкости эмиттерного перехода $C_{эб}$ существенно влияет на естественные флуктуации частоты в схемах, близких к оптимальным. Влияние нелинейности $C_{эб}$ на фликкерные флуктуации частоты в этих схемах имеет порядок 1-5 дБ в зависимости от рабочей частоты. В общем случае можно привести такие примеры схем АГ, когда учет нелинейности емкости $C_{эб}$ при неизменном усредненном по первой гармонике значении приводит к увеличению S_{ye}^0 более чем на 10 дБ.

Четвертая глава посвящена анализу АГ с учетом нелинейности емкости $C_{ка}$ и АГ, работающих в перенапряженном режиме.

Обсуждается используемая модель АГ, основной особенностью которой является то, что содержащиеся в ней нелинейные элементы управляются двумя различными координатами – напряжениями на переходах $u_{б'э'}$ и $u_{б'к'}$. Относительно этих напряжений записана исходная система дифференциальных уравнений. Для расчета ха-

характеристик выходного колебания записано символическое выражение для напряжения на нагрузке.

Приведены уравнения и выражения, по которым проводится полигармонический расчет стационарного режима и флуктуаций, полученные путем применения методов, описанных в первой главе, к исходным символическим уравнениям рассматриваемой модели АГ. В соответствии с этими выражениями разработана программа полигармонического анализа режима и флуктуаций в АГ, работающих в ПР, с учетом нелинейности емкости $C_{ка}$. Расчет периодического режима при $N = 20$, как правило, занимает от 1 до 20 секунд процессорного времени в зависимости от степени перенапряженности режима. Построение годографа характеристического определителя и расчет СПМ флуктуаций в 100 частотных точках занимают соответственно 5 и 40 с.

Кроме того, разработаны алгоритм и программа полигармонического параметрического синтеза АГ в перенапряженном режиме с учетом нелинейности емкости $C_{ка}$, в которых в отличие от второй главы, условие работы АГ в критическом режиме не задается, а напряжение питания E_k относится к исходным данным.

Исследовано влияние нелинейности емкости $C_{ка}$ на флуктуационные характеристики оптимальных схем СВЧ АГ, полученных в гл. III. Установлено, что нели-

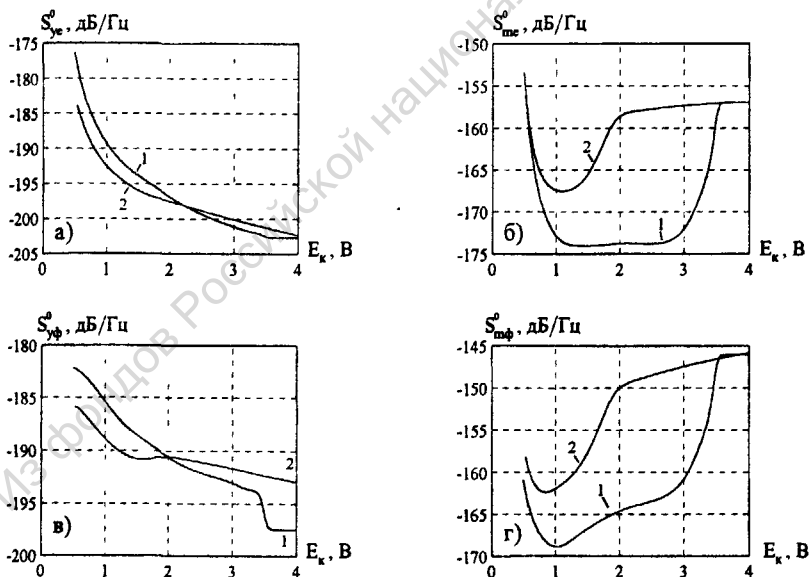


Рис 6. Зависимости СПМ естественных на нулевой частоте анализа (а,б) и фликкерных на частоте анализа 100 Гц (в,г) флуктуаций частоты и амплитуды от напряжения питания (1 – без учета нелинейности емкости $C_{ка}$; 2 – с учетом).

нейность емкости $C_{ка}$ несущественно влияет на величину минимально достижимого уровня СПМ естественных флуктуаций частоты S_y^{min} . Влияние нелинейности $C_{ка}$ на фликкерные флуктуации частоты в оптимальных схемах АГ имеет порядок 2-12 дБ в зависимости от рабочей частоты.

Приведены зависимости СПМ флуктуаций частоты и амплитуды СВЧ АГ, оптимальных в критическом режиме, от напряжения питания коллектора E_k при заданных параметрах стационарного режима (рабочей частоте, мощности в нагрузке и КПД), полученные с помощью программы полигармонического параметрического синтеза АГ как без учета, так и с учетом нелинейности емкости $C_{ка}$. Установлено, что минимум S_{ye}^0 достигается в режиме, близком к критическому. Учет нелинейности емкости $C_{ка}$ приводит к сглаживанию зависимостей $S_{ye}^0(E_k)$ и $S_{yф}^0(E_k)$ вблизи точки критического режима. Уровень естественных и фликкерных флуктуаций амплитуды резко спадает при заходе в перенапряженный режим. При уменьшении E_k на величину, соответствующую возрастанию S_{ye}^0 на 1 дБ по отношению к критическому режиму, амплитудные флуктуации уменьшаются на 15-20 дБ.

Исследовано влияние изменения напряжения питания на режим и флуктуации в СВЧ АГ. На рис. 6 приведены зависимости СПМ естественных и фликкерных флуктуаций частоты и амплитуды на нулевой частоте анализа от E_k для схемы, оптимальной при $f_0/f_T \approx 0.3$, с учетом и без учета нелинейности емкости $C_{ка}$. Исследованы вклады в амплитудные и частотные флуктуации различных источников естественных шумов. Установлено, что источник инверсного рекомбинационного шумового тока при не слишком сильной степени перенапряженности режима вносит незначительный вклад в суммарный уровень флуктуаций амплитуды и частоты.

В заключении сформулирован основной итог работы, состоящий в том, что для надежного практического расчета флуктуаций в автогенераторах на биполярных транзисторах целесообразно использовать полигармонический метод, и обозначены перспективы развития исследования.

Публикации по теме диссертации

1. *Перфильев А. А.* Сравнение одиогармонического и полигармонического расчетов режимов маломощных транзисторных автогенераторов СВЧ диапазона. // Ежегодная научн.-техн. конф. студентов и аспирантов ВУЗов России "Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве": Тезисы докладов. – М.: МЭИ, 1998 – Т. 1. – С. 35.

2. *Перфильев А. А.* Полигармонический расчет флуктуаций частоты и амплитуды автоколебаний в маломощных транзисторных автогенераторах СВЧ диапазона. // Пятая международная научн.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов. – М.: МЭИ, 1999 – Т. 1. – С. 39-40.

3. *Перфильев А. А., Кулешов В. Н.* Полигармонический анализ флуктуаций амплитуды и фазы в СВЧ автогенераторах на биполярных транзисторах. // Науч.-техн. семинар "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" (Москва, МНТОРЭС им. А. С. Попова, 29 нояб – 3 декаб. 1999 г.): Материалы докладов. – М.: МЭИ, 2000. – С. 131-135.

4. *Перфильев А. А.* О связи между энергетическими и флуктуационными характеристиками автогенераторов на биполярных транзисторах. // Шестая международная научн.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов. – М.: МЭИ, 2000 – Т. 1. – С. 45-46.

5. *Кулешов В. Н., Перфильев А. А.* Исследование $1/f$ шумов в СВЧ автогенераторах на биполярных транзисторах полигармоническим методом. // Науч.-техн. семинар "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" (Москва, МНТОРЭС им. А. С. Попова, 20 – 24 нояб 2000 г.): Материалы докладов – М.: МЭИ, 2001. – С. 49-53.

Подписано к печати
Печ. л. 1.25

Л–
Тираж 100 экз.

Заказ 189