

Раздел III. Радиоэлектронные приборы и устройства

УДК 621.316.726.078

Ю.А. Гелозе, П.П. Клименко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЦИФРОВОМ СИНТЕЗАТОРЕ ЧАСТОТЫ С ФАЗОВЫМ КОНТУРОМ СТАБИЛИЗАЦИИ

В микроминиатюрных синтезаторах частоты с цифровым контуром фазовой стабилизации частоты уровень негармонических компонент зависит от пульсаций импульсно-фазового дискриминатора.

Уменьшение этих пульсаций осуществляется с помощью внутреннего фильтра нижних частот, сглаживающего пульсации до необходимого уровня в фазовом контуре стабилизации.

Проведены исследования исходной нелинейной системы с пилообразной дискриминационной характеристикой и усовершенствованной системы, в которой управление процессами в критических режимах осуществляется в соответствии с разработанным принципом управления. При этом статистически устойчивые системы в результате управления процессами в них становятся устойчивыми в целом для нормированных задающих воздействий, в том числе и близких к единице.

Представлены результаты исследования импульсных систем ФАПЧ, использующихся для построения цифровых синтезаторов частоты (ЦСЧ). Рассматриваемые фазовые системы обеспечивают быстрое восстановление режимов слежения и стабилизации в условиях воздействия медленно изменяющихся факторов среды и неполадок в цепях питания, программирования, и других больших воздействиях импульсного типа.

Фазовая автоподстройка частоты; цифровые синтезаторы частоты; импульсный фазовый дискриминатор.

Y.A. Gelozhe, P.P. Klimenko

RESEARCH OF PROCESSES IN DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PHASE CONTOUR STABILIZATION

In small-sized digital frequency synthesizers constructed on the basis of a frequency stabilization phase contour (FSPC) with digital, frequency dividers the level of non-harmonic components largely depends on control voltage pulsation of the pulse-phase discriminator (PPD).

To reduce the influence of these pulses on the quality of a signal the inertial filters of the low frequencies (FLF) smoothing the pulses up to the necessary level are included into the contour FSPC.

Introduction of inertial FLF in the contour (FSPC) results in the reduction of locking range, i.e. the area of frequencies, in which the lock is determined process (lock which probability is equal to unit). At the same time there is a frequency area enclosed between the limits of the locking range and the holding range, for which the contour of stabilization is statistically steady. It means, that for any frequency from this area after switching frequencies and after intensive short-term influences in the contour of stabilization with certain probability an equilibrium condition is established, hence, programmed signal is formed, or beating mode is established, when the synthesis of a quazimonochrome signal becomes impossible.

The problem is to develop the strategy of transient control that ensures leading of the system in an equilibrium from the initial free conditions, the solution of non-linear differential equation of FSPC base system being available.

Frequency synthesizers; stabilization phase contour; pulse-phase discriminator.

Разработка и исследование систем стабилизации, эффективно функционирующих в неблагоприятных условиях, является актуальной задачей.

Главной целью исследований нелинейных систем является экспериментальное подтверждение того факта, что статистически устойчивые системы в результате управления процессами в них в соответствии с принципом управления [1] становятся устойчивыми в целом для нормированных задающих воздействий, в том числе и близких к единице.

Дополнительной целью является исследование устойчивости усовершенствованных нелинейных систем [2, 3] в случае, когда создаются особые начальные условия, например, когда знаки мгновенной и начальной расстроек по частоте разные.

Для проведения исследований исходной нелинейной системы с пилообразной дискриминационной характеристикой и усовершенствованной системой, в которой управление процессами в критических режимах осуществляется в соответствии с принципом управления [1], разработан моделирующий стенд, структурная схема которого показана на рис. 1.

В качестве объекта исследований используется электронная модель автоматической системы, представляющая собой систему ФАПЧ с пилообразной характеристикой фазового дискриминатора. Соответствующие устройства обеспечивают формирование нормированных задающих воздействий в пределах, близких к ± 1 , и изменение мгновенных начальных расстроек по частоте в пределах, превышающих полосу удержания, при этом начальные условия по фазе случайны с равномерным законом распределения в пределах от нуля до 2π . Параметры электронной модели могут быть изменены так, что коэффициент демпфирования системы может изменяться в широких пределах, например от 10 до 0,02. Кроме того, за счет введения в контур ФАПЧ дополнительных инерционных звеньев можно изменять порядок дифференциального уравнения системы.

С помощью коммутирующего устройства в контур ФАПЧ могут быть введены следующие дополнительные устройства, обеспечивающие реализацию принципа управления и выполненные в соответствии с техническими решениями [1–3]:

- ◆ устройство определения признаков кризисного развития процессов;
- ◆ устройство определения признаков выхода из критической фазы процессов в системе;
- ◆ устройство формирования закона управления процессами в системе, реализующее принцип управления.



Рис. 1. Структурная схема моделирующего стенда

Для многократного испытания системы имеется устройство принудительного прерывания процессов в системе.

Для наблюдения фазового портрета системы использовано устройство съема информации о процессах в системе.

В общем можно отметить, что приведенная структурная схема моделирующего стенда обеспечивает исследование устойчивости систем при больших отклонениях от состояния покоя.

Выполним экспериментальные исследования основного контура управления для задающих воздействий, при которых обеспечивается устойчивость в целом.

Эти исследования вспомогательные и приведены для того, чтобы показать, как протекают процессы установления состояния покоя в основном контуре рассматриваемых автоматических систем с пилообразной нелинейностью, т.е. когда не применяется дополнительное управление в соответствии с принципом управления [1].

Первый эксперимент состоял в том, что для системы, имеющей большой коэффициент демпфирования $d > 1$, задавались три значения нормированных начальных расстройек по частоте 0; 0,75. Переходный процесс в таких системах апериодический, а особая точка (точка равновесного состояния) представляет собой «устойчивый узел». Согласно теоретическим исследованиям, системы с таким коэффициентом демпфирования устойчивы в целом для нормированных задающих воздействий, в том числе и близких к единице.

Эксперимент проводился при дополнительно введенной мгновенной расстройке по частоте. Причем знак этой расстройки совпадал со знаком начальной расстройки. Это позволяло для больших начальных расстроек дополнительно повышать величину мгновенной расстройки.

Нормированное (по полосе удержания) значение мгновенной расстройки составляло 1,7. Учитывая вышесказанное, нормированное отклонение от состояния покоя по производной от разности фаз для нормированных начальных расстроек 0; 0,75 составило 1,7; 2,45 соответственно.

Экспериментальные исследования показали, что для вышеупомянутых нормированных начальных расстроек система устойчива в большом.

Фотографии фазовых портретов процессов в системе для двух нормированных начальных расстроек 0 и 0,75 показаны на рис. 2 и 3.

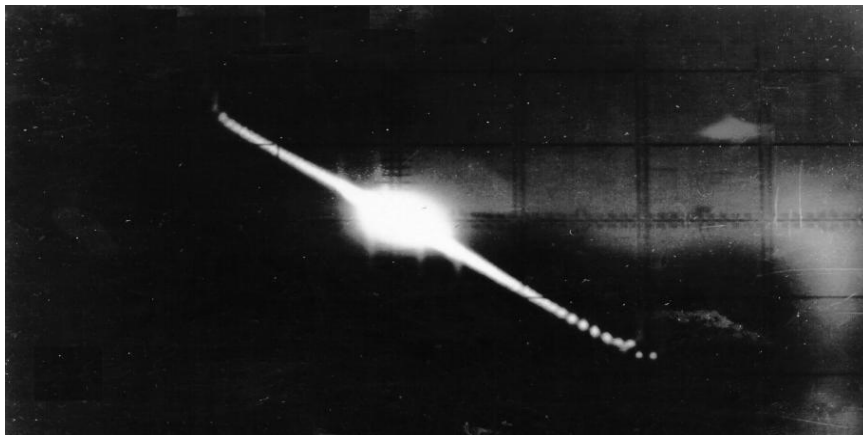


Рис. 2. Фазовый портрет процессов в системе с апериодическим переходным процессом для $\gamma_H = 0$

На фотографиях видны следы фазовых траекторий, ориентированных практически вертикально. Их начальные точки случайны по фазе. По этим траекториям изображающие точки приходят из удаленных областей фазового портрета к финишной наклонной прямой линии. На этой линии лежит особая точка (яркая точка с ореолом), которой соответствует состояние покоя системы.



Рис. 3. Фазовый портрет процессов в системе с аperiodическим переходным процессом для $\gamma_H = 0,75$

Второй эксперимент состоял в том, что для системы, имеющей коэффициент демпфирования $d \approx 0,4$, задавались два значения нормированной начальной расстройки 0 и 0,5. При таком значении коэффициента демпфирования переходный процесс носит колебательный быстро затухающий характер. Особая точка на фазовой плоскости представляет собой «устойчивый фокус». Движение изображающей точки в точку покоя совершается по быстро сворачивающейся логарифмической спирали. Фотографии фазовых портретов для двух упомянутых начальных расстроек приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

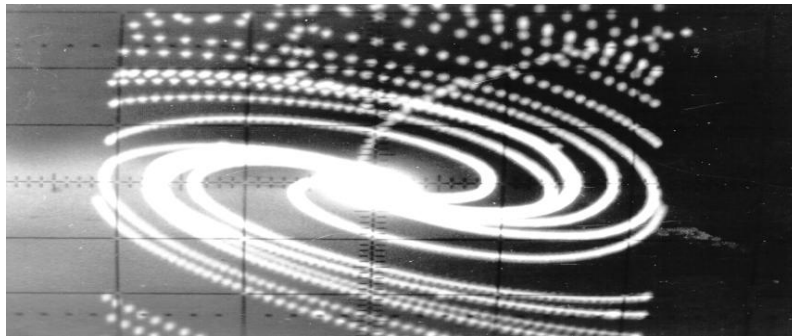


Рис. 4. Фазовый портрет процессов в системе с аperiodическим переходным процессом для $\gamma_H = 0$

На фотографиях видно множество фазовых траекторий, реализованных при случайных начальных условиях по фазе, по которым изображающие точки совершают переход из удаленных областей (верхней и нижней полуплоскости) фазового портрета в точку покоя. Сначала эти траектории состоят из отрезков логарифмических спиралей, начала и концы которых имеют абсциссы $-\pi$ и $+\pi$, а затем формируется финишная логарифмическая спираль, приводящая изображающую точку в точку покоя. Поскольку из верхней и нижней удаленной областей все траектории приходят в точку покоя, система с рассмотренными параметрами и нормированными начальными расстройками, не превышающими 0,5, устойчива.

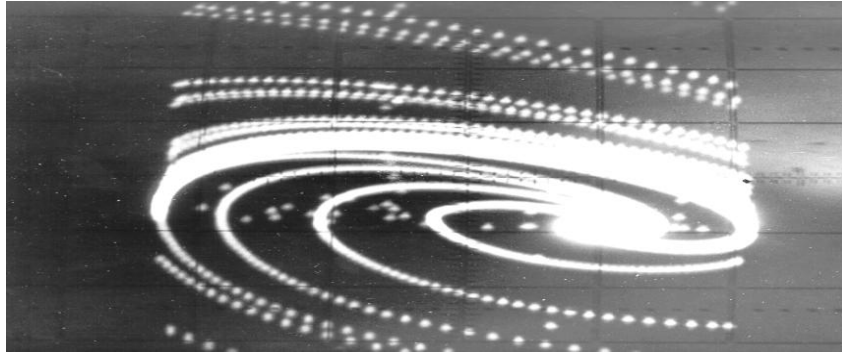


Рис. 5. Фазовый портрет процессов в системе с колебательным затухающим переходным процессом для $\gamma_H=0,5$

Третий эксперимент состоял в том, что для системы стабилизации, имеющей очень низкий коэффициент демпфирования $d \approx 0,03$, задавалось всего одно значение нормированной начальной расстройки, приблизительно равное нулю. При таком низком коэффициенте демпфирования переходный процесс носит колебательный, слабо затухающий характер. Особая точка на фазовой плоскости представляет собой, как и во втором эксперименте, «устойчивый фокус». Движение изображающей точки в точку покоя совершается по медленно свертывающимся логарифмическим спиральям. Фотография фазового портрета для начальной расстройки, близкой к нулю, приведена на рис. 6.

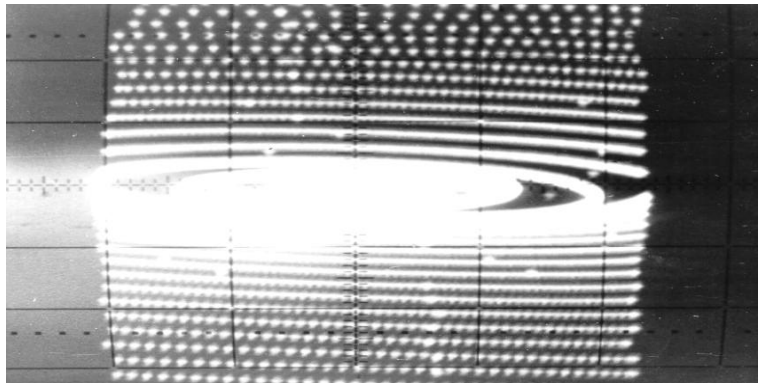


Рис. 6. Фазовый портрет процессов в системе близкой к консервативной, для $\gamma_H = 0$

На фото видны траектории, по которым изображающие точки их удаленных областей сверху и снизу совершают переход к точке покоя в центре. Первоначально движение ведется по отрезкам логарифмических спиралей, а затем – по медленно сворачивающимся спиральям, приводящим изображающую точку в состояние покоя. Поскольку из удаленных областей траектории идут к точке покоя, система с рассмотренным коэффициентом демпфирования устойчива в большом для задающих воздействий, близких к нулю. Попытки добиться установления состояния покоя при начальной расстройке, близкой к 0,1, не имели успеха.

Результаты выполненных исследований, представленных на рис. 2–6, позволяют отметить следующее. При больших коэффициентах демпфирования, превышающих 1, когда корни характеристического многочлена действительные отрица-

тельные и, следовательно, переходный процесс аperiodический, система устойчива в большом для эксперимента выбранных задающих воздействий. При малых коэффициентах демпфирования, когда корни характеристического многочлена комплексные сопряженные с отрицательными действительными частями и, следовательно, переходный процесс колебательный затухающий, система устойчива в большом только для некоторой части задающих воздействий.

Выполним экспериментальные исследования основного контура управления для больших задающих воздействий, при которых проявляется статистическая устойчивость состояния равновесия. Эти исследования проведены для того, чтобы экспериментально подтвердить факт статистической устойчивости, т.е. что при некоторых больших нормированных начальных расстройках (задающих воздействиях) система возвращается в равновесное состояние, но не в каждом отдельно взятом эксперименте, а лишь в некоторых из большого числа независимых экспериментов. Как выше отмечалось, устойчивость такого рода может быть охарактеризована статистической вероятностью возвращения системы в заданное состояние.

Первый эксперимент состоял в том, что для исследованной выше системы с коэффициентом демпфирования $d \approx 0,4$, для которой экспериментально было доказано, что при нормированной начальной расстройке, не превышающей $0,5$, она устойчива в большом, теперь задается большое значение этой расстройки, которое приблизительно равно $0,75$. Фотография фазового портрета процессов в системе для этого случая показана на рис. 7.

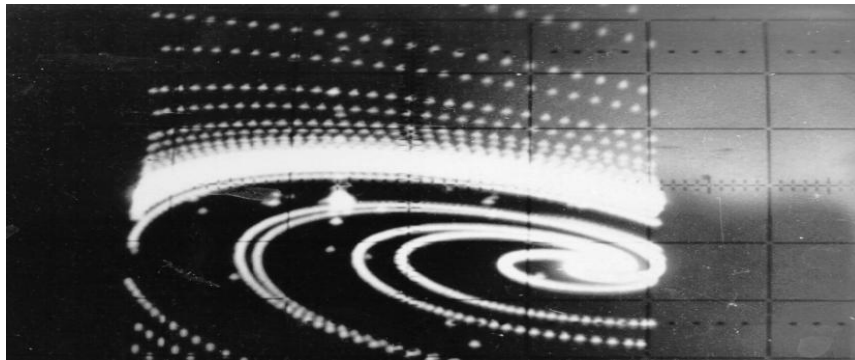


Рис. 7. Фазовый портрет процессов в статистически устойчивой системе, для $\gamma_H = 0,75$

На фотографии видно, что к особой точке типа «устойчивый фокус» ведут только некоторые фазовые траектории из нижней удаленной области. Другие траектории из этой же области и из верхней удаленной области притягиваются к предельному циклу, расположенному выше особой точки и имеющему саблевидную форму и повышенную яркость. Напомним, что случайным в этом эксперименте было начальное рассогласование по фазе. Таким образом, система второго порядка с колебательным переходным процессом, в которой устойчивость в большом состоянии равновесия обеспечивается при некоторых малых величинах задающих воздействий, при больших их величинах становится статистически устойчивой.

Второй эксперимент состоял в том, что для систем четвертого и шестого порядков с колебательными переходными процессами установились нормированные начальные расстройки $0,6$ и $0,45$ соответственно. Фотографии фазовых портретов процессов в системе четвертого порядка показаны на рис. 8. и шестого – на рис. 9. Как видно из этих фотографий, для вышеупомянутых начальных расстроек, иссле-

дованным системам свойственна статистическая устойчивость, поскольку одни фазовые расстройки из удаленных областей идут к предельному циклу, а другие в точку, соответствующую состоянию покоя.

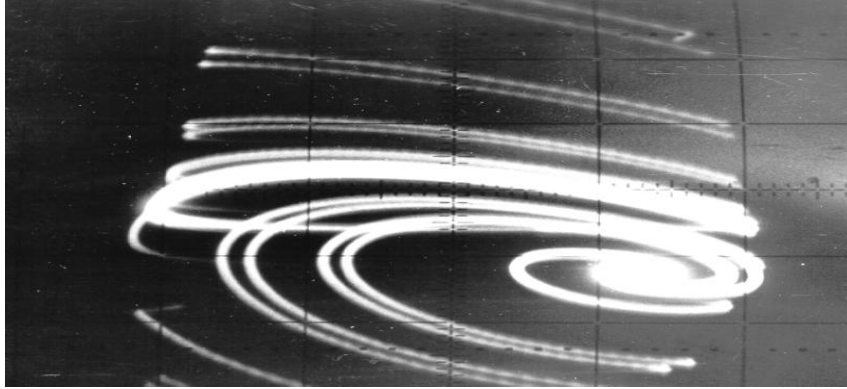


Рис. 8. Фазовый портрет процессов в статистически устойчивой системе (диф. уравнение 4-го порядка) для $\gamma_H = 0,6$

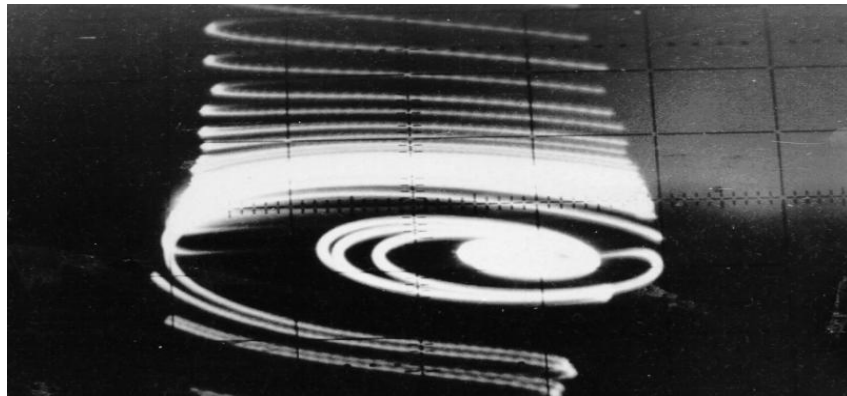


Рис. 9. Фазовый портрет процессов в статистически устойчивой системе (диф. уравнение 6-го порядка) для $\gamma_H = 0,4$

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что, если рассматриваемая нелинейная система с колебательным переходным процессом для некоторой (не равной нулю) величины задающего воздействия, и для больших, но ограниченных по величине, начальных отклонений от состояния покоя, устойчива в большом, то при прочих равных условиях, увеличение задающего воздействия может приводить к тому, что системе станет свойственна статистическая устойчивость.

В системах ФАПЧ ЦСЧ с цифровыми делителями частоты в цепях формирования опорного сигнала (ФДЧ) и обратной связи (ДПКД) быстродействие выведения из критического режима может быть дополнительно повышено за счет многокомпонентного управления, состоящего в том, что кроме управления частотой автогенератора, производится управляемая синхронизация работы одного делителя частоты импульсным сигналом другого. При этом используется свойство цифровых элементов практически мгновенно изменять свое состояние, что обеспечивает формирование особых фазовых траекторий, устремляющих изображающие точки

в область притяжения точечного аттрактора без совершения набега фаз. В результате время движения системы из удаленных областей пространства состояний к точечному аттрактору складывается из интервала времени, на котором в релейном режиме быстро устраняется ошибка по частоте, и интервала времени, на котором с заданной точностью в линейном режиме формируется стационарный сдвиг фаз. В результате общее время восстановления требуемого состояния системы оказывается близким к времени переходного процесса, свойственно локальному режиму. Реализация многокомпонентного управления осуществлена в [3]. Укрупненная структурная схема ЦСЧ [3] приведена на рис. 10, где кроме известных элементов ФАПЧ показано УУ – устройство управления, обеспечивающее не только управление работой импульсно-фазового дискриминатора, но и взаимной синхронизацией делителей частоты.

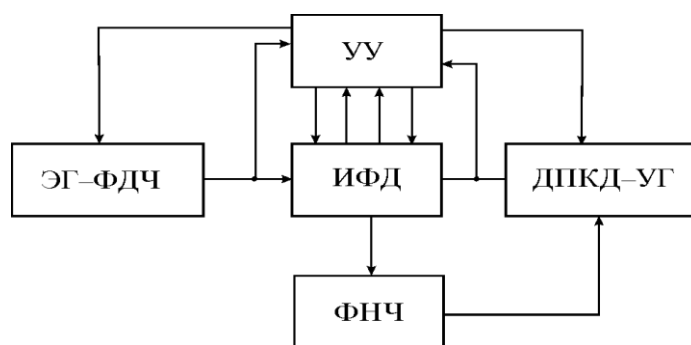


Рис. 10. Укрупненная структурная схема ЦСЧ

Испытание ЦСЧ [3] с многокомпонентным управлением проведены для нормированной начальной расстройки, равной 0,98 от полосы удержания и мгновенной расстройки по частоте в 2,7 раза превосходящей полосы удержания. Фазовый портрет процессов для этого случая показан на рис. 11.

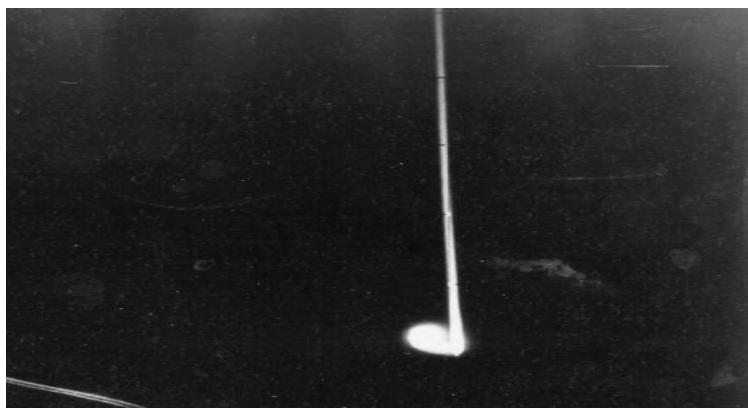


Рис. 11. Фазовый портрет процессов в ЦСЧ с многокомпонентным управлением

Как видно из рис. 11, ИТ по вертикальной траектории совершает движение к области притяжения точечного аттрактора и затем – в состояние покоя.

Применение предлагаемых технических решений обеспечивает надежную работу систем в расширенном диапазоне температур при условии возможных прерываний процессов, вызванных аномальными факторами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гелозе Ю.А., Клименко П.П. Управления процессами в фазовых автоматических системах формирования и обработки радиосигналов // Телекоммуникации. – 2000. – № 5. – С. 10-15.
2. А.с.484617 (СССР) Устройство ИФАПЧ / Гелозе Ю.А. 1975. Бюл. №34.
3. А.с.987818 (СССР) Синтезатор частот / Гелозе Ю.А. 1977. Бюл. №1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Гелозе Юрий Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: rts@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Клименко Павел Петрович – кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Gelozhe Yuriy Andreevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: rts@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

УДК 004.942

А.В. Демьяненко

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рассмотрено воздействие оптического луча постоянной интенсивности на основные параметры генератора. Анализ режимов работы генератора на лавинно-пролетном диоде, находящимся под оптическим воздействием, удобно провести методом медленно меняющихся амплитуд. Из проведенного анализа влияния интенсивности оптического воздействия на амплитуду колебаний генератора можно сделать вывод, что оптическое воздействие является эффективным инструментом управления амплитудой колебаний генератора. Получены теоретические и экспериментальные результаты, которые говорят о том, что при увеличении интенсивности оптического воздействия мощность генератора уменьшается, однако если сопротивление нагрузки генератора меньше оптимального сопротивления, то оптическое воздействие на ЛПД позволяет улучшить согласование диода с нагрузкой, что приводит к увеличению выходной мощности. Экспериментальные результаты подтверждают выводы, сделанные в теоретической части настоящей работы: при сопротивлении нагрузки больше оптимального значения с увеличением интенсивности оптического воздействия мощность колебаний генератора уменьшается. Относительное изменение частоты колебаний генератора при оптическом воздействии на него существенно меньше относительного изменения выходной мощности генератора.

Генератор; лавинно-пролетный диод; оптическое излучение.

A.V. Demjanenko

**THE ANALYSIS OF GENERATOR OPERATION ON AVALANCHE DIODE
UNDER THE INFLUENCE OF OPTICAL RADIATION**

In this paper we examine the impact of an optical beam of constant intensity on the basic parameters of the generator. The analysis of modes of generator operation to the avalanche diode, being under the influence of optical, convenient to carry out the method of slowly varying ampli-