

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАЗОННЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

*БОНДАРЕНКО М.Ф., ЧЕРЕДНИКОВ П.И.,  
МЕНЯЙЛО А.Д., ХОМЯКОВ Е.В.,  
АБДЕРРАЗИК М.*

Предлагается новый подход к построению систем контроля и диагностики сложных объектов (СКДСО) на основе многофункциональных пазонных устройств (МПУ). Обобщаются материалы патентов и новые разработки авторов. Строится математическая модель колебательной системы, работающей в зонах Матье-Хилла-Чередникова (МХЧ), на основе выбранных методов получены аналитические и экспериментальные динамические параметры быстродействующего базового МПУ. Приводятся разработанные пазонные усилитель, умножитель частоты, компаратор и др. на основе базового МПУ. Полученные результаты можно использовать при диагностике и прогнозировании состояния радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, а также в системах массового обслуживания.

Высокие требования к качеству систем диагностики радиоэлектронных и телекоммуникационных устройств связи, развитие информационных технологий послужили толчком к созданию быстродействующих приборов и устройств, использующих параметрические методы генерации и усиления с учетом высших зон неустойчивости. При этом расширяется применение магнитных (цилиндрических и пленочных) устройств, с учетом современной технологии их изготовления [1], в качестве одноэлектронных логических элементов [2], модуляторов, усилителей, умножителей, сравнивающих, вычислительных, запоминающих и других устройств [3-10].

Параметрические устройства обладают низким уровнем шума и высокой чувствительностью по сравнению с подобными схемами, разработанными на полупроводниковых приборах. Поэтому они используются в качестве малозумящих усилителей [11], первичных преобразователей (датчиков) [4], усилителей биоэлектрических сигналов [12], источников питания и др. Однако в этих работах параметрические системы функционируют в основном на субгармонике и комбинационных частотах и для них характерно низкое быстродействие и помехоустойчивость. Во многих случаях наиболее эффективно использовать пазонные устройства, работающие в зонах МХЧ [13], которые обладают высоким быстродействием, многофункциональностью и помехоустойчивостью.

*Целью* исследования является разработка и построение СКДСО на основе МПУ, исследование математической модели, описывающей МПУ в зонах МХЧ.

*Задачи:* 1) построить математическую модель, описывающую нелинейный колебательный контур с сильными полями накачки и работающий в зонах МХЧ; 2) разработать новые быстродействующие устройства, исследовать их характеристики и возможности применения в радиотехнических средствах и технике связи; 3) на основе разработанных устройств построить систему контроля и диагностики сложных объектов.

В настоящее время представляет интерес разработка систем контроля, диагностики, прогнозирования, обслуживания, в том числе в системах телекоммуникации, телеметрии, управления и массового обслуживания сложных технических и биологических объектов. Вариант разработанной системы контроля и диагностики сложных объектов представлен на рис. 1.

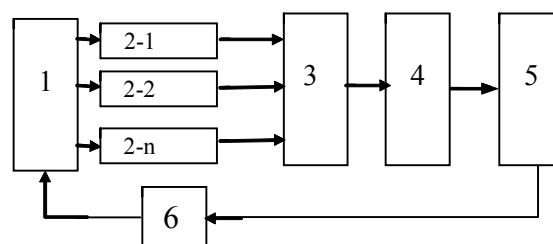


Рис. 1. Структурная схема СКДСО и управления

Сигналы с объекта 1, усиленные, преобразованные и промодулированные с пазонных датчиков преобразователей 2-1, 2-2, ..., 2-n через коммутатор контроля 3, поступают на мультиплексор 4 и далее в блок обработки информации, принятия решения и управления 5, где вырабатывается сигнал управления объектом в зависимости от сигналов с датчиков 2-1, 2-2, ..., 2-n и решаемой задачи. В схему введен коммутатор 6. Возможны три режима работы схемы: 1) коммутаторы 3 и 6 отключены, система работает в автономном режиме; 2) включен только коммутатор контроля 3, при этом осуществляется контроль рабочего состояния объекта 1 (система обслуживания); 3) включены коммутаторы 3 и 6, осуществляется контроль над параметрами объекта 1 и управление его работой. Все блоки и устройства системы разработаны на базе МПУ. В основу разработки положен опыт экспериментального использования МПУ при разработке и эксплуатации электронного траектографа и специализированного компьютера [14].

Сигналы контрольных точек, т.е. входные сигналы первичных преобразователей, могут быть различной природы (магнитные, электрические, электромагнитные, механические, тепловые и др.), которые в датчиках МПУ преобразуются в соответствующие сигналы, пригодные для использования их в блоке 5 и ПЭВМ. Таким образом, МПУ и датчики могут осуществлять преобразование одного вида энергии в другой с одновременным усилением, преобразованием, умножением, сравнением, обработкой и нормированием, а при необходимости проводить логические операции.

В зависимости от природы модулируемых накачкой энергоемких элементов резонансных контуров, МПУ могут быть емкостными или индуктивными, соот-

ветственно на основе полупроводниковых приборов, сегнетоэлектриков или магнитных материалов. На рис. 2 приведен емкостной низкочастотный усилитель с малым уровнем собственного шума для усиления сигналов низких и инфранизких частот, где блок 1 – резонансный усилитель, блок 2 – амплитудный детектор. Приведенное ко входу напряжение шума такого усилителя не превышает 0,03 мкВ. Коэффициент усиления по напряжению стабилен и составляет 30 дБ для сигналов, лежащих в полосе частот от 1 до 50 Гц. Представляет интерес низкочастотный параметрический усилитель. Его схема с входным сопротивлением порядка 500 ГОм, шунтирующей емкостью, регулируемой в пределах от нескольких пикофард до десятитысячных долей пикофарда, приведена на рис. 3.

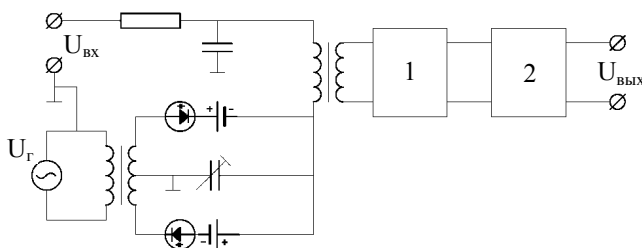


Рис. 2. Емкостной низкочастотный усилитель

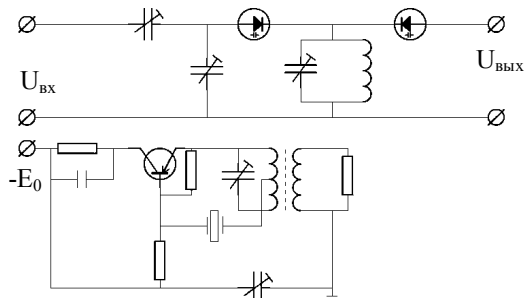


Рис. 3. Схема усилителя с высоким входным сопротивлением

Последовательно с резонансным контуром включается параметрический диод. Емкость диода вместе с параллельным колебательным контуром образует последовательно-параллельную резонансную цепь.

МПУ на магнитных пленках (рис. 4) по принципу действия не отличаются от преобразователей на магнитных сердечниках. Однако процессы, происходящие в магнитных пленках при подаче в обмотку возбуждения тока накачки, во многом отличаются от процессов перемагничивания магнитопроводов. При соответствующем выборе режима тонкопленочный параметрон может работать на частотах,

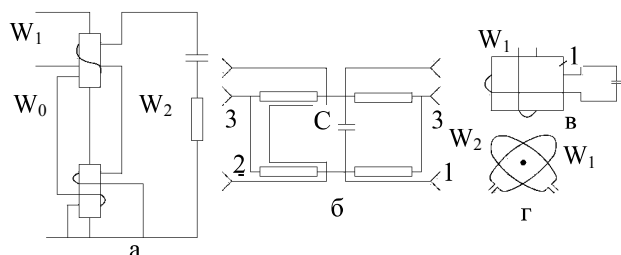


Рис. 4. МПУ на магнитных пленках

достигающих гигагерц. На рис. 4,а показан преобразователь с цилиндрическими магнитными пленками, которые нанесены на медный провод обмотки накачки  $W_1$ . На пленки нанесены резонансные обмотки  $W_2$  и управления  $W_0$ .

Кроме того, цилиндрические магнитные пленки применяются в МПУ (рис.4,б), где используют четыре отрезка тонкого медного провода, покрытых слоем пермалоевой пленки (толщина покрытия несколько микрометров). Эти четыре провода изолированы и соединяются по мостовой схеме для устранения разности потенциалов частоты накачки на выходе резонансного контура 1. Входной сигнал подается на зажимы 2 и через воздушный трансформатор поступает в резонансный контур. Возбуждение параметрона осуществляется через зажим 3. Указанные пленочные преобразователи имеют следующие данные: частота накачки – до 20 МГц, мощность возбуждения – около 50 мВт, выходной сигнал – 1,5...2,5 В, максимальная рабочая температура – 110°C.

На рис.4,в приведен МПУ на плоской магнитной пленке. Благодаря ортогональному расположению обмоток цепь накачки развязана с резонансной линией – в зависимости от рабочей частоты и передающего тракта. Это исключает необходимость применения балансной схемы. Поле накачки действует вдоль легкого намагничивания пленки, а поле параметрического контура - вдоль трудного. Использование в качестве нелинейного управляемого элемента магнитной пленки позволяет повысить быстродействие, надежность и степень миниатюризации МПУ.

Представляет интерес создание параметрических усилителей на монокристаллах ферритов, рабочая частота которых определяется сотнями гигагерц. Возможны ортогональные витковые и полувитковые элементы связи феррита с резонатором для коаксиальных или полосковых линий. В волноводных трактах феррит размещается в резонаторе с соответствующими связями волноводных линий. Конструкции параметрических усилителей на моноферрите определяются рабочей частотой и применяемой передающей линией. На рис. 4,г приведено схематическое изображение ортогонального расположения обмоток – накачки  $W_1$  и резонансных  $W_2$ . В центре находится ферритовая сфера. Перспективным является использование ферритодиэлектрических резонаторов при реализации ферритовых параметрических усилителей.

Работа параметрической системы в качестве усилителя-модулятора основана на преобразовании входного сигнала в соответствующее изменение амплитуды параметрических колебаний. Необходимые для расчета зависимости и зоны возбуждения (приведены ниже) характеризуются следующими параметрами: величиной поля возбуждения, амплитудой параметрических колебаний, шириной области генераций колебаний, чувствительностью на возрастающем участке амплитудной характери-

стики. Эти параметры связаны между собой, а их абсолютное значение зависит от типа используемых магнитных материалов. Параметрические преобразователи могут быть использованы в качестве усилителей постоянных и высокочастотных сигналов, компараторов, датчиков допускового контроля тока при следующих режимах работы.

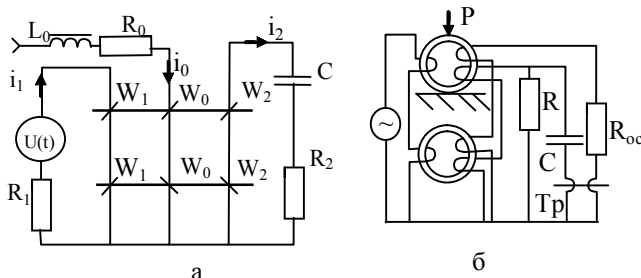


Рис. 5. Многофункциональное пазонное устройство (а) и электромеханический преобразователь (б) на его основе

Принцип действия электромеханического пазонного первичного преобразователя (ППП), основой которого является МПУ (рис. 5, б) – преобразование неэлектрических величин в электрические сигналы (пазонные колебания). Пазонный датчик давления может работать в одной из зон МХЧ в устойчивом режиме путем подбора критического сопротивления  $R$ . В качестве внешних сил могут быть пондеромоторные силы в СВЧ волноводах, температурные, вибрационные или другие воздействия. Воздействие прилагается к одному из сердечников. Второй сердечник при этом не подвергается действию внешних сил и может быть помещен в экран (магнитный, электрический, тепловой или их сочетание). Индуктивность нагруженного сердечника изменяется, что приводит к асимметрии характеристик магнитных сердечников, вызывает разбаланс дифференциальной системы и появление вынуждающей силы пазонного контура. При этом амплитуда колебаний будет пропорциональна внешней вынуждающей силе.

Были разработаны измерители проходящей СВЧ мощности, в которых используется пазонная система с тонкими пермалоевыми магнитопроводами, рабочий сердечник которой одной стороной жестко закреплен на волноводе, а противоположной стороной – в окне волновода. Пондеромоторные силы электромагнитного поля деформируют чувствительный элемент (сердечник), вызывая разбаланс дифференциальной системы и появление пазонных колебаний, пропорциональных СВЧ мощности. Кроме того, такие ППП нашли применение в датчиках температуры, вибрации, в том числе и сейсмодатчиках [4].

Рассмотрим пазонную систему, приведенную на рис. 5, а [4]. При описании процессов возбуждения параметрических колебаний в данной системе кривую намагничивания сердечника выразим гиперболическим синусом  $H = \alpha \text{sh} \beta V$ , где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты аппроксимации;  $V$ ,  $H$  – мгновенное значение магнитной индукции и напряженности магнитного поля в сердечнике. Питание осуще-

ствляется от генератора гармонического напряжения, а в резонансном контуре имеются случайные электрические флуктуации в виде шума. Если пренебречь потерями на гистерезис и вихревые токи в магнитных сердечниках, то процессы в пазонной системе описываются с учетом закона Кирхгофа интегро-дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} sw_1 \frac{d(B'_I + B'_{II})}{dt} + R_1 i_1 &= U_m \sin \omega t; \\ sw_1 \frac{d(B'_I + B'_{II})}{dt} + R_2 i_2 + \frac{1}{C} \int i_2 dt &= \\ &= \sum E_k \sin k(\omega t + \Psi_k). \end{aligned}$$

К ним следует добавить уравнения полного тока:

$$\begin{aligned} i_1 w_1 + i_2 w_2 &= H I; \\ i_1 w_1 - i_2 w_2 &= H II, \end{aligned}$$

где  $s$  – сечение сердечников;  $l$  – длина средней линии магнитного поля в сердечнике;  $i_1, i_2$  и  $w_1, w_2$  – соответственно токи и витки контуров: накачки и резонансного;  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления в цепи накачки и резонансной;  $C$  – емкость в резонансном контуре;  $B'_I$  и  $B'_{II}$  – мгновенные значения индукции магнитного поля в сердечниках;  $U_m$  – амплитуда напряжения накачки;  $\omega$  – круговая частота накачки;  $E_k$  и  $\Psi_k$  – соответственно амплитуда и фаза  $k$ -й гармоники напряжения шума;  $H_I$  и  $H_{II}$  – мгновенные значения напряженностей магнитного поля в сердечниках;  $k=1, 2, 3, \dots$ . Критическая величина  $R_2$  позволяет получить сверхрегенеративный режим работы МПУ.

Отсюда определим токи с учетом аппроксимации нелинейной зависимости напряженности магнитного поля от индукции в виде гиперболического синуса. Обозначая  $x = \beta(B'_I + B'_{II})$ ,  $y = \beta(B'_I - B'_{II})$  и вводя безразмерное время  $\tau = \omega t$ , после соответствующих преобразований [4] получаем:

$$\begin{cases} \dot{x} + \gamma_1 \text{sh} \frac{x}{2} \text{ch} \frac{y}{2} = U'_m \sin \tau; \\ \ddot{y} + \gamma_2 \text{sh} \frac{y}{2} \text{ch} \frac{x}{2} + \gamma_3 \frac{d}{d\tau} \left( \text{sh} \frac{y}{2} \text{ch} \frac{x}{2} \right) = \\ = \sum_{k=1}^n A_k \cos k(\tau + \Psi_k), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \gamma_1 &= \frac{\alpha \beta l R_1}{sw_1^2 \omega}; \quad \gamma_2 = \frac{\alpha \beta l}{sw_2^2 \omega^2 C}; \quad \gamma_3 = \frac{\alpha \beta l R_2}{sw_2^2 \omega}; \\ A_k &= \frac{k \beta E_k}{sw_2 \omega}; \quad U'_m = \frac{\beta U_m}{sw_1 \omega}. \end{aligned}$$

Получена система двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно мгновенных значений индукции в первом и втором сердечниках электрических и геометрических параметров цепей, частоты и напряжения накачки. Эти выражения описывают совокупность всех физических

процессов, протекающих в рассматриваемой системе, т.е. получена математическая модель МПУ при воздействии случайных или детерминированных сигналов. Решение системы (1) будем искать в виде:

$$x = 2B_n \sin(\tau + \varphi);$$

$$y = \sum_{k=1}^n B_k \sin k(\tau + \varphi_k), \quad (2)$$

где  $B_n, B_k, \varphi, \varphi_k$  — соответственно амплитуды и фазы магнитной индукции накачки и колебаний в резонансном контуре.

Подставим решение (2) в систему (1). После несложных преобразований получим рассчитанные в первом приближении для второй зоны неустойчивости амплитудные (рис. 6,а), частотные (рис. 6,б) и фазовые (рис. 6,в) характеристики в пазонной системе. При этом уточнено влияние амплитуды накачки и гармонических составляющих друг на друга. На рис. 6,а и б пунктирная кривая соответствует эксперименту для  $R_2=10$  Ом, их амплитуды колебаний больше рассчитанных кривых, так как в экспериментальных характеристиках измерялись и высшие гармоники. Исследования показали, что методом гармонического баланса в первом приближении можно для анализа получить только энергетические уравнения, описывающие процессы в зонах МХЧ. Второе приближение аналитически получить невозможно без существенных упрощений, при которых теряется информация о нелинейно-параметрических процессах в зонах МХЧ. Дальнейшее решение, учитывающее нелинейные процессы, производится численным методом, при этом расчет хорошо совпадает с экспериментом.

Такой подход позволил получить и спектральный состав. Подробно метод будет описан в отдельной работе. Для примера на рис. 7 приведен аналитически рассчитанный (а) и экспериментальный (б) спектр составляющих параметрически возбужденных колебаний в нелинейном режиме при переходе из первой во вторую зону МХЧ (по координатам отложены соответственно амплитуда и номер гармоники).

Применяя известные условия подобия и дуальности нелинейных емкостных и индуктивных элементов и устройств на их основе, можно использовать полученные модели индуктивных МПУ для описания соответствующих емкостных МПУ. При этом дифференциальные уравнения будут отличаться только величинами входящих в них символов, постоянных и переменных коэффициентов и соответствующих интегральных коэффициентов.

В целях экспериментального исследования МПУ было разработано устройство для спектрального анализа (рис. 8) [3], содержащее АЦП 1-1, 1-2, ..., 1-n, информационные входы которых объединены и являются входом устройства, буферные блоки 2-1, 2-2, ..., 2-N памяти, информационные входы которых подключены к выходам соответствующих АЦП, блок 3 основной памяти, логический коммутатор 4, ЦАП 5, последовательно включенные

дисперсионный анализатор 6 спектра и регистрирующий блок 7, синхронизатор 8, мультиплексоры 9-1, 9-2, 9-3, аналоговый коммутатор 10, измеритель 11 задержки, блок 12 памяти, блок 13 преобразователя кодов, блок 14 цифрового фильтра нижней границы (ЦФН) спектра, блок 15 управления ЦФН, блок 16 логики ЦФН, блок 17 цифрового фильтра верхней (ЦФВ) границы, блок 18 управления, блоки и ЦФВ.

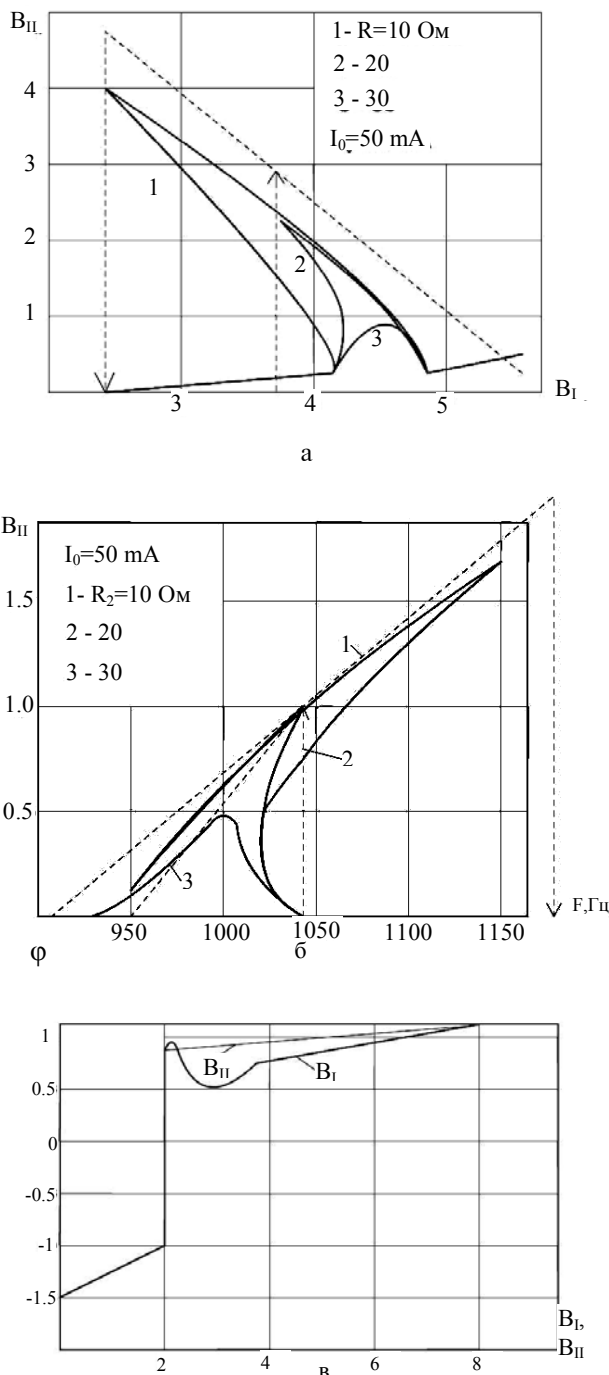


Рис. 6. Амплитудные (а), частотные (б) и фазовые (в) характеристики параметрической системы

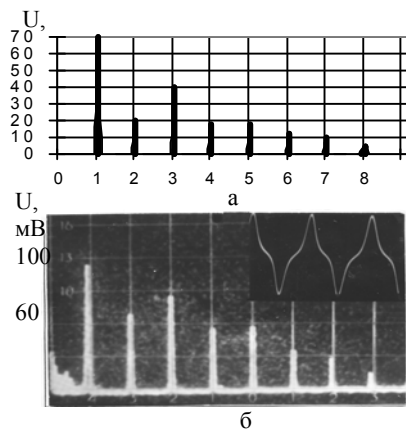


Рис. 7. Теоретический (а) и экспериментальный (б) спектр

Каждая реализация входного сигнала подвергается вначале предварительному анализу с целью обнаружить приблизительные границы спектра, а затем полному анализу в анализаторе б, с выхода которого поступает сигнал, огибающая которого определяет амплитудный спектр входного сигнала. Таким образом, в регистрирующем блоке 7 оказывается записанной информация о спектре входного сигнала. Сравнение и анализ расчетных и экспериментальных результатов (см. рис. 7) показывает прежде всего хорошее их совпадение, что еще раз подтверждает достоверность описанного механизма энергоинформационного взаимодействия в пазонной системе.

Известно, что усиление малых сигналов постоянного и медленноменяющегося тока, особенно формируемых датчиками с низкоомным сопротивлением, вызывает большие трудности, так как, во-первых, невозможно применить согласующий трансформатор и, во-вторых, из-за наличия высоких шумов классических усилителей. Эту проблему можно решить, используя параметрический усилитель-модулятор в качестве входного каскада усилителя.

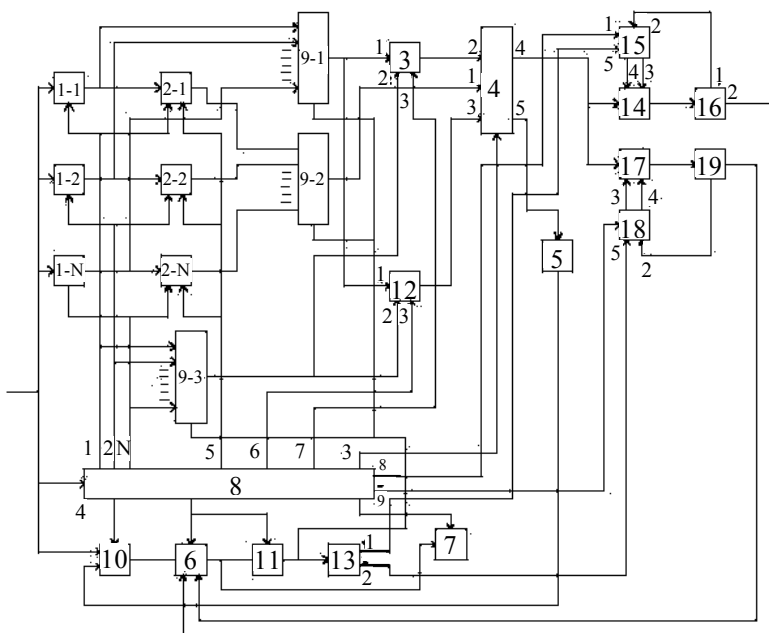


Рис. 8. Устройство для спектрального анализа

На рис. 9,а приведен усилитель, разработанный на базе МПУ, который состоит из трех узлов: I — узел преобразователя, II — усилитель переменного тока, III — фазочувствительный модулятор. Полезный сигнал поступает в обмотку управления. На выходе преобразователя получаем периодические колебания второй гармоники, усиленные и промодулированные входным сигналом. Далее этот сигнал поступает на полупроводниковый усилитель переменного напряжения II. Число последующих каскадов усиления периодических сигналов выбирается в зависимости от назначения прибора и величины необходимого выходного напряжения.

С усилителя переменного напряжения сигнал поступает на демодулятор III (рис. 9,а), выполненный на полевом транзисторе ВР245. Такой демодулятор работает на частотах до 100 МГц. Демодуляция в этой схеме осуществляется не так, как обычно, за счет диодной характеристики эмиттерного перехода, а благодаря ярко выраженной кривизне характеристики тока истока от напряжения на затворе при слабом токе. Таким образом, при входном напряжении от  $0,1 U_{эфф.}$  результат детектирования значительно более линейный, чем при использовании в качестве детектора диода. В определенных случаях можно применить более совершенные демодуляторы на микросхемах. Выбор демодулятора определяется также назначением прибора, т.е. оконечной нагрузкой, требуемой нагрузкой и погрешностью. На рис. 9, б приведена выходная характеристика усилителя на базе МПУ.

Сумматор с четырьмя и больше входных обмоток был использован как пороговый элемент. Если сумма сигналов с датчиков (или одного датчика) превышала весовой уровень, то включалось соответствующее защитное устройство трактографа и система возвращалась в исходное состояние. Количество входных обмоток ограничивают только геометрические размеры сердечников и диаметр применяемого провода. В качестве датчиков могут быть термопары, терморезисторы и т.д. Подобное устройство может найти широкое применение в аварийных и пусковых цепях при отклонении параметров от заданных, при регулировке температуры в нескольких точках, находящихся в труднодоступных местах, во взрывоопасных помещениях, зернохранилищах и т.д. Также МПУ можно использовать в качестве управляемого специализированного генератора, усилителя биосигналов и логических схем [5].

Это представляет интерес для телеизмерений, телекоммуникации, стационарных систем массового обслуживания и т.д. Анализ зарубежной литературы показал, что МПУ может быть выполнен на атомном или молекулярном уровне [2].

Следует отметить, что разработанные усилители на базе МПУ имеют целый ряд особенностей. Они позволяют усиливать и преобразовывать постоянный ток в переменный, медленно изменяющийся или

промодулированный высокочастотный сигнал  $2n\omega$  ( $n=1, 2, \dots$ ) частоты накачки. Низкоомный вход параметрического усилителя позволяет согласовать его с датчиками, такими как термодатчики, баллометры и т.д. Усиление малых сигналов в области низких частот, а также постоянного и медленно изменяющегося тока ограничено достаточно высокими шумами классических усилителей и невозможностью применения согласующих трансформаторов. Поэтому среди измерительных усилителей постоянного тока особое место занимают измерительные преобразователи постоянного тока малых сигналов, которые являются основными элементами связи вычислительных и информационных устройств с датчиками объектов контроля и управления.

Как было отмечено выше, в настоящее время широко распространены параметроны на субгармониках и комбинационных частотах. Менее исследованы параметрические системы, работающие в зонах неустойчивости и глубокой модуляции энергоемкого параметра, которые в сочетании с магнитно-транзисторными элементами позволяют получить высокое кратное и стабильное умножение частоты при долговечности, простоте и надежности системы.

В работе исследован пазонный синтезатор частоты, состоящий из нескольких умножителей и работающий в соответствующих зонах МХЧ. Для получения определенной фазы колебаний в режиме умножения частоты вводится сигнал подмагничивания. Применение развязывающего усилителя позволяет строить сложный синтезатор частоты, составленный из отдельных умножителей (рис. 10). При изменении амплитуды напряжения накачки или ее частоты можно возбуждать параметрические колебания в резонансном контуре на частотах  $\omega_p = n\omega$  ( $n=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) и использовать этот

сигнал в качестве накачки для последующего умножителя.

Предлагаемый пазонный синтезатор частоты в зонах МХЧ в случае пленочного исполнения, в том числе и нанодиапазоне [2] можно применять в интегральных схемах [1], что позволяет расширить верхний предел устройства умножения частоты до 2 ГГц. В то же время ферриты практически исчерпывают свои возможности при работе до 300 МГц ввиду больших потерь на гистерезисе и вихревых токах. Пазонный умножитель частоты в зонах МХЧ имеет малые габаритные размеры и вес, технологичен, прост по конструкции, надежен, недорог, прост в настройке и эксплуатации, имеет высокий КПД, устойчив к радиации. По сравнению с существующими умножителями частоты он имеет отношение сигнал-шум на 2-3 порядка выше за счет селективного параметрического усилителя высших гармоник. Регулировочная характеристика линейная в диапазоне изменения входного тока от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  А.

В работе исследован фазочувствительный усилитель постоянного, медленноменяющегося и переменного тока на магнитно-транзисторных элементах для использования в качестве компаратора, который играет важную роль при компенсационном методе измерения электрических величин и показывает наличие разности между опорным и измеряемым напряжениями. Основным требованием, предъявляемым к компаратору, является его чувствительность и избирательность (для переменных сигналов).

Упрощенная схема компаратора (рис. 11) состоит из трех узлов: I – параметрического усилителя-модулятора, II – усилителя переменного тока, III – фазочувствительного детектора с индикатором. Для коммутатора применялись два варианта МПУ. В первом случае за основу взят МПУ, используемый в усилителе следящей системы электронного траектографа при входном переменном сигнале компаратора частотой 400 кГц.

Во втором варианте компаратор выполнен на ферритовых сердечниках 1000НМ с размерами  $4 \times 4 \times 2$  мм, обмотками:  $w_1=15$ ,  $w_0=w_2=20$ ,  $C=0,1$  мкФ,  $R_2=10$  Ом. Регистрирующим прибором индикатора является микроамперметр М24. Спротивлением  $R_6$  можно балансировать показания прибора на ноль. Вторичные обмотки  $Tr_2$  служат для накачки модулятора и опорного напряжения фазового детектора. Компаратор питается от генератора синхронного напряжения, частота возбуждения модулятора 200 кГц или 1 МГц, и источника постоянного питания 10 В для полупроводниковых элементов.

В данной схеме гальванически развязан вход с выходом, при входном токе  $0 \pm 100$  мкА существует линейная зависимость между входными и выходными величинами. Компаратор обладает способностью выдерживать большие перегрузки по входу, в этом случае нарушается линейность, которая для таких приборов несущ-

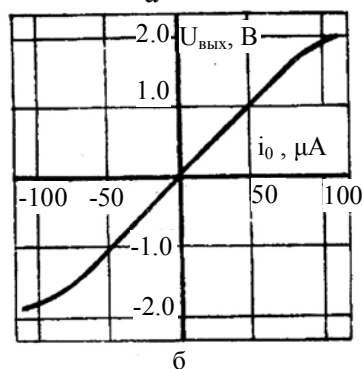
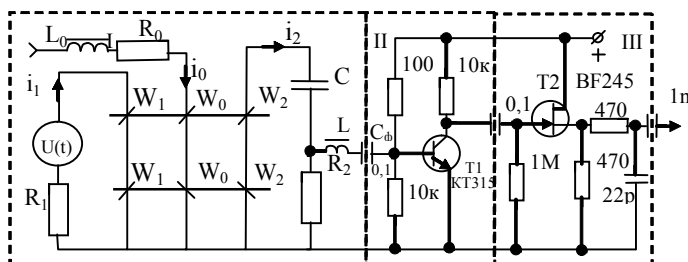


Рис. 9. Принципиальная схема (а) и выходная характеристика (б) усилителя на базе МПУ

щественна. Сопротивление цепи управления индикатора около 100 Ом, чувствительность по мощности  $2 \cdot 10^{-14}$  Вт и может быть повышена за счет подбора колец и других мер. Коэффициент усиления по току  $1 \pm 1,5 \cdot 10^4$ , дрейф нуля компаратора, приведенный ко входу,  $5 \cdot 10^{-6}$  В.

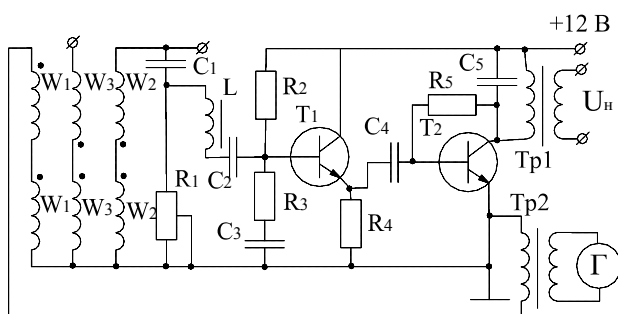


Рис. 10. Пазонный умножитель частоты

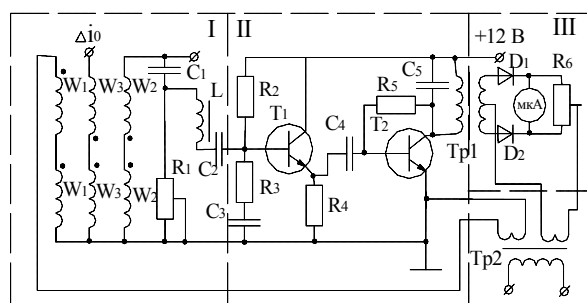


Рис. 11. Принципиальная схема пазонного компаратора

Кроме описанного применения, компаратор может быть использован для сравнения нескольких входных сигналов, преобразования аналог-код, работая в релейном режиме. С этой целью выбирается рабочий режим вблизи одной из граничных частот, например, во второй зоне МХЧ при равенстве сравниваемого и эталонного сигналов. Изменение сравниваемого сигнала переводит МПУ из устойчивой зоны в зону параметрических колебаний. Кроме того, пазонный компаратор можно использовать в качестве нуля-органа и нуля-индикатора с  $n$ -входами.

На основе МПУ разработано устройство (рис. 12) [15] для формирования сигналов с угловой модуляцией. Оно содержит генератор 1 накачки, первый 2 и второй 3 коммутаторы, а в каждом канале — делитель 4 частоты, делитель 5 напряжения, ключ 6 и параметрический преобразователь 7 сигналов.

Устройство работает следующим образом. Контакты коммутаторов 2 и 3 находятся в замкнутом состоянии. Сигнал с генератора 1 накачки одновременно поступает на первые входы делителей частоты 4 и напряжения 5, соединенных через ключи 6 с параметрическими преобразователями 7. На выходе делителя 5 напряжения при помощи управляющих сигналов устанавливаются напряжения, необходимые для возбуждения соответствующих

колебаний в параметрических преобразователях 7, т.е. колебаний в соответствующих зонах неустойчивости. Эти напряжения подаются на входы параметрических преобразователей 7 сигналов только в том случае, если ключи 6 окажутся в замкнутом состоянии. Замкнутое состояние ключей 6 обеспечивается подачей на их первые входы сигнала с делителей 4 частоты канала, а размыкание — сигналом с делителя 4 частоты последующего канала, чем и обеспечивается последовательность работы. Размыкание последнего ключа 6 осуществляется сигналом с делителя 4 частоты первого канала. Таким образом, установкой коэффициента деления делителей 4 частоты можно регулировать длительность колебаний соответствующих параметрических преобразователей 7 и тем самым длительность колебаний с данной частотой в последовательности выходных радиоимпульсов.

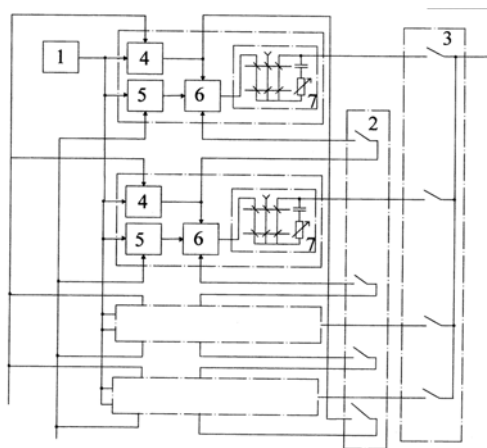


Рис. 12. Функциональная схема устройства для формирования сигналов с угловой модуляцией

Наличие управляющих сигналов позволяет оперативно устанавливать коэффициент деления делителей 5 напряжения, что соответствует заданию длительности соответствующих колебаний, а также коэффициент деления делителей 4 частоты, что соответствует изменению частот серий радиоимпульсов на выходе. При размыкании контактов коммутатора 3 устройство имеет  $N$  выходов.

Каналы созданы на основе параметрического преобразователя 7 сигналов, выполненного на двух магнитных сердечниках с обмотками накачки, соединенными последовательно и согласно, резонансными обмотками, соединенными последовательно и встречно, обмотками управления, соединенными последовательно и встречно. К резонансным обмоткам подключены конденсаторы и переменные резисторы. Выбором величины сопротивления резисторов можно создавать регенеративный режим, что расширяет возможности преобразователя.

Устройство позволяет оперативно программировать изменение колебаний на выходах преобразователей 7 сигналов, т.е. кодировать соответствующую информацию, автоматизировать подключение необходимого числа преобразователей сигналов 7, повышать надежность передачи информации, а также создавать на его основе логические и пороговые элементы вычислительной техники.

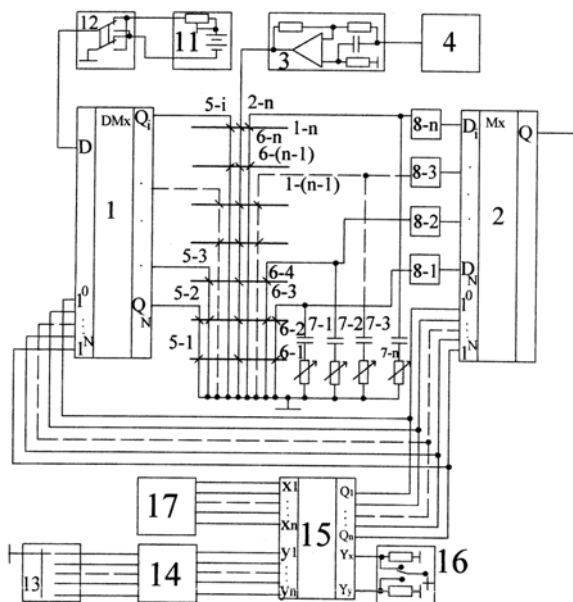


Рис. 13. Функциональная схема частотно-фазового устройства

На рис. 13 представлена функциональная схема разработанного частотно-фазового устройства [16]; на рис. 14 — временные диаграммы его работы. Частотно-фазовое устройство содержит пазонные системы на магнитных сердечниках 1-1, 1-2, ..., 1-n с обмотками 2-1, 2-2, ..., 2-n накачки, соединенными последовательно и согласно и подключенными первым выводом первой обмотки через фазовращатель 3 к генератору 4 накачки, обмотки 5-1, 5-2, ..., 5-i управления, соединенные попарно последовательно и встречно, и резонансные обмотки 6-1, 6-2, ..., 6-i, соединенные попарно последовательно и встречно. Все пары резонансных обмоток шунтированы RC-цепочками 7-1, 7-2, ..., 7-i. Содержит также фильтры 8-1, 8-2, ..., 8-n, мультиплексор 9 и демультиплексор 10, источник 11 смещения с переключателем 12 полярности, переключатель 13 выбора частоты, шифратор 14, управляемый коммутатор 15 с переключателем 16 рода работы и блок 17 автоматического выбора частоты. При этом первые выводы пар обмоток 5-1, 5-2, ..., 5-i управления подключены к соответствующим выходам демультиплексора 10, информационный вход которого подключен через переключатель 12 полярности кисточнику 11 смещения. Адресные входы мультиплексора 9 и демультиплексора 10 соединены между собой и подключены к выходам управляемого коммутатора 15, первые группы адресных входов которых через переключатель 16 рода работы соединены с блоком 17 автоматического выбора частоты, а ко вторым группам адресных входов подключены выходы шифратора 14, входы которого подключены к переключателю 13 выбора частоты. Первые выводы пар резонансных обмоток 6-1, 6-2, ..., 6-n через соответствующие фильтры 8-1, 8-2, ..., 8-n подключены к информационным входам мультиплексора 9, выходы которого являются выходом устройства. Вторые выводы пар обмоток 5-1, 5-2, ..., 5-i управления соединены с вторыми выводами пар резонансных обмоток 6-1, 6-2, ..., 6-n, соединены между собой и подключены ко второму выводу последней обмотки 2-n накачки и общей шине источника питания.

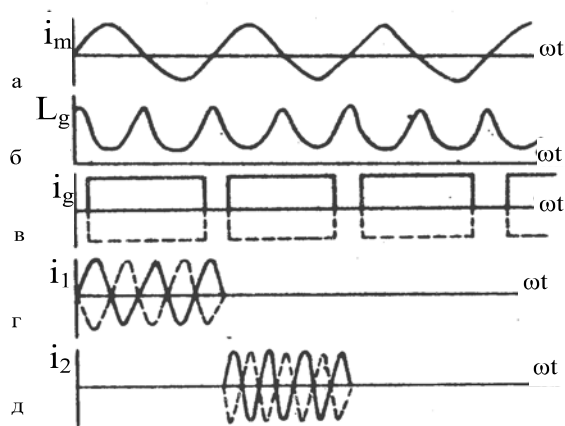


Рис. 14. Временные диаграммы работы частотно-фазового устройства

В предлагаемом решении используются два варианта нанесения (расположения) обмоток на магнитные сердечники. Первый вариант расположения обмоток показан на примере магнитных сердечников 1-1, 1-2, 1-3, второй — на сердечниках 1-(n-1), 1-n. Количество параметрических элементов М и их конструктивное выполнение (первый или второй вариант) определяют диапазоном и ценой дискретности частот, верхней и нижней рабочей частотой магнитных сердечников.

Принцип действия частотно-фазового устройства основан на следующем. При синусоидальном токе накачки  $i_m$  с частотой  $\omega$  (см. рис. 14, а) происходит интегральная модуляция индуктивностей  $L_g$  с удвоенной частотой тока накачки  $2\omega$  (см. рис. 14, б). Переключателем выбора частоты подключают к источнику 11 постоянного смещения соответствующий контур управления, при этом в последнем протекает ток управления  $i_g$  (см. рис. 14, г). Полярность тока управления может быть положительной (сплошные кривые) или отрицательной (пунктирные линии).

Если настроить первый пазонный резонансный контур (первый и второй сердечники) на частоту  $2\omega$ , второй (второй и третий сердечники) на частоту  $4\omega$ , третий ( $i$  и  $i+1$  сердечники) на частоту  $6\omega$ , четвертый ( $N-1$  и  $N$  сердечники) на частоту  $8\omega$ , то, подключая последовательно соответствующие контуры управления этих резонансных контуров, возбуждают в последних пазонные колебания (см. рис. 14, д). При этом положительной полярности тока управления соответствуют пазонные колебания с фазой "0" (рис. 14, д, сплошные кривые), а отрицательной — "180°" (рис. 14, д, пунктирные кривые).

При применении емкостных МПУ частота накачки была 2 ГГц (С-системы). В таблице приведено сравнение быстродействия (оп/с) индуктивных и емкостных пазонных систем на основе МПУ в соответствующих зонах МХЧ.

Зона МХЧ	1-я зона	10-я зона	50-я зона
Л-системы	$25 \cdot 10^4$	$25 \cdot 10^5$	$125 \cdot 10^6$
С-системы	$10^6$	$10^7$	$5 \cdot 10^8$

Рассмотренная выше практическая реализация МПУ в качестве специальных устройств связи, коммуникации и в системах массового обслуживания, когда осуществляется измерение, контроль и управление большим количеством динамических параметров, показывает, что в этом случае целесообразно использовать системы регулирования, работающие как с постоянными сигналами, так и в соответствующих зонах МХЧ, что даёт возможность повысить надежность, взаимозаменяемость устройств и улучшить качество передачи сигнала по линии связи.

*Научная новизна:* на основе законов сохранения выведены нелинейные дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами, позволяющие исследовать спектральные и энергетические характеристики сильно нелинейных устройств; развит метод гармонического баланса для применения при расчете нового класса нелинейных устройств. Разработанные МПУ защищены патентами Украины и России и впервые использованы для создания систем контроля и диагностики сложных объектов.

*Практическая значимость:* созданные на основе МПУ фазочувствительные усилители, компараторы, операционные усилители, сумматор сигналов с четырьмя входными обмотками от четырех МПУ датчиков, гальванически не связанных друг с другом, были использованы в разработанном траектографе для исследования тепловых полей в устройствах РЭС и изучения траектории движения электронов в электронно-лучевых трубках.

В сложных системах автоматики и вычислительной техники, когда осуществляется взаимосвязь большого количества параметров, в основном используются системы контроля и регулирования сигналами постоянного тока, которые обеспечивают малые искажения в линиях связи, унификацию и взаимозаменяемость узлов, высокую надежность. При этом подавляющее большинство систем в своей основе имеет усилитель постоянного тока, стабильные показатели которого можно получить, используя усилитель на основе МПУ.

*Сравнение с аналогами:* применение МПУ открывает большие возможности при создании пазонных усилителей-модуляторов и операционных усилителей. Такие усилители стабильны, долговечны, не требуют регулировки в процессе работы, уменьшают зону нечувствительности, при этом гальванически развязан вход с выходом. Усилитель допускает большие перегрузки по входу по сравнению с аналогичными конструкциями [1, 4, 11, 12] за счет ограничения сигнала нелинейными магнитными элементами. Малая чувствительность к ударным нагрузкам, хорошая температурная и временная характеристика, низкая чувствительность к воздействию радиации, которая на  $10^4$  выше полупроводниковых элементов и сопоставима с уровнями печатных проводников и самой платы [1] - все это открывает широкие возможности при использовании МПУ в технике специального назначения (космическая, атомные электростанции и т.д.).

Разработанную СКД сложных объектов можно применять при исследовании новых приемо-передающих трактов и элементов вычислительной техники, в том числе на основе троичной и n-ричной логики,

использующей явления в зонах МХЧ. Их применение расширяет класс задач контроля, настройки и прогнозирования. Это позволит повысить оперативность и точность при проектировании защищенных кодов, выбор оптимальных решений и т.п.

**Литература:** 1. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т.1. М.: ДМК Пресс, 2001. 544с. 2. Коротков А.М., Лихарев К.К. Логический одноэлектронный параметрон: J. Appl. Phys. 1998, 84. p6114. 3. А.С. СССР № 1760473 Устройство для спектрального анализа Бюл. №33 от 07.09.92. 4. Расчет и проектирование параметрических систем на высших гармониках: Учебное пособие/Чередников П.И., Харьков:ХПИ, 1980. 98с. 5. Разработка логических элементов «И», «ИЛИ», «НЕТ» на параметрических зонных системах / Д. Л. Лысенко, Е. В. Хомяков, П. И. Чередников // АСУ и приборы автоматики. 2001. Вып. 117. С. 70-74. 6. Патент Украины №53517 от 15.01.2003 Бюл. №1. 7. А.с. 1216822 СССР. МКИ Н03 К 3/13. Способ преобразования сигналов / ХИРЭ: П.И. Чередников. Оpubл. 07.03.86. Бюл. №3; 8. А.с. №1529254 (СССР). Устройство для моделирования динамических объектов / ХИРЭ: П.И. Чередников. Оpubл. 15.12.89. Бюл. №46; МКИ 606 G 7/48. 9. Патент №1681322 (СССР). Способ моделирования эволюции материи/ХИРЭ. П.И. Чередников. Оpubл. 30.09.91. Бюл. №36; МКИ Н03 К 3/53. 10. Патент №1776354 (СССР). Способ моделирования эволюции квантовой системы и устройство для его осуществления /ХИРЭ. П.И. Чередников. Оpubл. 15.11.92. Бюл. №42; МКИ G09 В 23/06. 11. Руденко В.М. и др. Малошумящие входные цепи СВЧ устройств. М.: Связь, 1971. 12. Головки Ю.Л., Каминский В.В., Макашин В.В. Параметрические усилители биоэлектрических сигналов. М.: Энергия, 1971. 13. Чередников П.И. Анализ закономерностей параметрического зонного взаимодействия в колебательных системах. Радиотехника. 2001. Вып 121. 14. Бондаренко М.Ф., Чередников П.И. Пазонный компьютер для обучения, научных исследований и моделирования технологических процессов / 1-й Международный радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ – 2002. Сборник научных трудов. Часть 2. Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ. 2002. 656 с. 15. А.с. № 1584115 МКИ Н04L 27/12, 27/20 Устройство для формирования сигналов с угловой модуляцией / ХИРЭ: А.Д. Меньяло и др. Оpubл. 07.08.90г. Бюл. №29 16. А.с. № 1492457 МКИ Н03К 5/01, 3/53 Частотно-фазовое устройство / ХИРЭ: П.И. Чередников и др. Оpubл. 07.07.89г. Бюл. №25

Поступила в редколлегия 12.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Петров Э.Г.

**Бондаренко Михаил Федорович**, д-р техн. наук, профессор, ректор ХНУРЭ. Научные интересы: информационные технологии. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул.Бакулина, 9/13, кв. 26.

**Чередников Павел Ильич**, канд. техн. наук, доцент кафедры ПЭЭА ХНУРЭ. Научные интересы: теория и практика параметрических зонных взаимодействий. Адрес: Украина, 61170, Харьков, ул. Тимуровцев, 17а, кв. 96, тел. 7-021-494.

**Меньяло Александр Дмитриевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры ПЭЭА ХНУРЭ. Научные интересы: теоретические и экспериментальные исследования ЭА. Адрес: Украина, 61170, Харьков, ул Гв. Широнинцев, 51, кв. 63, тел. 7-021-494.

**Хомяков Евгений Викторович**, аспирант каф. ПЭЭА ХНУРЭ. Научные интересы: спектральный анализ параметрических зонных взаимодействий. Адрес: Украина, 61009, Харьков, ул. Петра Алексева, 15, тел. 50-02-12.

**Абдерразик Мохамед**, аспирант кафедры ПЭЭА ХНУРЭ. Научные интересы: пазонное моделирование элементов и устройств РЭС. Адрес: Украина, 61045, Харьков, ул. Ключковская, 218.