



**УПРАВЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ  
В ГЕНЕРАТОРЕ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ПЕТЛЕЙ  
ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ**

*А.К.Козлов, В.Д.Шалфеев*

Рассматривается возбуждение хаотических колебаний в генераторе, охваченном запаздывающей петлей фазовой автоподстройки, и возможность управления характеристиками таких колебаний. Приведены примеры управления хаосом.

**Введение**

Интерес к теоретическим и прикладным исследованиям нелинейной хаотической динамики различных систем вызван интенсивными поисками приложений детерминированных хаотических процессов. В настоящее время рассматриваются возможности использования хаотических процессов в радиосвязи в качестве несущих, маскирующих, шифрующих сигналов для хранения и передачи аналоговых и двоичных сообщений [1–12]. Актуальными также являются задачи управления динамическим хаосом [13–21]. Под управлением хаотическими процессами часто понимается подавление хаоса: приведение системы в устойчивое состояние равновесия [18], стабилизация неустойчивых периодических решений, вложенных в хаотический аттрактор [13,15], а также упорядочение движений внешним периодическим воздействием [20], дополнительной связью с устойчивой системой [19] или с помощью специального управления [17]. С другой стороны, к задачам управления относят формирование хаотических колебаний с заданными свойствами [21]: синхронизацию систем с хаотическим поведением [22–24], возбуждение внешним хаотическим сигналом в системе хаотических колебаний требуемого вида [14] и др. В этом смысле задачи генерирования, управления и использования хаотических колебаний сближаются и составляют общую прикладную проблему – практическое освоение динамического хаоса и вовлечение его в современные технологии.

В работе рассмотрена нелинейная динамика генератора с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки. Традиционный круг задач для систем фазовой автоподстройки частоты, связанный с устойчивостью синхронного режима, расширен за счет исследования динамики системы в областях неустойчивости и хаоса. Разнообразие хаотических режимов, вызванное запаздыванием, позволяет предложить данную схему в качестве генератора хаотических колебаний. Изучены возможности управления характеристиками хаоса с помощью изменения

параметров петли обратной связи – инерционности и запаздывания. В центре внимания находятся следующие вопросы:

- генерирование хаотических сигналов со стабилизированными частотами;
- управление спектром хаотического сигнала;
- модулирование хаоса внешним сигналом;
- скрытная передача аналогового сообщения в системе с хаотической фазовой модуляцией.

Выбор величины запаздывания в цепи обратной связи в качестве активного управляющего параметра объясняется, с одной стороны, его определяющей ролью в хаотизации систем невысокого порядка, а также возможностью использования связанных с ним общих динамических закономерностей [25–28] и специфических особенностей, свойственных фазовым системам [29–31]. С другой стороны, на наш выбор повлияли результаты по электронному регулированию запаздывания в цепочках взаимосвязанных систем фазовой синхронизации [32].

### 1. Генерация хаотических колебаний

Рассматриваемый генератор хаоса, структурная схема которого приведена на рис. 1, состоит из перестраиваемого по частоте генератора синусоидальных колебаний – управляемого генератора  $G$  и петли управления, включающей элемент запаздывания  $T_d$ , фильтр нижних частот  $K$  – интегрирующий фильтр первого порядка, фазовый дискриминатор  $\Phi$  с синусоидальной характеристикой, а также эталонный генератор  $G_0$ . Неавтономность  $u(t)$  можно интерпретировать как паразитную составляющую на выходе фазового дискриминатора или как специальное внешнее управляющее воздействие. Данная схема представляет собой систему фазовой автоподстройки [33] в применении к задаче стабилизации частоты. Сигнал управляемого генератора с некоторым запаздыванием поступает на фазовый дискриминатор, где сравнивается с эталонным сигналом. На выходе фазового дискриминатора образуется управляющее напряжение, которое после фильтрации корректирует частоту управляемого генератора. Математическая модель рассматриваемой системы в безразмерных величинах имеет следующий вид [31, 34]

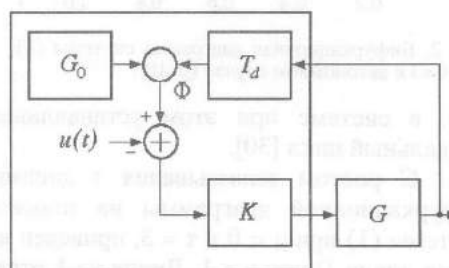


Рис. 1. Структурная схема управляемого генератора с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки

$$\dot{\varphi}(t) = y(t), \quad \dot{y}(t) = \gamma + \mu \sin(\omega t) - \sin\varphi(t-\tau) - \lambda y(t), \quad (1)$$

где  $\varphi(t)$  – мгновенная разность фаз генерируемого (выходного) и эталонного сигналов;  $\tau$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$  – безразмерные параметры петли управления:  $\tau$  характеризует запаздывание обратной связи,  $\lambda$  – характеризует инерционность петли,  $\gamma$  – расстройку частот эталонного и управляемого генераторов при разомкнутой петле,  $\mu \sin(\omega t)$  – неавтономное воздействие. В силу наличия периодической нелинейности динамику системы (1) можно охарактеризовать следующими типами движений: постоянное значение разности фаз  $\varphi(t) = \text{const}$  соответствует синхронизму генераторов, ограниченные колебания  $\varphi(t)$  около некоторого значения называют движениями колебательного типа; если  $\varphi(t)$  неограниченно возрастает или убывает, то говорят о проскальзывании фазы управляемого генератора и установлении движений вращательного типа. Вид решения  $\varphi(t)$  определяет фазовую модуляцию выходного сигнала.

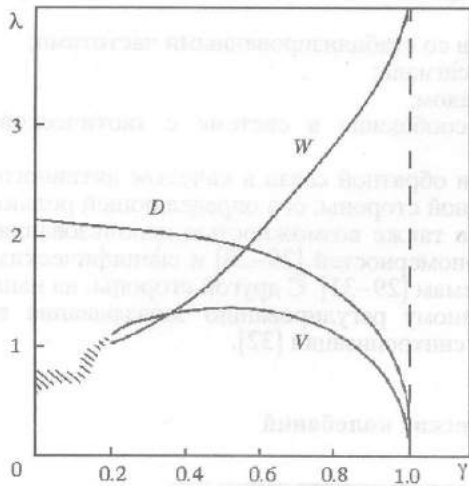


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма системы (1) при  $\tau=3$  в автономном случае ( $\mu=0$ )

ной, в системе при этом устанавливается либо состояние равновесия, либо предельный цикл [30].

С ростом запаздывания  $\tau$  динамика системы (1) усложняется. Пример бифуркационной диаграммы на плоскости параметров  $(\gamma, \lambda)$ , полученной для системы (1) при  $\mu=0$  и  $\tau=3$ , приведен на рис. 2. Режим синхронизма реализуется выше линии  $D$  при  $\gamma < 1$ . Линия  $\gamma=1$  отвечает седло-узловой бифуркации слияния состояний равновесия  $O_1$  и  $O_2$ , в результате которой состояния равновесия исчезают. На линии  $D$  происходит мягкое рождение цикла при бифуркации Андронова-Хопфа состояния равновесия  $O_1$ . Рождающийся из состояния равновесия устойчивый цикл определяет режим периодической модуляции фазы управляемого генератора. Кривые  $V$  и  $W$  соответствуют существованию в фазовом пространстве системы (1) гомоклинических кривых седло-фокуса  $O_2$ . В случае отрицательной седловой величины [35] с уменьшением  $\lambda$  на границе  $V$  исчезает устойчивый предельный цикл колебательного типа, а на границе  $W$  возникает устойчивый предельный цикл вращательного типа. На возможность существования сложных движений в окрестности гомоклинической кривой седло-фокуса  $O_2$  с положительной седловой величиной в системе (1) при  $\mu=0$  и достаточно большом  $\tau$  указывалось ранее [30].

Примеры различных типов хаотических движений в системе (1) получены численно при  $\mu=0, \tau=3$  и приведены на рис. 3, а-г. Здесь и далее для наглядности решения системы (1) отображаются на цилиндрической поверхности  $(\varphi, y)$ ,  $\varphi(\text{mod } 2\pi) \in [0, 2\pi)$ , однозначно же фаза определена на одном интервале длиной  $2\pi$ . Область колебательного хаоса указана на рис. 2 штриховкой. Характерный вид решения колебательного типа в проекции на плоскость  $(\varphi, y)$  представлен на рис. 3, а. Области существования периодических и хаотических движений с проскальзываниями фазы расположены (см. рис. 2) ниже линии  $W$  и при  $\gamma > 1$ . Хаотизация колебаний в системе (1) при  $\mu=0, \tau=3$  происходит в результате каскада удвоений периода предельного цикла, охватывающего состояние равновесия  $O_1$ , в сочетании с седло-узловыми бифуркациями циклов. Наличие седло-узловых бифуркаций циклов и гистерезиса между ними говорит о нарушении симметрии [27] и неединственности сложных колебательных режимов в системе (1) при  $\mu=0$ .

Регулярная динамика системы (1) в автономном случае ( $\mu=0$ ) хорошо изучена [30]. Устойчивое положение равновесия  $O_1 = (\varphi_{O_1}, y_{O_1})$ , где  $\varphi_{O_1} = \arcsin \gamma + 2\pi k$ ,  $y_{O_1} = 0$ ,  $k$  — целое, отвечает синхронизму колебаний управляемого и эталонного генераторов и определяет единственный рабочий режим схемы в качестве традиционной системы фазовой синхронизации. Бифуркации потери устойчивости состояния равновесия  $O_1$  определяют в пространстве параметров границы области синхронизма. Состояние равновесия  $O_2 = (\varphi_{O_2}, y_{O_2})$ , где  $\varphi_{O_2} = (2k+1)\pi - \arcsin \gamma$ ,  $y_{O_2} = 0$ ,  $k$  — целое, всегда неустойчиво седлового типа [26]. Если запаздывание не велико  $\tau \ll 1$ , динамика системы (1) в окрестности границ области синхронизма остается регулярной,

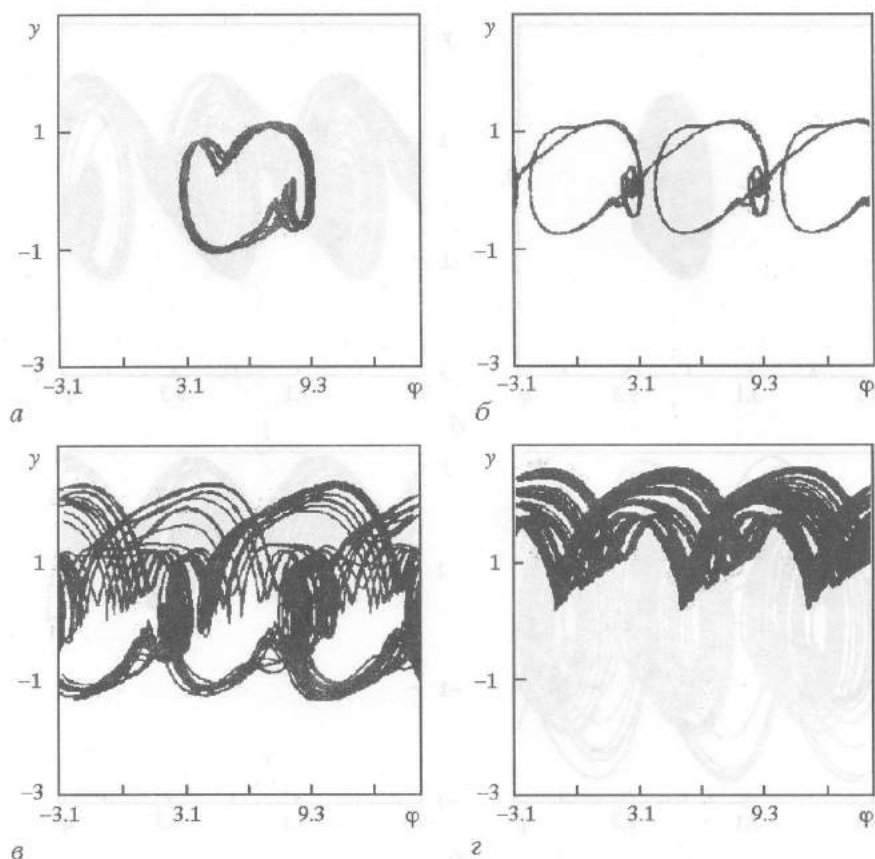


Рис. 3. Проекция хаотических траекторий автономной ( $\mu=0$ ) системы (1) на плоскость  $(\varphi, y)$  при  $\tau=3$ : а -  $\gamma=0.05, \lambda=0.85$ ; б -  $\gamma=0.17, \lambda=1.0$ ; в -  $\gamma=0.2, \lambda=0.45$ ; г -  $\gamma=0.5, \lambda=0.45$

В неавтономном случае ( $\mu \neq 0$ ) синхронизм генераторов  $G_0$  и  $G$  невозможен [34]. Вследствие действия периодического возмущения разность фаз генераторов не может быть постоянной и испытывает колебания. Синхронность генераторов  $G_0$  и  $G$ , в этом случае понимаемая как равенство периодов модуляции, достигается при достаточно больших  $\lambda$  и некоторых  $\gamma$ . На рис.4 область синхронизма при  $\mu=1, \omega=1, \tau=1$  ограничена кривыми  $D_\mu$  (рождение инвариантного двумерного тора),  $P_2$  (удвоение периода модуляции выходного сигнала),  $N_\mu$  (исчезновение синхронного режима в результате седлоузловой бифуркации) [36]. Установление хаотических движений колебательного типа происходит с уменьшением  $\lambda$  при пересечении границы  $P_2$  в результате каскада

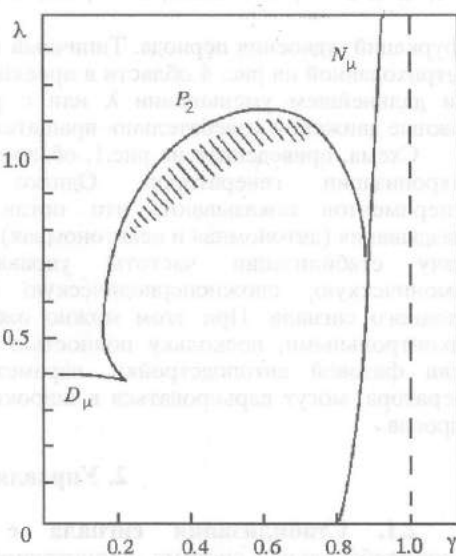


Рис. 4. Бифуркационная диаграмма системы (1) при  $\tau=1$  в неавтономном случае ( $\mu=1, \omega=1$ )

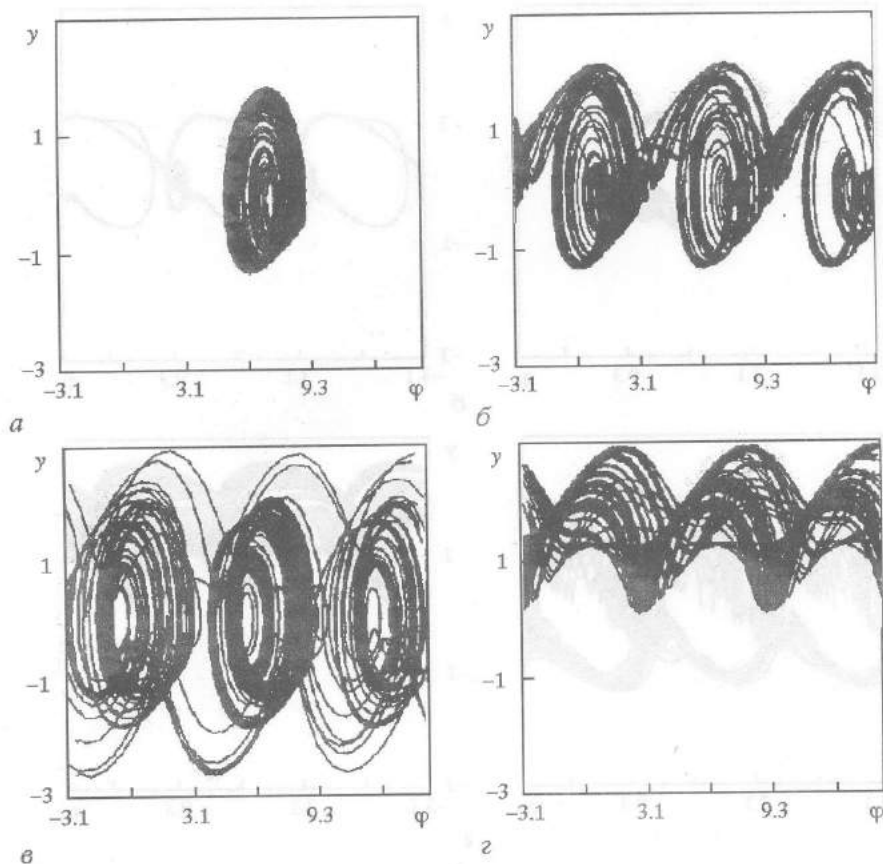


Рис. 5. Проекция хаотических траекторий неавтономной системы (1) на плоскость  $(\varphi, y)$  при  $\tau=1$ ,  $\mu=1$ ,  $\omega=1$ : а -  $\gamma=0.5$ ,  $\lambda=0.94$ ; б -  $\gamma=0.5$ ,  $\lambda=0.9$ ; в -  $\gamma=0.05$ ,  $\lambda=0.3725$ ; г -  $\gamma=1.1$ ,  $\lambda=0.83$

бифуркаций удвоения периода. Типичный вид аттрактора для значений параметров из заштрихованной на рис. 4 области в проекции на плоскость  $(\varphi, y)$  приведен на рис. 5, а. При дальнейшем уменьшении  $\lambda$  или с ростом  $\gamma$  в системе (1) устанавливаются сложные движения колебательно-вращательного и вращательного типов (рис. 5, б-г).

Схема, приведенная на рис.1, обычно используется для осуществления фазовой синхронизации генераторов. Однако приведенные результаты численных экспериментов показывают, что петля фазовой автоподстройки при наличии запаздывания (автономная и неавтономная) позволяет не только решить традиционную задачу стабилизации частоты управляемого генератора, но и возбудить гармоническую, сложнопериодическую или хаотическую фазовую модуляцию выходного сигнала. При этом можно ожидать, что сложные колебания получатся подконтрольными, поскольку полностью определяются свойствами запаздывающей петли фазовой автоподстройки, параметры которой, в отличие от параметров генератора, могут варьироваться в широких пределах. Перейдем к обсуждению этих вопросов.

## 2. Управляемый хаос

### 2.1. Стабилизация сигнала с хаотической фазовой модуляцией.

Автоколебательная система, сконструированная на основе запаздывающей петли фазовой автоподстройки, кроме общих для генератора хаоса свойств обладает

следующей особенностью: построенная для задач стабилизации частоты, она продолжает, в некотором смысле, выполнять свою функцию и в отдельных хаотических режимах. В самом деле, в случае установления в системе (1) хаотических движений колебательного типа, то есть без проскальзываний фазы на  $2\pi$  (см. рис. 3, а для  $\mu=0$  и рис. 5, а для  $\mu \neq 0$ ), среднее значение мгновенной разности фаз управляемого и эталонного генераторов постоянно  $\overline{\varphi(t)} = \text{const}$ , а значит средняя разность частот генераторов равна нулю. Таким образом, одновременно с формированием хаотической фазовой модуляции выходного сигнала осуществляется стабилизация эталонным генератором его несущей.

Области установления в системе (1) хаотических режимов колебательного типа отмечены на рис. 2 для  $\mu=0$  и рис. 4 для  $\mu \neq 0$  штриховкой. В численном эксперименте выяснено, что при наличии периодической помехи ( $\mu=1$ ,  $\omega=1$ ) при запаздывании  $\tau=1$  и значениях параметров  $\gamma$  и  $\lambda$  из заштрихованной на рис. 4 области хаотические режимы колебательного типа устанавливаются для любых начальных условий. В этом смысле можно говорить о явлении захвата несущей частоты управляемого генератора эталонной частотой при одновременном формировании управляемой хаотической фазовой модуляции выходного сигнала.

**2.2. Управление спектром хаотического сигнала.** Параметры  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\omega$  определяют тип стационарного движения, устанавливающегося в системе (1). Изменением параметров неавтономности  $\mu \sin(\omega t)$ , рассматриваемой здесь в качестве специального управляющего воздействия, можно добиться хаотизации колебаний. Кроме того, параметры  $\lambda$  и  $\tau$  характеризуют инерционные свойства петли управления и, следовательно, влияют на спектральный состав генерируемого сигнала. При увеличении запаздывания  $\tau$  область гарантированного установления хаотических колебаний (заштрихована на рис. 4) смещается в сторону больших значений  $\lambda$ ; дальнейший рост  $\tau$  и  $\lambda$  приводит к снижению резонансного значения частоты модуляции и установлению периодических или квазипериодических движений. Для возобновления хаотических колебаний необходимо уменьшать частоту модуляции  $\omega$ . Таким образом, варьируя  $\tau$ ,  $\lambda$  и  $\omega$ , в системе (1) можно получать однотипные хаотические колебания с различными характерными частотами. На рис. 6 приведены проекции хаотических аттракторов на плоскость  $(\varphi, u)$  и спектры мощности, вычисленные по дискретной реализации  $u(t_i)$ . Сужение спектра хаотического сигнала получено за счет увеличения  $\tau$  и  $\lambda$ , а также уменьшения частоты периодического воздействия  $\omega$ .

Данный способ управления шириной спектра генерируемого хаотического сигнала может оказаться полезным при согласовании передающего устройства, использующего детерминированный шумовой сигнал, и канала связи с ограниченной полосой пропускания.

**2.3. Модулирование хаоса информационным сигналом.** Известные способы защиты аналоговых сообщений от «прослушивания», использующие детерминированный хаос, опираются на широкополосность и непрерывность спектров мощности хаотических сигналов. Техника «маскирования» сообщения [5] заключается в простом сложении информационного и хаотического сигналов на выходе передатчика и синхронном вычитании в приемнике. При этом уровень секретности тем выше, чем слабее информационный сигнал по сравнению с детерминированным шумом, в противном случае сигнал просто будет «слышен» на фоне шума. Альтернативным решением является нелинейное преобразование информационного и хаотического сигналов в приемно-передающих устройствах, например, умножение и деление [6], делающее даже сильный информационный сигнал «неузнаваемым». Простой способ модуляции хаоса, рассматриваемый ниже, основывается на индуцировании сложных движений информационным сигналом. Информационный сигнал, будучи приложен в качестве внешнего возмущения к динамической системе, функционирующей в докритическом режиме вблизи бифуркации рождения хаоса или кризиса существующего хаотического аттрактора, вызывает случайные переходы системы между качественно

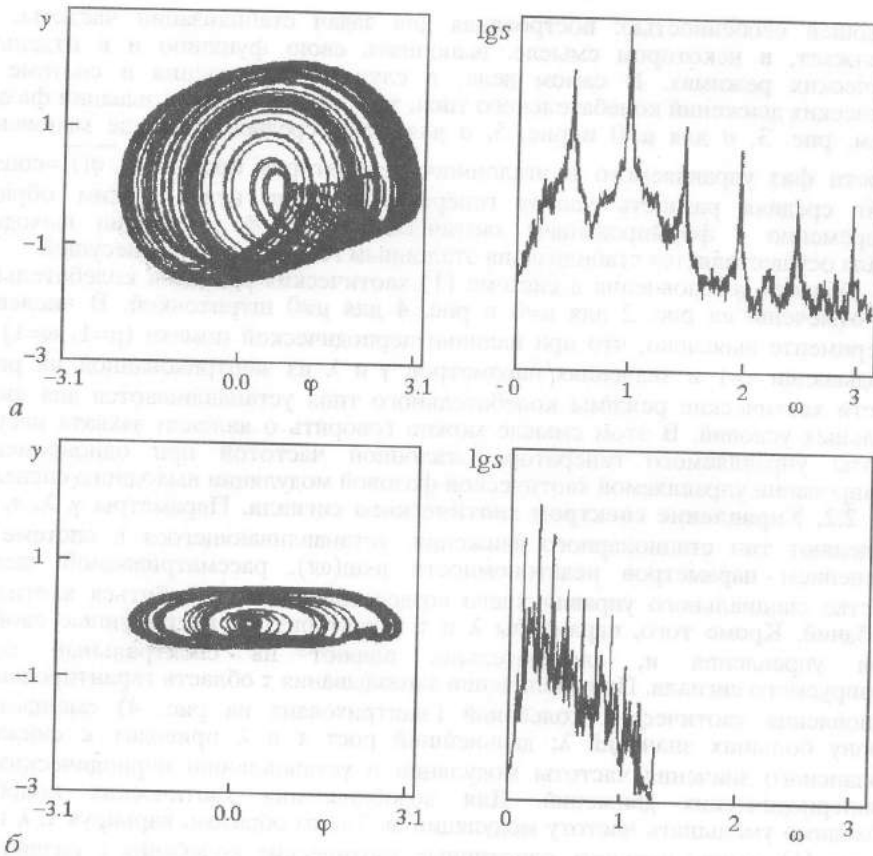


Рис. 6. Управление шириной спектра хаотических колебаний в генераторе вариацией параметров петли автоподстройки: а -  $\gamma=0.3, \lambda=0.78, \tau=1, \omega=1, \mu=1$ ; б -  $\gamma=0.3, \lambda=2.745, \tau=5, \omega=0.26, \mu=0.5$

отличными состояниями, формируя новое объединенное состояние (подобно тому, как шум может индуцировать новые состояния динамических систем [28,37]). Механизм такого взаимодействия существенно нелинейный, следовательно, характеристики информационного сигнала и индуцированного им хаотического режима, например, спектры мощности, будут связаны нелинейным образом.

Модель генератора с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки (1) демонстрирует два типа регулярных и хаотических движений – колебательные и вращательные, и может быть использована в качестве эффективного нелинейного преобразователя информационного сигнала. На рис. 7 приведены спектры мощности и проекции траектории системы

$$\dot{\varphi}(t) = y(t), \quad \dot{y}(t) = \gamma - \sin\varphi(t - \tau) - \lambda y(t) + s(t) \quad (2)$$

на цилиндрические поверхности  $(\varphi, y)$ ,  $\varphi(\text{mod } 6\pi) - \pi$  при  $\gamma=0.05, \tau=3, \lambda=0.83$ . Рис. 7, а соответствует автономному случаю ( $s(t)=0$ ), на рис. 7, б приведен результат воздействия простейшего информационного сигнала  $s(t)=0.01\sin(0.38t)$ . В этом случае спектр выходного сигнала совмещен со спектральной линией входного – никаких явных признаков упорядоченного информационного сигнала на выходе преобразователя (2) нет. В данном примере, как и в случае [6], осуществляется «распределение информации по спектру хаотического процесса», повышающее надежность сокрытия сигнала. При этом, в отличие от [6], не требуется разработка специальных нелинейных преобразователей, а используются нелинейные свойства самого генератора хаоса.

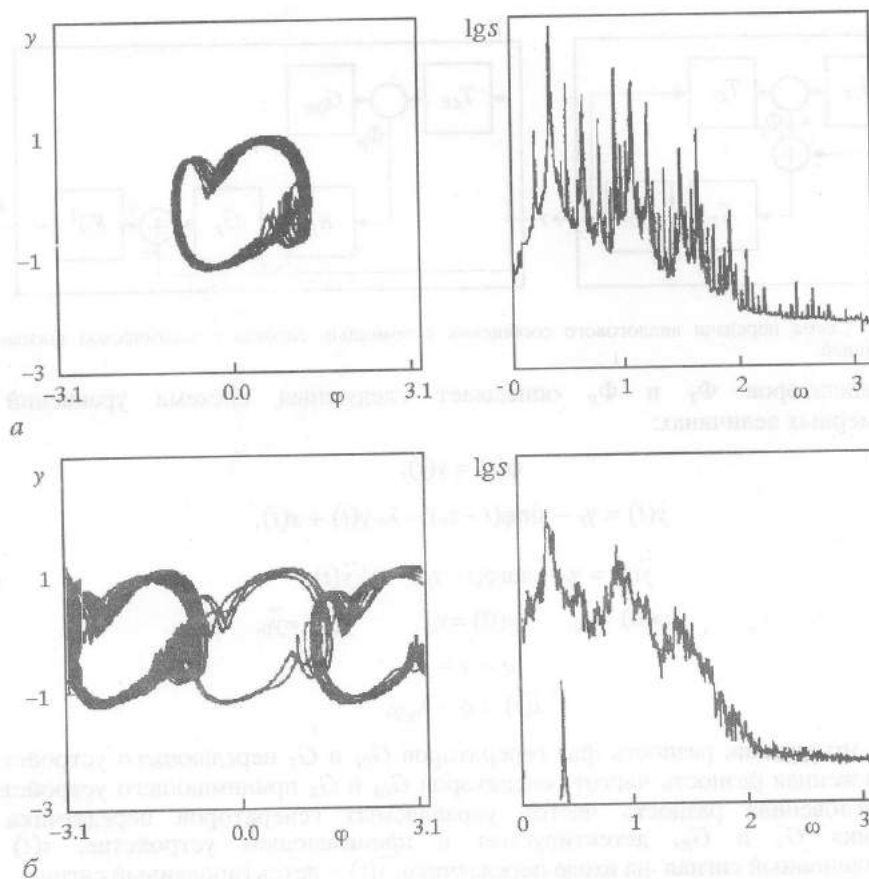


Рис. 7. Модулирование хаоса в системе (2) гармоническим информационным сигналом. Проекция траекторий на плоскость  $(\varphi, y)$  и спектры мощности выходного сигнала: *a* – при нулевом входе, *б* – с информационным сигналом на входе

**2.4. Извлечение информационного сигнала из хаоса.** Извлечение информационного сигнала из смеси с детерминированным хаотическим процессом представляет собой операцию, обратную к смешиванию, и близко по подходу и результатам к оптимальной фильтрации случайных процессов [5,10]. Построение устройства, извлекающего информационную компоненту из хаоса, не имеет стандартных алгоритмов и опирается преимущественно на интуицию конструктора и некоторые общие соображения, изложенные в [24]. Для систем кольцевого типа, к которым принадлежит и рассматриваемая схема генератора с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки, решение может быть особенно простым: приемная система повторяет передающую с разомкнутой петлей обратной связи и «вычитающим» устройством на выходе [7,8,10]. Приведем пример построения системы скрытой передачи аналоговых сообщений на основе генератора с фазовым управлением. Схемы передающей ( $T$ ) и принимающей ( $R$ ) подсистем приведены на рис. 8. Информационный сигнал  $s(t)$  добавляется к низкочастотному управляющему сигналу и преобразуется в хаотическую фазовую модуляцию выходного сигнала управляемого генератора  $G_T$ . На приемном конце хаотический сигнал обрабатывается аналогичным образом и модулирует сигнал управляемого генератора  $G_R$ . Выделяемая в приемнике мгновенная разность частот  $q(t)$  генераторов  $G_T$  и  $G_R$  связана линейным соотношением с детектированным сигналом  $\tilde{s}(t)$ . Динамику рассмотренной схемы при одинаковых характеристиках фазовых



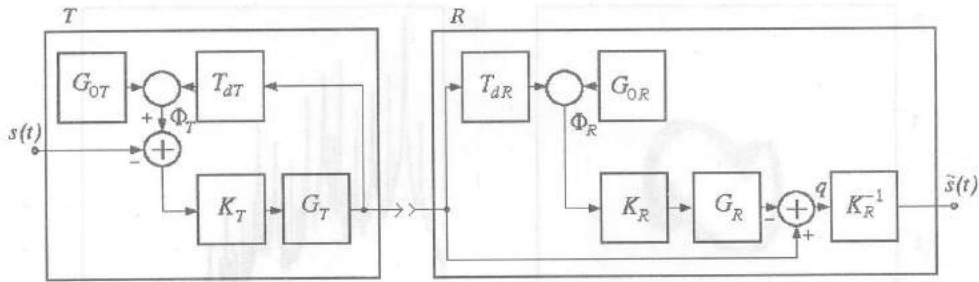


Рис. 8. Схема передачи аналогового сообщения с помощью сигнала с хаотической фазовой модуляцией

дискриминаторов  $\Phi_T$  и  $\Phi_R$  описывает следующая система уравнений в безразмерных величинах:

$$\begin{aligned}
 \dot{\varphi}(t) &= \gamma(t), \\
 \dot{y}(t) &= \gamma_T - \sin\varphi(t - \tau_T) - \lambda_T y(t) + s(t), \\
 \dot{\tilde{y}}(t) &= \gamma_R - \sin\varphi(t - \tau_R) - \lambda_R \tilde{y}(t), \\
 \varphi(0) &= \varphi_0, \quad y(0) = y_0, \quad \tilde{y}(0) = \tilde{y}_0, \\
 q &= y - \tilde{y}, \\
 \dot{\tilde{s}}(t) &= \dot{q} - \lambda_R q,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\varphi$  – мгновенная разность фаз генераторов  $G_{OT}$  и  $G_T$  передающего устройства,  $\tilde{y}$  – мгновенная разность частот генераторов  $G_{OR}$  и  $G_R$  принимающего устройства,  $q$  – мгновенная разность частот управляемых генераторов передатчика и приемника  $G_T$  и  $G_R$ , детектируемая в принимающем устройстве,  $s(t)$  – информационный сигнал на входе передатчика,  $\tilde{s}(t)$  – детектированный сигнал.

Рассмотрим в качестве примера передачу из подсистемы  $T$ , работающей в хаотическом режиме, в подсистему  $R$  следующего информационного сигнала:

$$s(t) = 0.01\sin(0.21t) + 0.02\sin(0.33t) + 0.03\sin(0.45t).$$

Результаты нелинейной обработки, полученные численным решением уравнений (3) при малой расстройке параметров приемной и передающей подсистем  $\gamma_T = 0.05$ ,  $\gamma_R = 0.06$ ,  $\tau_T = 3$ ,  $\tau_R = 2.99$ ,  $\lambda_T = 0.8$ ,  $\lambda_R = 0.79$  и различающихся начальных условиях  $\varphi_0 = 6.3$ ,  $y_0 = 0.1$ ,  $\tilde{y}_0 = 1.1$ , приведены на рис. 9. Спектр мощности информационного сигнала  $s(t)$  (триплет) совмещен на рис. 9, а со спектром частотной модуляции передаваемого сигнала, вычисленным по дискретной реализации  $y(t_i)$ . Эффективное сокрытие информационного сигнала обеспечивается индуцированными им хаотическими движениями колебательно-вращательного типа. На рис. 9, б приведен спектр детектированного сигнала  $\tilde{s}(t)$ . Хаотическая компонента в спектре детектированного сигнала вызвана различием параметров подсистем и уменьшается при более точной настройке. По аналогии с данной моделью схемы передачи сигнала при помощи хаоса может быть рассмотрена система, использующая неавтономную петлю управления (1). Учет периодического возмущения несколько усложняет детектирование, но не изменяет существенно шифрующих свойств системы в целом [4]. В проведенном нами численном эксперименте установлено, что схема, приведенная на рис. 8, обладает высокой помехоустойчивостью и малой требовательностью к подбору параметров подсистем. Последнее свойство является недостатком, если требуется высокая надежность закрытия информации. Для повышения чувствительности к

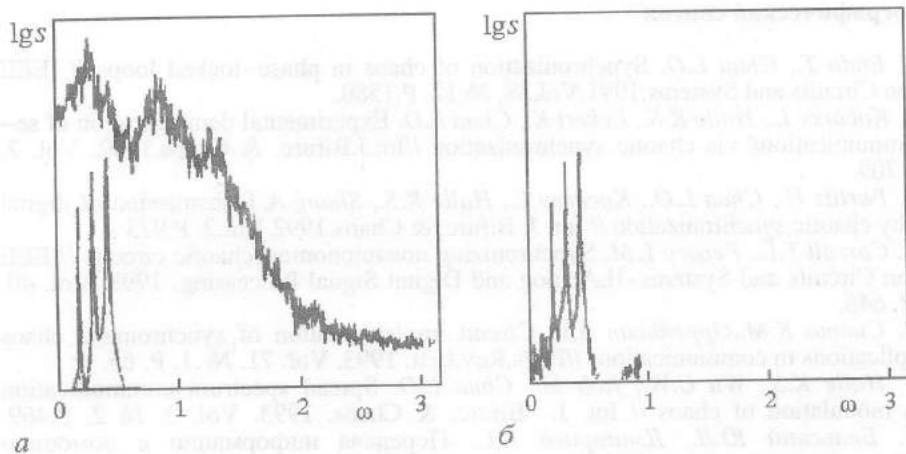


Рис. 9. Спектры мощности: *a* – информационного и соответствующего ему выходного сигналов, *б* – детектированного сигнала

расстройке параметров могут быть применены дополнительные нелинейные преобразования информационного и хаотического сигналов [6].

### Заключение

Рассмотренная система управления частотой генератора с помощью петли фазовой автоподстройки с запаздывающей обратной связью демонстрирует сложное поведение, включающее регулярные и хаотические режимы. Среди последних особым свойством обладают режимы с хаотическими колебаниями фазы управляемого генератора относительно фазы эталонного сигнала – одновременно с формированием хаотической фазовой модуляции выходного сигнала осуществляется подстройка его несущей под частоту эталонного генератора. Асимптотическая устойчивость такого режима генерации при любых начальных условиях позволяет использовать данную схему управления для генерирования сигналов с хаотической фазовой модуляцией и стабилизированными несущими частотами. Петля запаздывающей обратной связи позволяет не только построить генератор хаоса на базе обычного автогенератора, но и управлять характеристиками хаотических процессов – типом, размерами, спектральным составом и шириной спектра, а в случае больших запаздываний можно ожидать регулируемости в широких диапазонах колмогоровской энтропии и фрактальной размерности аттракторов, восстанавливаемых по реализациям [25]. Следует особо отметить, что все динамические возможности достигаются только за счет петли обратной связи, для чего не требуется изменения структуры и параметров управляемого генератора. Это свойство может оказаться полезным при регулировании процессов в физических объектах, доступ к параметрам которых ограничен.

Разнообразие хаотических режимов, которые можно получить в рассматриваемой системе фазовой автоподстройки, и широкое распространение этих устройств в современной аппаратуре связи делает актуальным их дальнейшее исследование с точки зрения нелинейной хаотической динамики и ее приложений [1, 16, 29–34, 36].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93–02–15424).*

### Библиографический список

1. *Endo T., Chua L.O.* Synchronization of chaos in phase-locked loops // IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1991. Vol. 38, № 12. P. 1580.
2. *Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L.O.* Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // Int. J. Bifurc. & Chaos. 1992. Vol. 2, № 3. P. 709.
3. *Parlitz U., Chua L.O., Kocarev L., Halle K.S., Shang A.* Transmission of digital signals by chaotic synchronization // Int. J. Bifurc. & Chaos. 1992. Vol. 2. P. 973
4. *Carroll T.L., Pecora L.M.* Synchronizing nonautonomous chaotic circuits // IEEE Trans. on Circuits and Systems—II: Analog and Digital Signal Processing. 1993. Vol. 40, № 10. P. 646.
5. *Suoto K.M., Oppenheim A.V.* Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. № 1. P. 65.
6. *Halle K.S., Wu C.W., Itoh M., Chua L.O.* Spread spectrum communication through modulation of chaos // Int. J. Bifurc. & Chaos. 1993. Vol. 3. № 2. P. 469.
7. *Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С.* Передача информации с помощью детерминированного хаоса // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, вып. 7. С. 1310.
8. *Волковский А.Р., Рувьков Н.Ф.* Синхронный хаотический отклик нелинейной колебательной системы как принцип детектирования информационной компоненты хаоса // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, Вып. 3. С. 71.
9. *Кислов В.Я.* Динамический хаос и его использование в радиоэлектронике для генерирования, приема и обработки колебаний и информации // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, вып. 10. С. 1783.
10. *Козлов А.К., Шалфеев В.Д.* Избирательное подавление детерминированных хаотических сигналов // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 23. С. 83.
11. *Алексеев А.А., Козлов А.К., Шалфеев В.Д.* Хаотический режим и синхронный отклик в автогенераторе, управляемом по частоте // Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 1. С. 71.
12. *Андреев Ю.В., Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С.* Запись и восстановление информации с использованием устойчивых циклов двумерных и многомерных отображений // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 1. С. 114.
13. *Ott E., Grebogi C., Yorke J.A.* Controlling chaos // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64, № 11. P. 1196.
14. *Jackson E.A.* On the control of complex dynamic systems // Physica D. 1991. Vol. 50. P. 341.
15. *Chen G., Dong X.* On feedback control of chaotic nonlinear dynamic systems // Int. J. Bifurc. & Chaos. 1992. Vol. 2, № 2. P. 407.
16. *Bradley E.* Using chaos to broaden the capture range of a phase-locked loop // IEEE Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40, № 11. P. 808.
17. *Genesio R., Tesi A., Villoresi F.* A frequency approach for analyzing and controlling chaos in nonlinear circuits // IEEE Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40, № 11. P. 819.
18. *Jonson J.A., Hunt E.R.* Maintaining stability in Chua's circuit driven into regions of oscillation and chaos / Chua's Circuit: A Paradigm of Chaos / Ed. R.N. Madan. Singapore: World Scientific, 1993. P. 458.
19. *Kapitaniak T., Kocarev L., Chua L.O.* Controlling chaos without feedback and control signals // Int. J. Bifurc. & Chaos. 1993. Vol. 3, № 2. P. 459.
20. *Murali K., Lakshmanan M.* Chaotic dynamics of the driven Chua's circuit // IEEE Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40, № 11. P. 836.
21. *Ogorzalec M.J.* Taming chaos: Part II—Control // IEEE Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40, № 11. P. 700.
22. *Fujisaka H., Yamada T.* Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems // Prog. Theor. Phys. 1983. Vol. 69. P. 3.

23. Афраймович В.С., Веричев Н.Н., Рабинович М.И. Стохастическая синхронизация в диссипативных системах // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 9. С. 1050.
24. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64, № 8. P. 821.
25. Farmer J.D. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system // Physica D. 1982. Vol. 4, № 3. P. 366.
26. Хейл Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1984.
27. Афанасьева В.В. Об особенностях хаотической динамики двух симметричных автоколебательных систем (неавтономный осциллятор Дуффинга и автогенератор с запаздывающей обратной связью) // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 6. С. 62.
28. Кальянов Э.В., Кислов А.В. Бифуркации в генераторе с запаздыванием, стимулированные внешним воздействием // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, вып. 9. С. 1619.
29. Ueda Y., Ohta H. Strange attractors in a system described by nonlinear differential-difference equation // Proc. 6-th Kyoto Summer Inst. Chaos and Statistical Methods. Kyoto, Japan, Sept. 12-15, 1983 / Ed. Y. Kuramoto. Tokyo: Springer-Verlag, 1984. P. 161.
30. Белюстина Л.Н., Фишман Л.З. Об автоколебаниях в системе фазовой автоподстройки частоты с запаздыванием // Межвуз. сб. Динамика систем: Численные методы иссл. динамических систем. Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1982. С.152.
31. Белюстина Л.Н., Кинягина М.С., Фишман Л.З. Динамика системы фазовой синхронизации с запаздыванием // Теоретическая электротехника. 1990. Вып. 48. С. 72.
32. Дворников А.А., Капранов М.В., Кулешов В.Н., Удалов Н.Н. Взаимосвязанные пространственно распределенные системы фазовой синхронизации // Науч.-техн. конф.: Повышение качества и эффективности устройств синхронизации в системах связи. 25-27 мая, 1993. Ярославль, 1993. С. 5.
33. Шахгильдян В.В., Лаховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.
34. Системы фазовой синхронизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н.Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982.
35. Шильников Л.П. Теория бифуркаций и модель Лоренца // Марсден Дж., Мак-Кракен М. Бифуркация рождения цикла и ее приложения. М.: Мир, 1980.
36. Белюстина Л.Н., Козлов А.К., Фрайман Л.А. Стационарные процессы в нелинейной неавтономной СФС с запаздыванием // Науч.-техн. конф.: Повышение качества и эффективности устройств синхронизации в системах связи. 25-27 мая, 1993. Ярославль, 1993. С. 52.
37. Хорстхемке В., Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы. М.: Мир, 1987.

Нижегородский государственный  
университет

Поступила в редакцию 29.04.94

## CONTROLLING OF CHAOTIC OSCILLATIONS IN GENERATOR WITH DELAYED PHASE-LOCKED LOOP

A.K. Kozlov, V.D. Shalfeev

Problems of excitation of chaotic oscillations in voltage-controlled oscillator with delayed phase-locked loop are considered. Some examples on controlling and use of chaos are presented.



*Козлов Александр Константинович* – родился в 1964 году, окончил Горьковский государственный университет в 1989 году. Младший научный сотрудник НИИ прикладной математики и кибернетики при ННГУ. Работает в области исследования нелинейной динамики систем управления колебаниями, в том числе с запаздывающими обратными связями.



*Шалфеев Владимир Дмитриевич* – родился в 1941 году, окончил Горьковский университет в 1963 году. Зав. кафедрой теории колебаний Нижегородского университета, доктор физико-математических наук, профессор, чл.-корр. Академии инженерных наук РФ. Область научных интересов: динамика нелинейных систем, теория синхронизации, пространственно-временной хаос, структуры. Соавтор монографий «Системы фазовой синхронизации», «Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации».



**В издательстве Саратовского университета вышло в свет в 1993 году учебное пособие**

Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1993. 312 с.

Предлагаемое вниманию читателей пособие написано на базе специального курса лекций, читаемых студентам физического факультета Саратовского университета. Пособие состоит из 15 лекций, условно разбитых на три раздела: линейные волновые явления на магнитостатических волнах, нелинейные процессы и оптика магнитостатических волн, экспериментальные исследования и прикладные вопросы. Лекции различные по объему, каждая в среднем может излагаться в течение 4–6 аудиторных часов. Часть материала по усмотрению преподавателя может быть вынесена на семинарские и практические занятия, а также использована студентами при самостоятельной работе для написания курсовых и дипломных работ. Для этого каждая лекция снабжена контрольными вопросами и заданиями. Ниже перечислены названия основных разделов–лекций пособия.

- Лекция 1. Колебательные явления в магнитоупорядоченных средах на сверхвысоких частотах.
- Лекция 2. Волновые явления в магнитоупорядоченных средах на сверхвысоких частотах.
- Лекция 3. Электродинамика многослойных ферритовых структур.
- Лекция 4. Распространение магнитостатических волн под произвольным углом к магнитному полю.
- Лекция 5. Энергия, поток энергии и скорость распространения энергии магнитостатических волн.
- Лекция 6. Магнитостатические волны в связанных ферромагнитных пластинах (пленках).
- Лекция 7. Магнитостатические волны в структурах, граничащих с импедансными поверхностями.
- Лекция 8. Возбуждение магнитостатических волн.
- Лекция 9. Нелинейные явления в ферромагнетиках.
- Лекция 10. Параметрическое возбуждение волн в ферромагнетике.
- Лекция 11. Магнитостатические волны в нелинейной ферромагнитной среде.
- Лекция 12. Прохождение сигналов через линию передачи, нагруженную на феррит.
- Лекция 13. Магнитостатические волны в представлении геометрической оптики.
- Лекция 14. Линии передачи на магнитостатических волнах с линейными характеристиками.
- Лекция 15. Линии передачи на магнитостатических волнах с нелинейными характеристиками.

**анонсанонс анонс анонс анонсанонс анонс анонс анонсанонс  
онс анонс алонс анонс анонс анонс алонс анонс анонс алонс а  
с анонс анонс алонс анонс анонс анонс алонс анонс анонс алонс**