

НЕАВТОНОМНЫЙ ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

Н.В. Атанов, А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Л.В. Кузьмин

Институт радиотехники и электроники РАН,
125009, Россия, г. Москва, ул. Моховая, 11/7.

chaos@cplire.ru

Экспериментально продемонстрирована генерация потока хаотических радиоимпульсов при внешнем воздействии периодического сигнала. Принципиальная возможность формирования потока хаотических радиоимпульсов была показана ранее на основе математического моделирования.

Введение

Хаотические радиоимпульсы являются перспективным носителем информации для сверхширокополосных беспроводных систем связи [1–4].

Последовательность хаотических радиоимпульсов может быть получена путём модуляции стационарного хаотического сигнала на выходе источника хаоса. Однако при этом только часть генерируемой источником хаоса мощности преобразуется в хаотические импульсы.

В работах [5, 6] предложено генерировать хаотические импульсы путём воздействия периодического сигнала на динамическую систему таким образом, чтобы обеспечить возбуждение хаотических колебаний на части периода внешнего сигнала и тем самым повысить эффективность генерации импульсов. Там же эта идея была апробирована с помощью численного моделирования на примере генератора хаоса с активным элементом – биполярным транзистором.

В данной статье на примере формирования хаотических импульсов в радиочастотном диапазоне работоспособность этой идеи проверяется путём моделирования в среде ADS и экспериментально. В качестве источника хаотического сигнала при моделировании в ADS и в эксперименте используется генератор хаоса с 2.5 степенями свободы с биполярным транзистором.

1. Модель неавтономного генератора в ADS

Математическая модель генератора основывается на применении законов Кирхгофа к электрической схеме и описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, если речь идет о системе с сосредоточенными параметрами, или уравнениями в частных производных, для систем с распределенными параметрами. В таких моделях вольтамперная характеристика нелинейных элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы и т.д.) определяется максимально простыми, – кусочно-линейными, экспоненциальными или полиномиальными, – функциями. Это позволяет проанализировать основные особенности динамики системы. Однако при переходе от таких упрощенных математических моделей к реальным радиотехническим устройствам возникает ряд проблем, связанных с несоответствием динамических режимов математической модели режимам колебаний в реальном электронном устройстве, что затрудняет его реализацию. Для того чтобы решить задачу перехода от математической модели генератора к радиотехническому устройству, существуют специальные пакеты схемотехнического моделирования. К ним относятся, например, SPICE, Electronic Workbench или Advanced Design System (ADS). Наиболее мощным из них, позволяющим моделировать работу электронных приборов в СВЧ диапазоне и в реальном времени является ADS. Спектр задач, решаемых с помощью ADS, простирается от разработки простейших радиотехнических устройств, таких как фильтры, усилители, генераторы периодических колебаний и т.д. до моделирования работы систем связи в целом, и включает все этапы от разработки принципиальной схемы устройства до решения задач системного уровня. ADS также обладает возможностью моделирования электронных

цепей с параметрами радиоэлементов, предоставляемых их производителем и, таким образом, получать модельные системы, наиболее приближенные к реальным экспериментальным макетам. Кроме того, ADS позволяет учитывать такие характеристики, как топологическая структура схемы и параметры подложки. Таким образом, использование ADS для моделирования генераторов хаоса позволит преодолеть разрыв между математической моделью генератора и его экспериментальным макетом.

На рис. 1 приведена схема генератора, собранная в среде ADS. В целом эта схема повторяет схему генератора, описанного в [5, 6], где была введена его математическая модель, имеющая 2,5 степени свободы и состоящая из активного элемента (биполярного транзистора) и пассивного четырехполюсника, определяющего частотные характеристики схемы. Схема, приведенная на рис. 1 отличается от схемы генератора в [5, 6] наличием блокировочной емкости $C_{Block} = 100$ пФ и нагрузки $R = 50$ Ом на выходе системы. Блокировочная ёмкость введена для того, чтобы избавиться от постоянной составляющей в спектре выходного сигнала, а модельная нагрузка учитывает входное сопротивление реальной нагрузки в экспериментальном макете.

При моделировании в ADS в качестве биполярного транзистора был использован транзистор BFP620 фирмы Infineon Technologies. Рабочий диапазон этого транзистора простирается до 70 ГГц. Схемотехническая ADS модель транзистора в корпусе изображена на рис. 2а, где B , K и \mathcal{E} обозначают базу, коллектор и эмиттер, соответственно. Параметры элементов схемы приведены в таблице 1.

Для моделирования работы транзистора в ADS используется модель Гуммеля-Пуна [7]. Эквивалентная для неё схема транзистора показана на рис. 2б, где B , K , \mathcal{E} и Π обозначают базу, коллектор, эмиттер и потенциал подложки, соответственно; ёмкости $C_{B'K'}$ и $C_{B'\mathcal{E}'}$ задают значения паразитных ёмкостей $p-n$ переходов транзистора, которые, в свою очередь, имитируются диодами, изображёнными на схеме.

Четырехполюсник в цепи обратной связи генератора состоит из набора пассивных элементов с номиналами: $L_1=L_2=10$ нГн, $C_0=C_1=C_2=15$ пФ, $R_E=200$ Ом, $R_1=R_2=15$ Ом. Питание коллекторной цепи задается источником постоянного напряжения $V_C=6.4$ В, а питания в цепи эмиттера – источником переменного напряжения V_E . Здесь и далее указываются абсолютные значения напряжений питания без учёта знака.

В [5, 6] было показано, что в модели генератора, в которой вольт-амперная характеристика транзистора описывается кусочно-линейной функцией, при определённых значениях параметров хаотические колебания существуют при всех значениях напряжения на эмиттере, превышающих пороговое значение $V_T=0,75$ В, а именно, в рассматриваемой в [5, 6] модели режим колебаний не изменяется с ростом напряжения на эмиттере, лишь увеличивается их амплитуда. Это явление характерно только для модели генератора, в котором вольтамперная характеристика транзистора аппроксимируется кусочно-линейной функцией, являющейся простейшим из возможных описаний. Поскольку при моделировании в ADS модель транзистора имеет гладкую нелинейность, то зависимость режимов генератора от величины напряжения на эмиттере становится значительно более сложной.

На рис. 3 приведена бифуркационная диаграмма, показывающая характер колебаний, реализующихся в системе, при разных напряжениях на эмиттере. Как видно из диаграммы при напряжении $V_E < 1,22$ В колебания в системе отсутствуют, в диапазоне напряжений V_E от $\approx 1,22$ В до $\approx 1,55$ В в системе наблюдаются периодические колебания периода 1, при $V_E > 1,55$ В происходит каскад бифуркаций удвоения периода с переходом к хаосу при $V_E > 1.7$ В. При дальнейшем увеличении напряжения на эмиттере происходит чередование зон периодических и хаотических режимов.

2. Модуляция внешним сигналом

Пусть модель генератора работает в стационарном режиме, генерируя хаотические колебания, фрагмент временной реализации которых и спектр мощности представлены на рис. 4.

При модуляции модели генератора синусоидальным сигналом напряжение на эмиттере меняется медленно по сравнению с характерным периодом колебаний генератора. Неавтономная система генерирует импульсы с синусоидальной огибающей, внутренняя колебательная структура которых меняется в соответствии со сменой динамических режимов, изображённых на бифуркационной диаграмме (рис. 3).

На рис. 5 показан поток импульсов, полученных в результате изменения напряжения на эмиттере по гармоническому закону с амплитудой 2.2 В и частотой $f = 2.5$ МГц. На интервалах времени, когда $V_E < 1.2$ В, колебания в системе отсутствуют, а при $V_E > 1.2$ В формируется хаотический импульс.

Для того, чтобы избежать эффекта смены режима колебаний в пределах длительности хаотического радиоимпульса, будем осуществлять внешнее воздействие на генератор прямоугольными импульсами с амплитудой, равной значению напряжения, при котором в автономной системе реализуется желаемый хаотический режим.

Пусть источник напряжения на эмиттере формирует последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой 2.2 В, длительностью $\tau = 100$ нс и скважностью 4. В соответствии с этим законом изменения напряжения на эмиттере, на выходе генератора возникает поток хаотических радиоимпульсов длительностью 100 нс и скважностью 4 (рис. 6). На рис. 7 приведен спектр мощности потока хаотических радиоимпульсов. Из рис. 7 видно, что введение модуляции не оказывает заметного влияния на форму спектра мощности.

При непрерывной работе в модели автономного генератора ($V_E = 2.2$ В) потребляемая мощность равна 64 мВт, средняя мощность генерируемого хаотического сигнала – 0.32 мВт. Потребление модели генератора в модулированном режиме (с амплитудой прямоугольных видеоимпульсов 2.2 В и скважностью 4) составляет 17 мВт, а средняя мощность генерируемого хаотического сигнала –

0.08 мВт. Таким образом, формирование хаотических радиоимпульсов за счёт управления напряжением на эмиттере, в целом позволяет снизить потребление энергии примерно в 4 раза, т.е. прямо пропорционально скважности следования хаотических радиоимпульсов.

3. Идентичность импульсов

В [6] было показано, что в модели рассматриваемого генератора возможно формирование коротких идентичных импульсов сложной формы. Неординарность этого факта заключается в том, что фазовые траектории, соответствующие этим импульсам, неустойчивы. Формирование идентичных импульсов происходит за счет того, что за время межимпульсного интервала генератор успевает релаксировать к устойчивому состоянию равновесия так, что каждый раз в момент начала переднего фронта прямоугольного импульса напряжения питания на эмиттере, колебания развиваются практически с одних и тех же начальных условий. В этом случае для коротких импульсов, экспоненциальное разбегание неустойчивых фазовых траекторий при близких, но различающихся начальных условиях, не успевает «развести» траектории на расстояние порядка размера самого хаотического аттрактора, что привело бы к потере идентичности формы импульсов.

Что будет происходить в схемотехнической модели? В этом случае траектория не сможет попасть точно в точку равновесия, поскольку при моделировании в ADS кроме погрешностей точности счёта, вводятся дополнительные возмущения для имитации воздействия тепловых шумов. Возможно ли в этом случае генерирование идентичных радиоимпульсов сложной формы?

Чтобы выяснить это, сравним начальные фрагменты траекторий, соответствующих каждому из хаотических радиоимпульсов, изображённых на рис. 6. Наложение начальных фрагментов каждого из хаотических радиоимпульсов отражено на рис. 8. Как видно из рисунка, на протяжении примерно 20 нс траектории, соответствующие каждому из радиоимпульсов, совпадают. Таким образом, система позволяет генерировать поток коротких идентичных радиоим-

пульсов сложной формы, что и подтверждается рис. 9, на котором показана генерация радиоимпульсов длительностью 20 нс. Огибающая спектра мощности этих импульсов в целом сохраняет форму спектра мощности непрерывного хаотического сигнала.

4. Экспериментальный макет

Генератор хаоса с 2,5 степенями свободы с биполярным транзистором в качестве активного нелинейного элемента, схема которого приведена на рис. 1, был реализован в виде экспериментального макета. Питание генератора осуществляется от двух источников: один задает напряжение коллектор-база V_C транзистора, а другой – эмиттер-база V_E . Значения этих напряжений определяют режим работы генератора. Номиналы радиоэлементов макета имеют те же величины, что и соответствующие номиналы в ADS модели генератора.

В ходе экспериментов было установлено, что при фиксированном напряжении коллектор-база V_C режим работы генератора зависит от напряжения эмиттер-база V_E следующим образом: в диапазоне $0 \text{ В} < V_E < 1.3 \text{ В}$ генерация колебаний отсутствует; при $V_E = 1.3 \text{ В}$ возбуждаются гармонические колебания; в диапазоне $1.3 \text{ В} < V_E < 2.0$ происходит ряд бифуркаций с переходом к хаосу; при $2 \text{ В} < V_E < 2.5 \text{ В}$ реализуется устойчивый режим хаотических колебаний. Отметим, что картина смены режимов колебаний в макете качественно соответствует бифуркационной диаграмме, построенной в ADS (рис. 2).

В ходе экспериментов в качестве рабочего режима был выбран режим, которому соответствует коллекторное напряжение $V_C = 6.4 \text{ В}$ и эмиттерное $V_E = 2.04 \text{ В}$. В этом случае основная мощность генерируемых хаотических колебаний лежала в диапазоне частот 100...500 МГц (рис. 10,а). Сопоставление спектров мощности колебаний в макете и в ADS модели генератора показывает, что хаотические колебания, имеющие место в эксперименте, лежат в более низком частотном диапазоне, чем хаотические колебания ADS модели, занимающие полосу от 300 до 600 МГц. Объясняется это тем, что первоначально при моделировании в ADS не было учтено влияние подложки и топологии распо-

ложения радиоэлементов. Более подробно вопрос влияния топологии платы и параметров подложки на характеристики динамических режимов генератора будет исследован в одной из последующих публикаций.

5. Генерация импульсов. Эксперимент

При численном моделировании напряжение питания на эмиттере изменялось либо по гармоническому закону, либо как последовательность прямоугольных импульсов [5, 6]. В описываемых экспериментах использовался только поток прямоугольных импульсов напряжения питания, т.е. при неизменном постоянном коллекторном напряжении, на эмиттер подавались прямоугольные импульсы отрицательной полярности с амплитудой 2.04 В: при нулевом уровне напряжения генерация колебаний отсутствовала, что соответствует промежуткам между импульсами; при напряжении, равном амплитуде импульсов, генератор переводился в режим хаотических колебаний.

В экспериментах генерировались последовательности хаотических радиоимпульсов с разной скважностью. На рис. 10б представлен спектр сигнала, модулированного прямоугольными импульсами длительностью 100 нс со скважностью 4.

Сравнение рис. 10а и 10б показывает, что спектр при периодическом внешнем воздействии остается сплошным, а его форма в целом сохраняется такой же, как и у стационарного хаотического режима генератора. Это свидетельствует о том, что в интервалах времени, когда генерируется хаотический сигнал, его характеристики близки к характеристикам исходного сигнала; переходные процессы в начале и в конце воздействующих прямоугольных импульсов значительно короче длины самих импульсов и не оказывают существенного влияния на форму спектра.

Из сравнения спектров видно также, что средняя мощность сигнала в случае режима генерации хаотических импульсов ниже, чем в случае стационарного хаотического режима. Прямые измерения показывают, что она падает примерно обратно пропорционально скважности.

На рис. 11а приведена реализация сигнала, полученного на выходе генератора при воздействии прямоугольными импульсами отрицательного напряжения на переход база-эмиттер. Его вид подтверждает сделанные выше выводы о хаотическом характере импульсов и незначительной длительности переходных процессов по сравнению с длительностью самих импульсов. Кроме того, из рис. 11а видно хорошее совпадение между длинами воздействующих импульсов и межимпульсных интервалов с одной стороны и длиной хаотических импульсов на выходе генератора и межимпульсных интервалов между ними с другой стороны.

Измерения потребляемой генератором мощности показали, что, она падает обратно пропорционально скважности. Таким образом, энергетическая эффективность рассматриваемого метода формирования хаотических импульсов выше по сравнению с внешней модуляцией и выигрыш растет с увеличением скважности.

Как отмечалось выше, в ходе численного моделирования и моделирования в ADS была показана возможность генерации практически идентичных импульсов сложной формы. Однако чёткое проявление этого эффекта в физическом эксперименте априори неочевидно из-за наличия теплового шума и технических флуктуаций.

Типичная структура импульсов, генерируемых системой, показана на рис. 11б. Из него видно, что начальные участки импульсов (примерно на интервале ~ 20 нс) действительно совпадают.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность эффективного формирования хаотических радиоимпульсов.

Заключение

Расчеты, проведенные в ADS, и эксперименты подтвердили возможность энергетически эффективного формирования хаотических радиоимпульсов путем внешнего периодического воздействия на генератор, благодаря чему энергопотребление генератора снижается прямо пропорционально скважности сле-

дования импульсов. Также экспериментально установлено, что указанный способ генерирования импульсов позволяет получать практически идентичные сверхширокополосные импульсы сложной формы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – РФФИ (грант № 05-02-17667-а) и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие потенциала высшей школы» на 2006-2007 г.г. Министерства образования и науки.

Литература

- 1 Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 2. С. 224.
- 2 Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 2. С. 70.
- 3 Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физ.-мат. лит., 2002. 252 С.
- 4 Dvitreiev A.S., Kyarginsky B.Ey., Panas A.I. et al. // Int. J. Bifurcation & Chaos. 2003. V. 13. N 6. P. 1495.
- 5 Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 22. С. 29.
- 6 Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., и др. // РЭ. 2006. Т. 51. № 3. (в печати).
- 7 Antognetti, P., and Massobrio, G., Semiconductor device modeling with SPICE, Nee-York: McGraw-Hill, Second Edition, 1993.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Схема генератора хаоса, моделируемая в ADS.
- Рис. 2. Модель транзистора в корпусе, изображённого на принципиальной схеме (рис. 1) (а) и эквивалентная схема транзистора по Гуммелю-Пуну (б), изображённого на рис. 2а.
- Рис. 3. Бифуркационная диаграмма колебательных режимов генератора по параметру V_E .
- Рис. 4. Временная реализация (а) и спектр мощности (в) сигнала на выходе автономного генератора при напряжении на эмиттере $V_E = 2.2$ В.
- Рис. 5. Поток хаотических радиоимпульсов при изменении напряжения на эмиттере по гармоническому закону.
- Рис. 6. Поток хаотических радиоимпульсов (а) и отдельный хаотический радиоимпульс (б), при модуляции напряжения на эмиттере прямоугольными импульсами с амплитудой 2.2 В, длительностью 100 нс и скважностью 4.
- Рис. 7. Спектр мощности сигнала на выходе генератора при модуляции напряжения на эмиттере прямоугольными импульсами с амплитудой 2.2 В, длительностью 100 нс, скважностью 4.
- Рис. 8. Сравнение начальных фрагментов хаотических радиоимпульсов.
- Рис. 9. Последовательность радиоимпульсов сложной формы длительностью 20 нс: а – фрагмент временной реализации; б – спектр мощности.
- Рис. 10. Спектр выходного сигнала генератора: а – режим автономных колебаний (эксперимент); б – режим колебаний при воздействии прямоугольными импульсами с амплитудой 2.04, длительностью 100 нс и скважностью 4, эксперимент.
- Рис. 11. Фрагмент реализации сигнала на выходе неавтономного генератора при воздействии на генератор прямоугольных импульсов с амплитудой 2.04 В (эксперимент): а) длительность прямоугольных импульсов 100 нс, скважность 4; по оси времени одна клетка – 200 нс, по оси амплитуд одна клетка – 20 мВ; б) длительность прямоугольных импульсов 130 нс и скважность 2; одна клетка по оси времени – 40 нс, по оси амплитуд – 50 мВ.

Параметры элементов схемы транзистора ВФР620 в корпусе

Таблица 1

$L_{BC} = 60 \text{ пГ}$	$C_{BEC} = 98.4 \text{ фФ}$	$R_{BS} = 1200 \text{ Ом}$
$L_{CC} = 50 \text{ пГ}$	$C_{BCC} = 55.9 \text{ фФ}$	$R_{CS} = 1200 \text{ Ом}$
$L_{EC} = 15 \text{ пГ}$	$C_{ES} = 140 \text{ фФ}$	$R_{ES} = 300 \text{ Ом}$
$L_{BB} = 764.5 \text{ пГ}$	$C_{BS} = 54 \text{ фФ}$	
$L_{CB} = 725.4 \text{ пГ}$	$C_{CS} = 50 \text{ фФ}$	
$L_{EB} = 259.6 \text{ пГ}$	$C_{CEO} = 106.5 \text{ фФ}$	
	$C_{BEO} = 106.7 \text{ фФ}$	
	$C_{CEI} = 132.4 \text{ фФ}$	
	$C_{BEI} = 99.6 \text{ фФ}$	

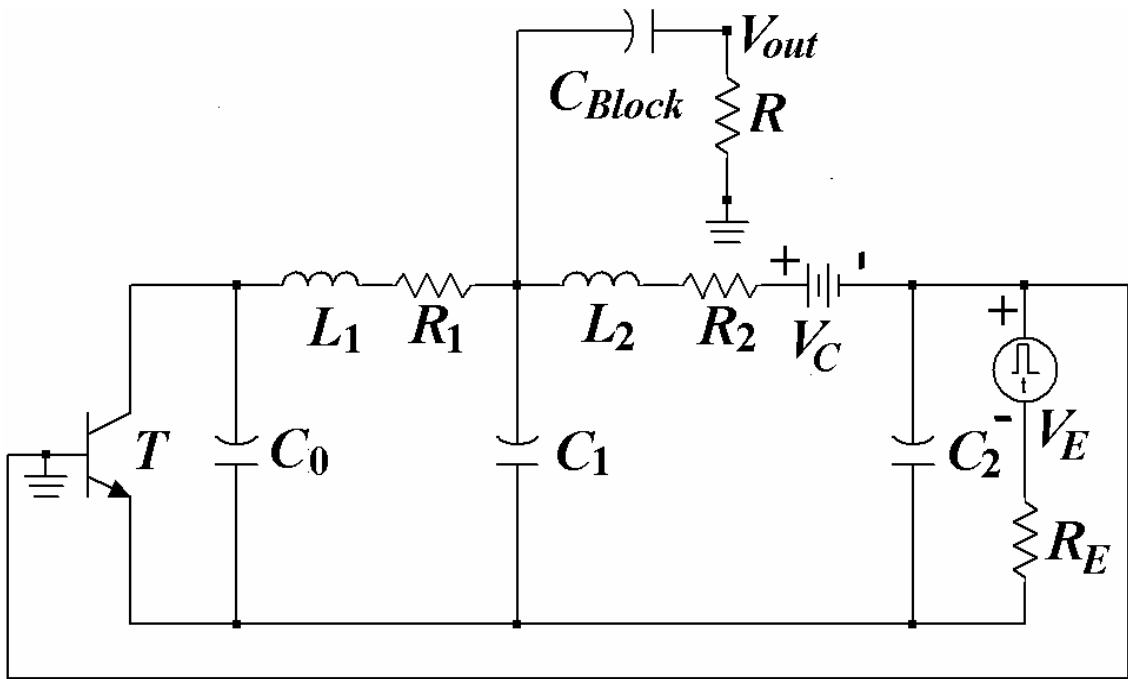
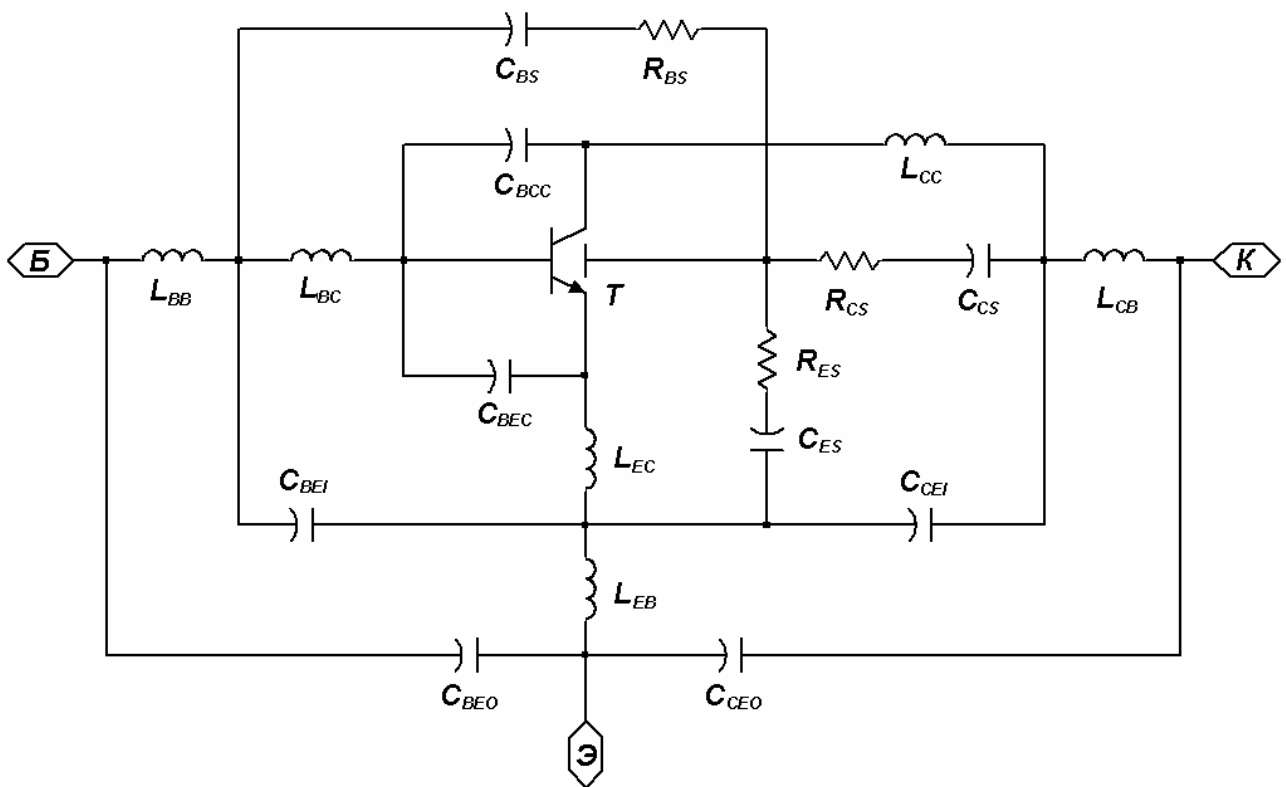
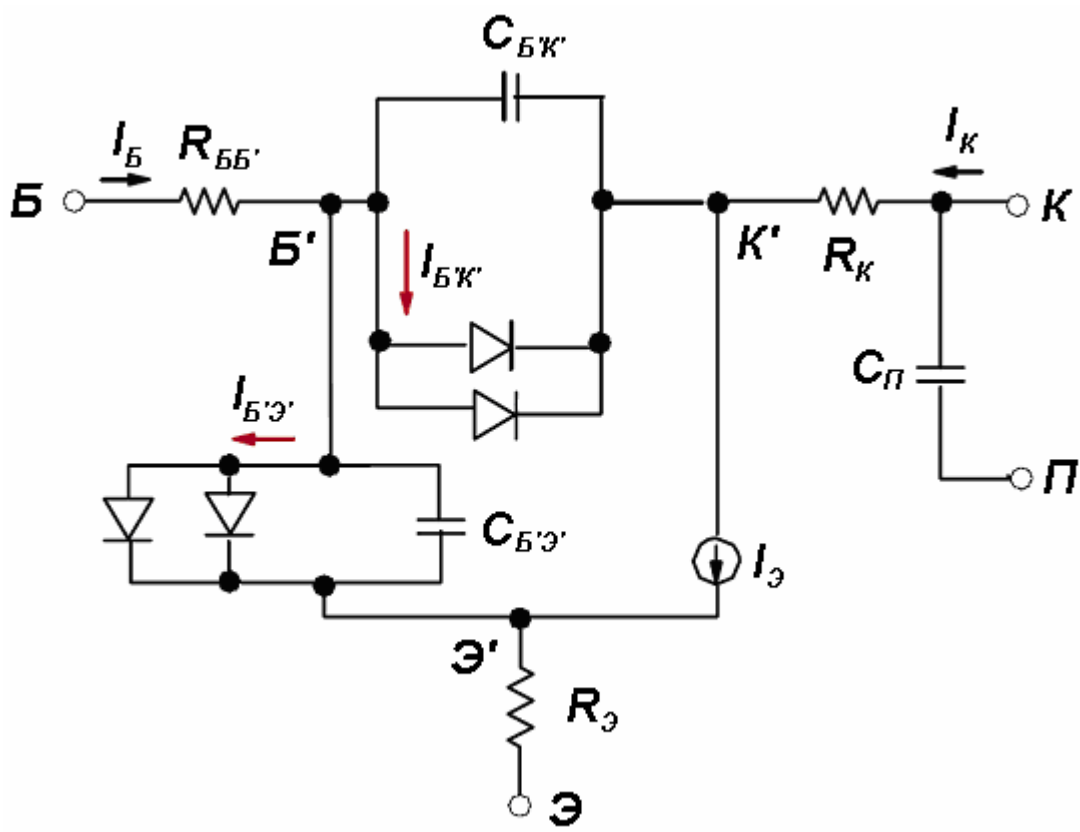


Рис. 1.



а)



б)

Рис. 2.

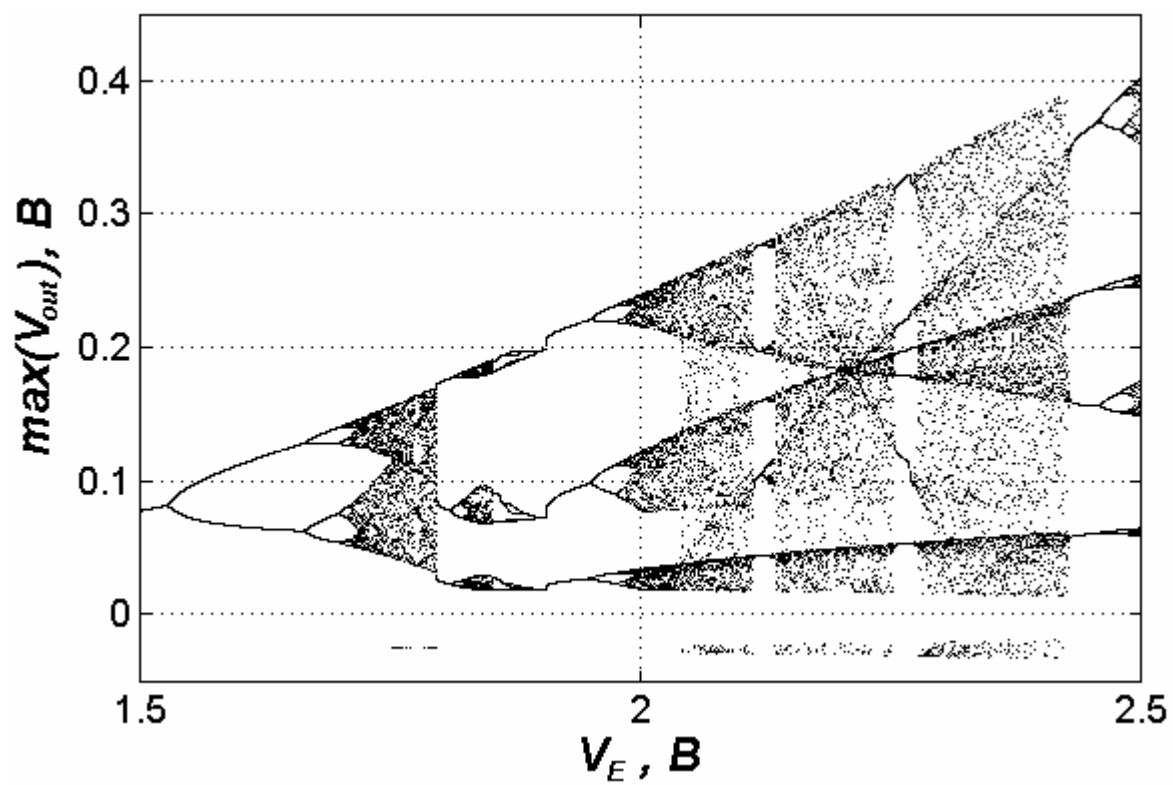
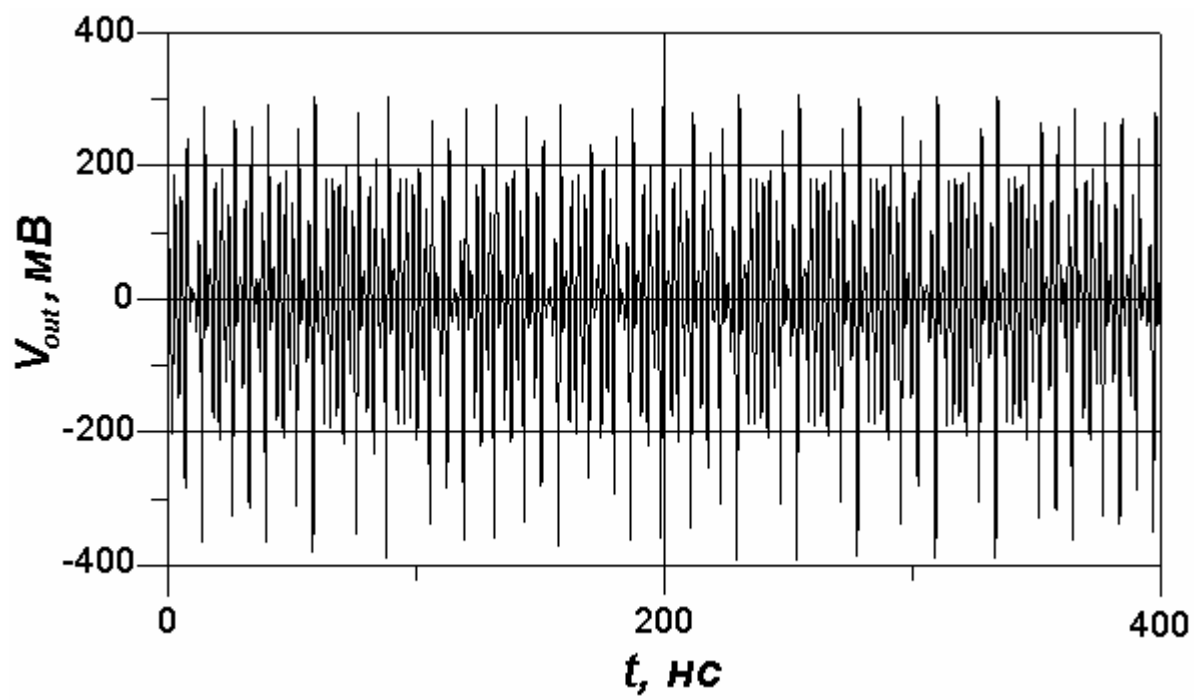
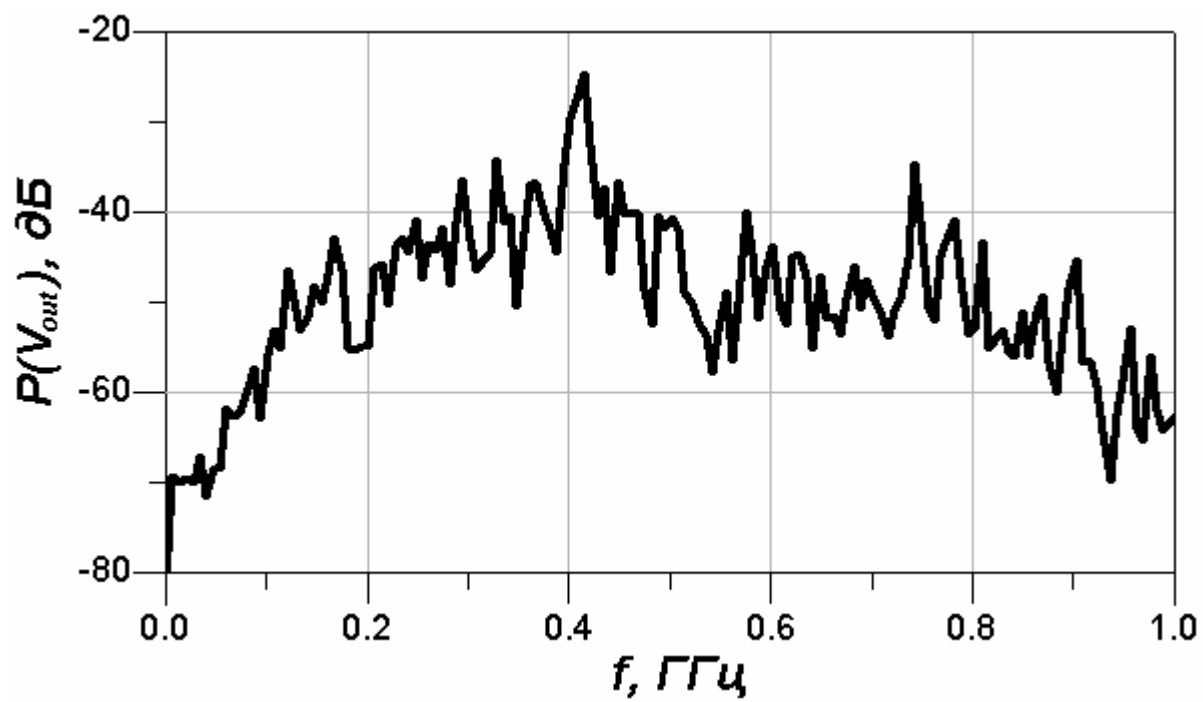


Рис. 3.



a)



б)

Рис. 4.

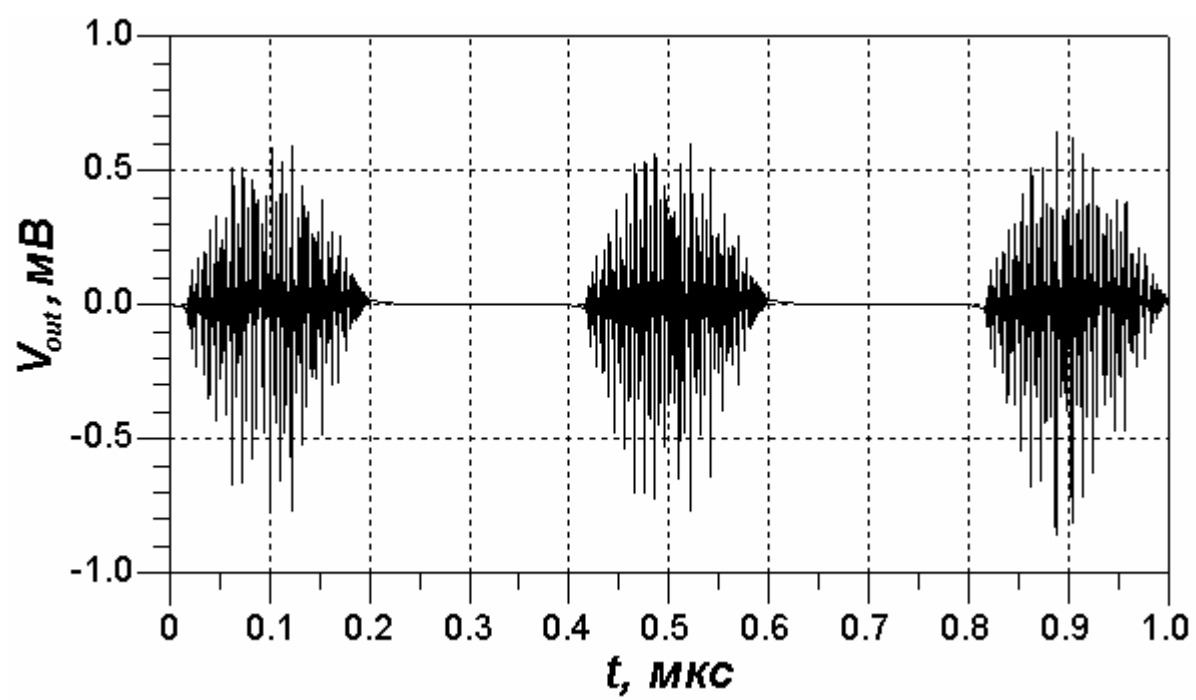
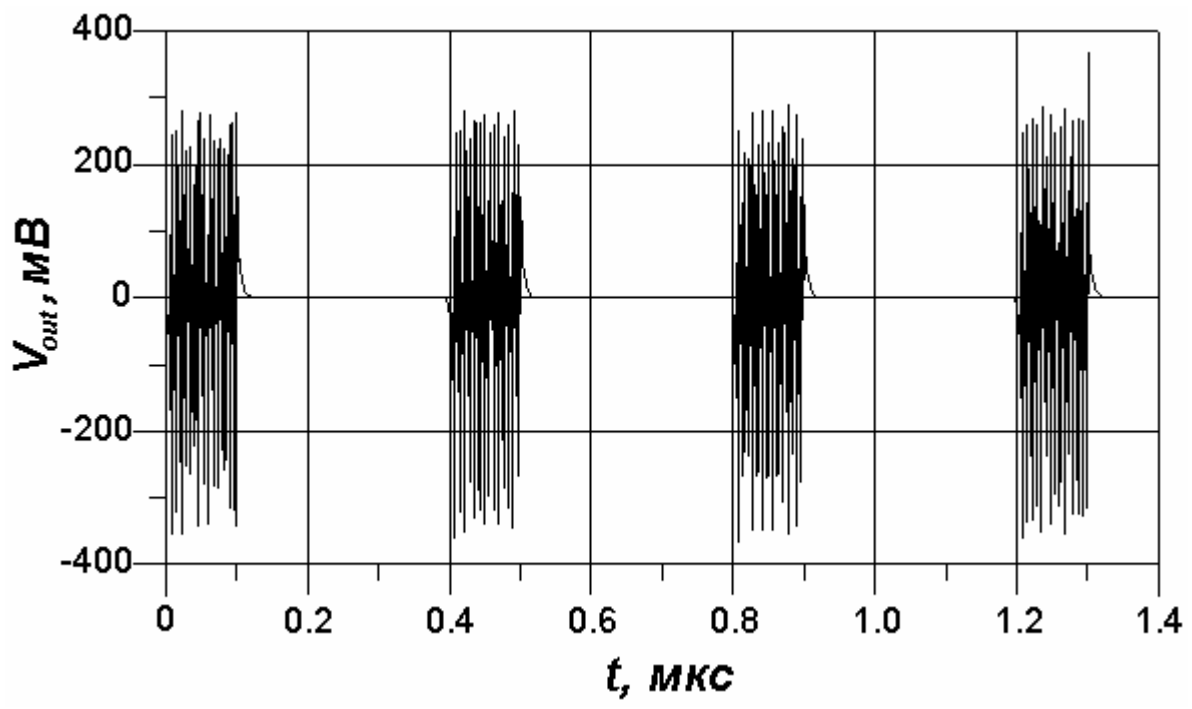
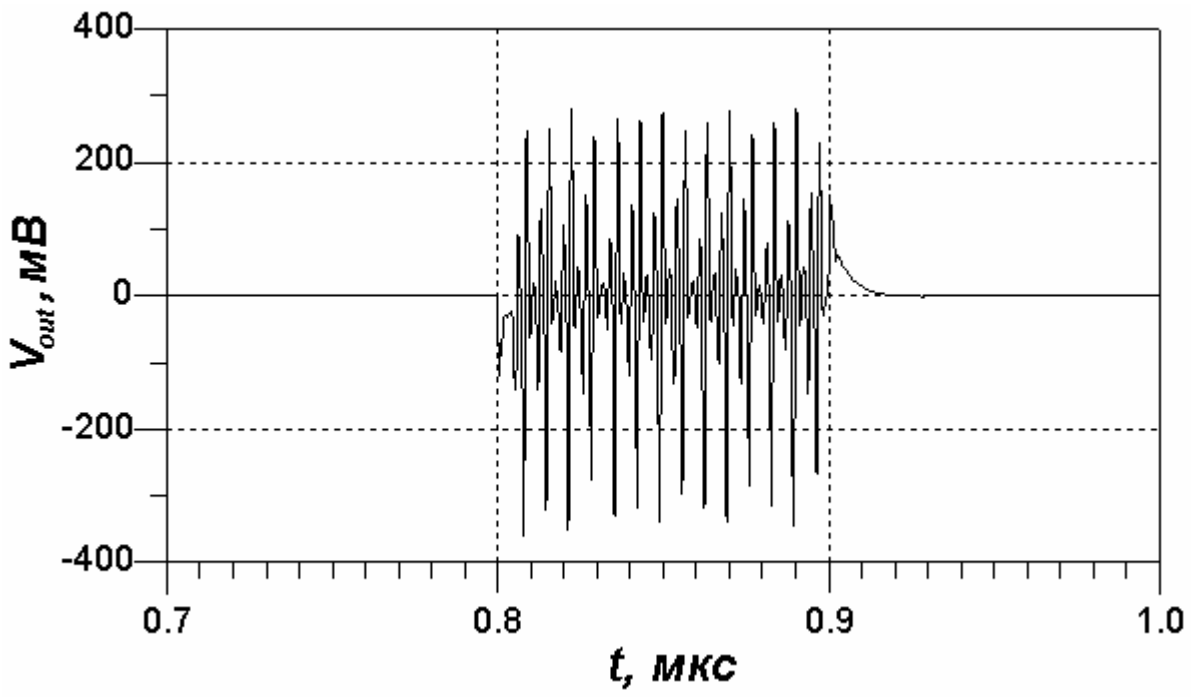


Рис. 5.



a)



б)

Рис. 6.

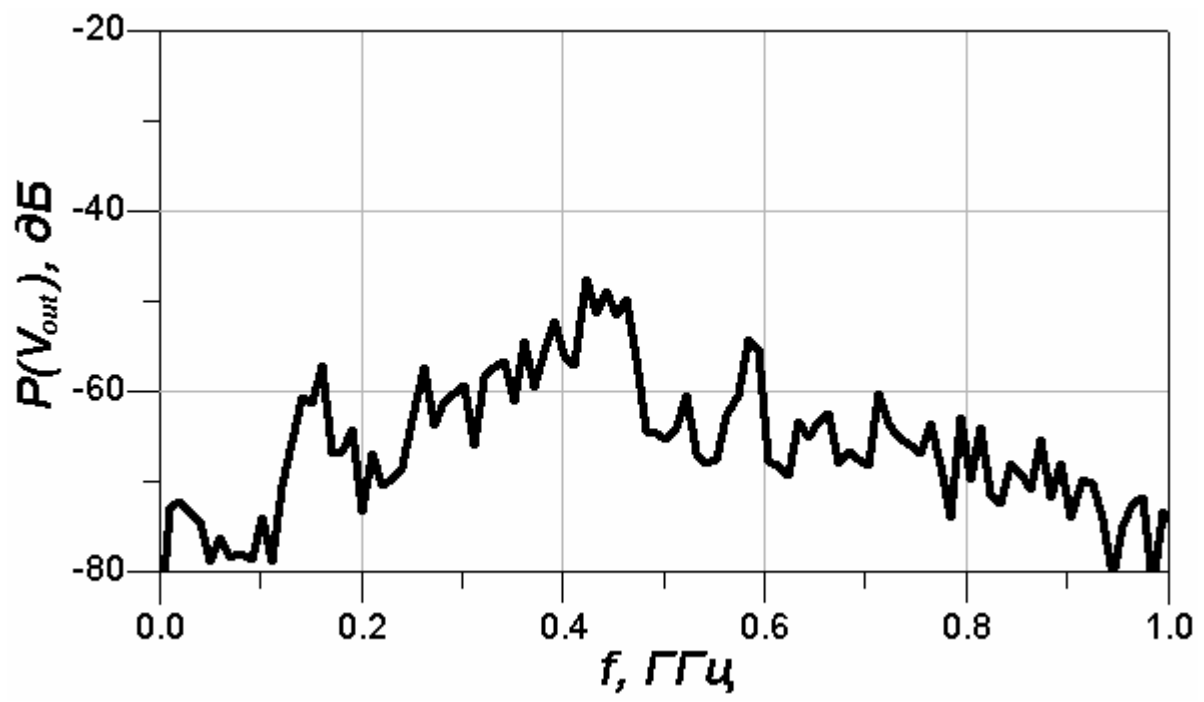


Рис. 7.

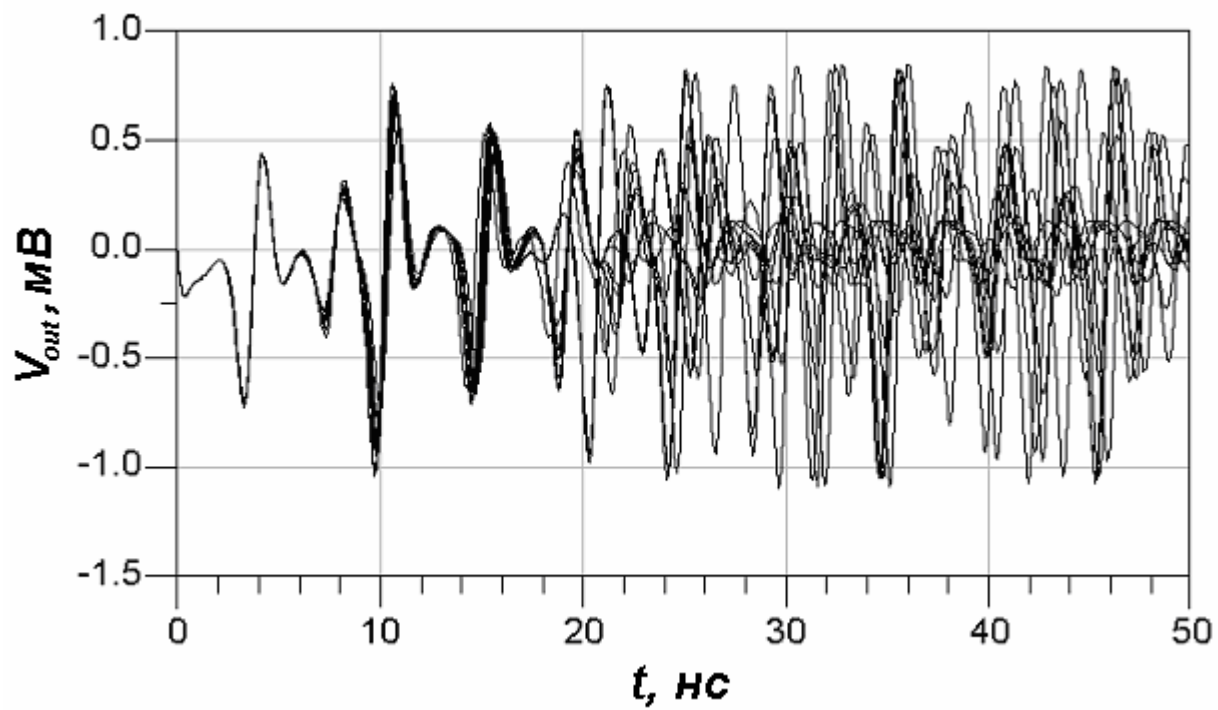
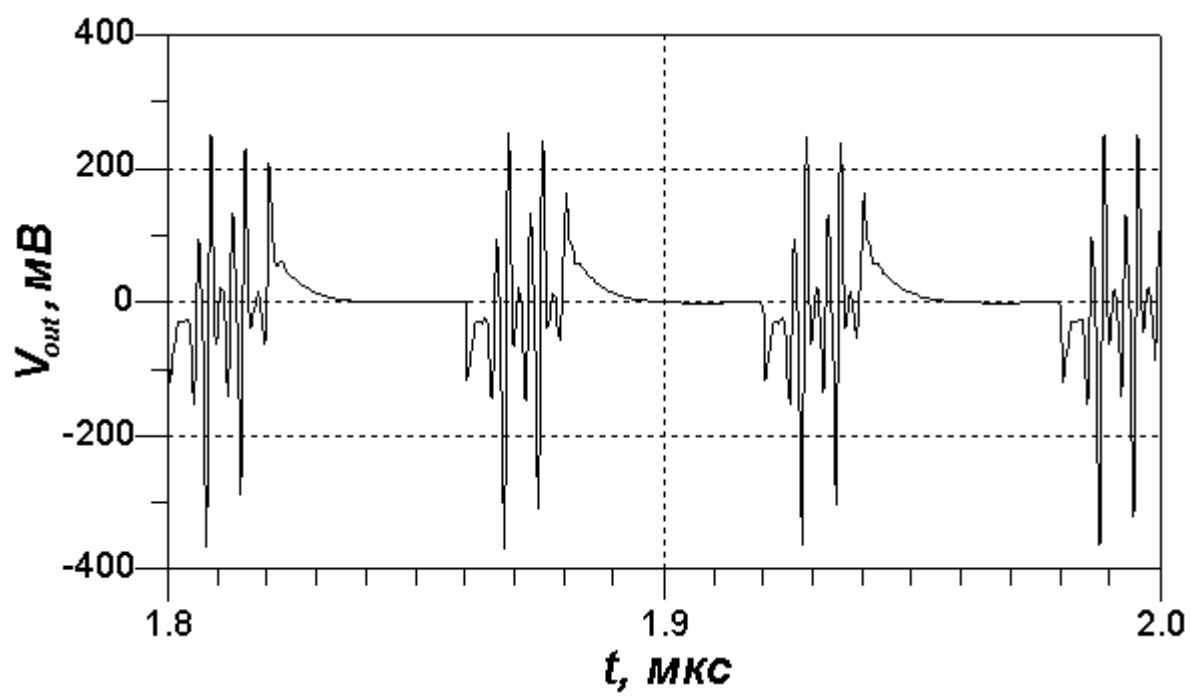
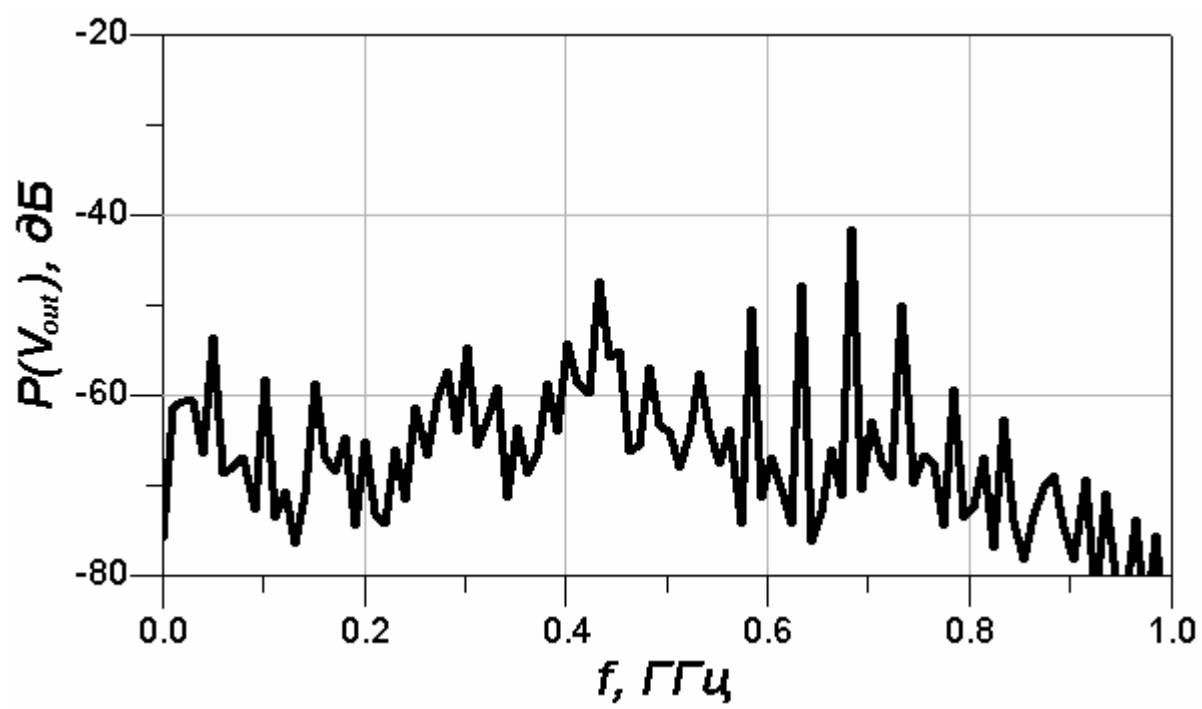


Рис. 8.

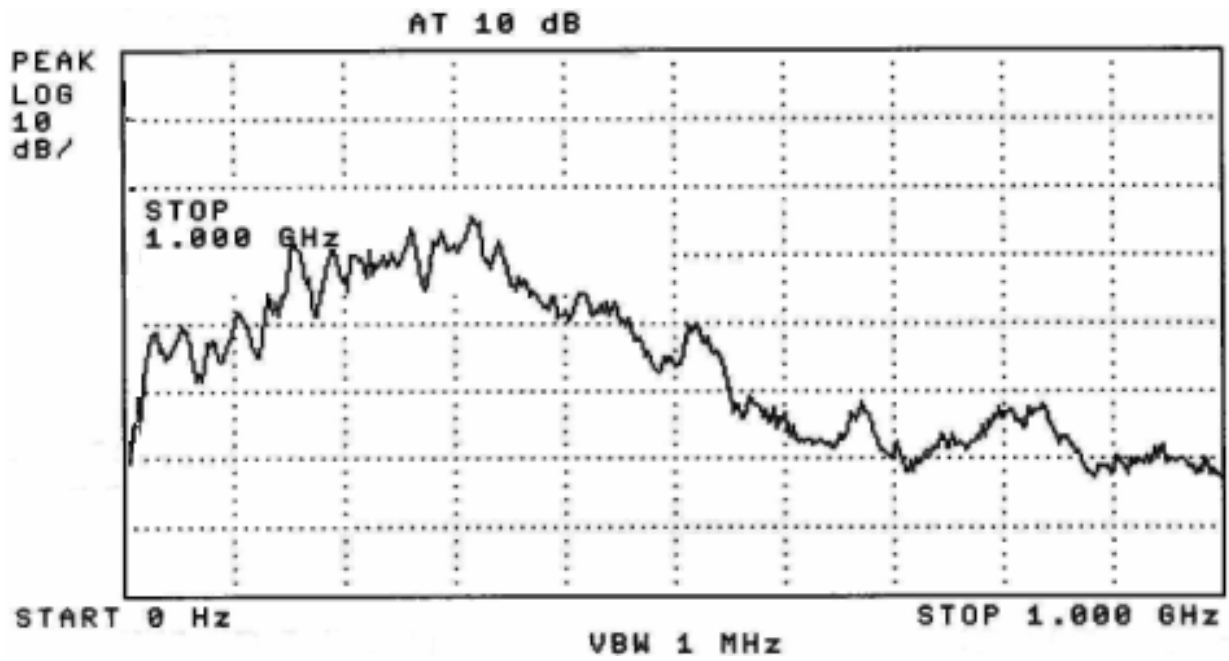


a)

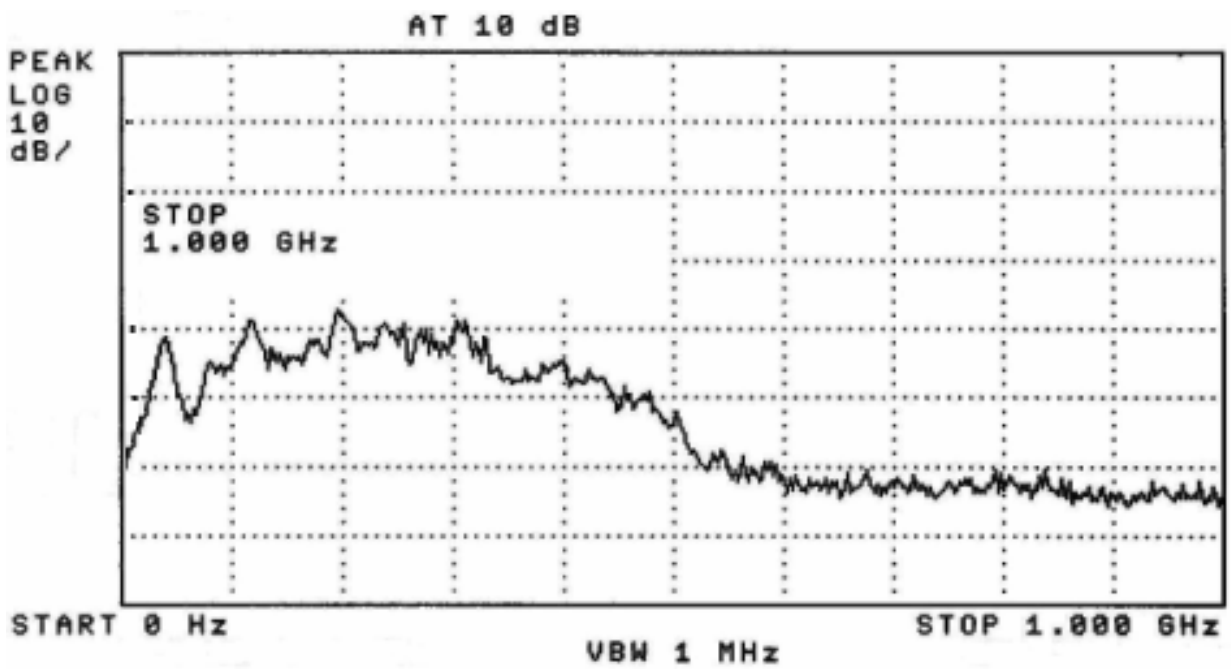


б)

Рис. 9.

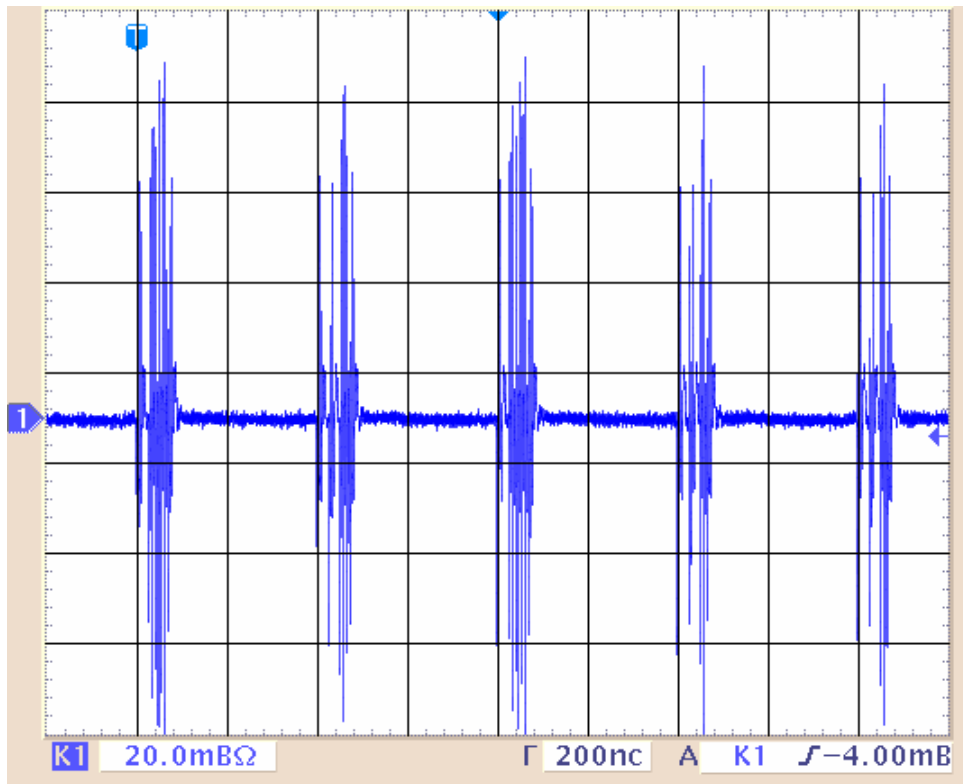


a)

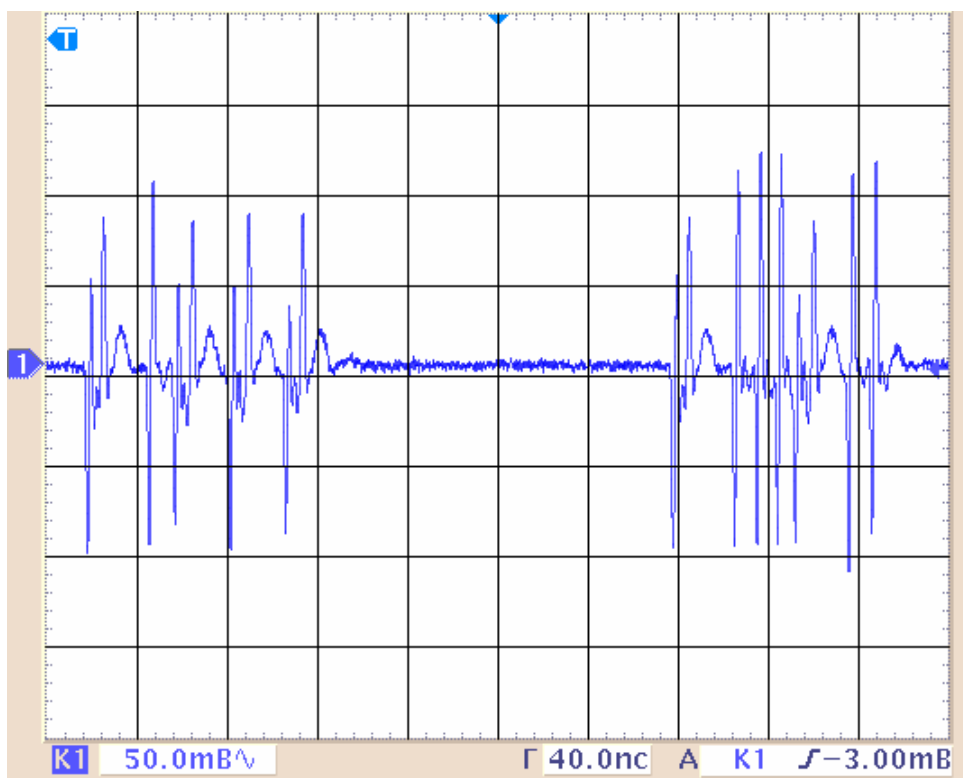


б)

Рис. 10.



a)



б)

Рис. 11.