

## Раздел IV. Инфокоммуникационные технологии

УДК 621.396.662

Ю.А. Гелозе, П.П. Клименко, А.В. Максимов

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМАХ

*В современной радиотехнике для формирования и обработки сигналов широко используются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Диапазонно-кварцевая стабилизация частоты осуществляется цифровыми синтезаторами частоты (ЦСЧ), построенными на основе ФАПЧ с программируемыми делителями частот, на основе этих систем с цифровыми счетчиками, обеспечивающими высокую точность в формировании необходимых сдвигов фаз, строят устройства восстановления несущей (УВН) для осуществления когерентной обработки сигналов и высокоэффективные устройства тактовой синхронизации (УТС) демодуляторов. При этом широко используется развертывающее уравнивание, приводящее к формированию пилообразной статической характеристики импульсно-фазового дискриминатора (ИФД). Кроме того, общим для ФАПЧ в упомянутых устройствах является сравнительно большая постоянная времени системы и большая инерционность ФНЧ. При этом полоса захвата контура ФАПЧ становится значительно меньше полосы удержания. Поэтому в случае больших непредвиденных изменений температуры окружающей среды ухудшается частота управляемого автогенератора могут быть такими, что значительно повысится вероятность выхода начальной расстройки по частоте за пределы полосы захвата. Если при этом на систему воздействует кратковременное большое возмущение, например «бросок» питающего напряжения или сбоя в программировании и др., то восстановление режима синхронизма станет случайным событием. Вторым исходом этого критического режима будет случайное вхождение системы в устойчивый режим биений. Выведение системы из этого режима является первоочередной задачей.*

*Фазовая автоподстройка частоты; цифровой синтезатор частоты; полоса захвата; полоса удержания; критический режим; импульсно-фазовый детектор.*

Yu.A. Gelozhe, P.P. Klimenko, A.V. Maximov

### FUNCTIONING OF PHASE - LOCKED LOOP ELEMENTS IN NONLINEAR REGIMES

*A phase-locked loop is widely used in modern radio technology for generating and processing signals. Range-crystal controlled frequency is digital frequency synthesizer built on the basis of the phase-locked loop with programmable frequency divider. On the basis of these systems with digital counters, provides high accuracy in the formation of the required phase shifts are building the device carrier recovery for coherent signal processing and high-performance device clock demodulators. In this widely used deploys trim, leading to the formation of the static characteristic sawtooth pulse-phase discriminator. Furthermore, common for phase-locked loop systems in these devices is relatively great time constant and a large inertia of the low pass filter. Wherein the locking band phase locked loop becomes much less retention strip. Therefore, in the case of large unforeseen changes in ambient temperature deviations of the frequency of the oscillator can be managed such that significantly improve the probability of initial frequency detuning outside the swath. If at the same time on the system affects short-term great disturbance, such as "jump" of the supply voltage or failure in the programming, the recovery mode matching will be a random event. Another outcome of this critical mode will be random entry system in a steady beat regime. Derivation of this mode is a priority.*

*The phase-locked loop digital synthesizer frequency locking band; strip retention critical mode; pulse-phase detector.*

**Анализ процессов в нелинейном режиме.** Согласно современной физической теории управления [6, 7] упорядочение процессов в нелинейной системе с возможной неравновесной ситуацией может быть осуществлено путем введения в систему дополнительной энергии когерентно и согласованно с ее внутренними процессами. В результате возможно формирование самоорганизующейся нелинейной диссипативной структуры, устойчивой в целом.

На основе этого подхода в [8] (см. также [9]) синтезировано управление процессами и структурные схемы ФАПЧ, обладающие свойством устойчивости состояний равновесия в целом для всех начальных расстройек, в т.ч. и сколь угодно близких к полосе удержания [10, 11].

Организация систем [10, 11] такова, что они в некоторой мере подходят под определение системы, данное выдающимся физиологом П.К.Анохиным [12].

*«Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношение приобретают характер **взаимосодействия** компонентов на получение фиксированного полезного результата».*

В [6] фундаментальное свойство взаимосодействия выделено как необходимое для самоорганизации динамических систем.

Руководящим правилом для самоорганизации процессов в системах [10, 11] является принцип управления, который можно сформулировать следующим образом. Если сдвиг фаз в системе достигает значения, при котором пилообразная статическая характеристика ИФД терпит разрыв, то автономное движение системы прерывается и вводится дополнительное управляющее воздействие, стремящееся изменить знак мгновенной расстройки по частоте на противоположный; выключение дополнительного управления и возвращение системы к автономному движению производится в момент времени, когда знак мгновенной расстройки по частоте изменится на противоположный и сдвиг фаз в системе достигнет значения, соответствующего точке разрыва характеристики ИФД.

Изображение фазового портрета систем [10, 11] для начальных расстройек, близких к полосе удержания (нормированных начальных расстройек  $\gamma_n$  [4], близких к единице) имеет вид, приведенный на рис.1.

На рис. 1  $\Omega_z$  – инвариантное многообразие [6, 7];  $O_1$  – точечный аттрактор; АВ – область притяжения точечного аттрактора  $O_1$ ; абсцисса точки разрыва дискриминационной характеристики равна  $\pi$ . Пунктирными линиями показаны фазовые траектории автономного движения системы, а сплошными – траектории при реализации принципа управления.

Из рис. 1 видно, что финишные фазовые траектории могут начинаться только в области АВ.

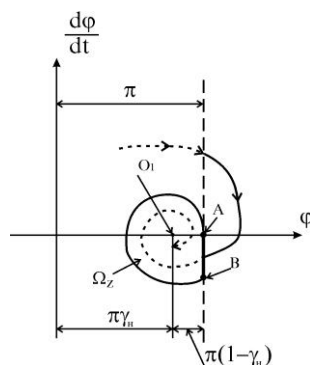


Рис. 1. Изображение фазового портрета систем [10, 11] для начальных расстройек, близких к полосе удержания

Энергетические соотношения в системах [11, 12] следующие. Максимальная кинетическая энергия в начале финишного этапа работы системы пропорциональна квадрату ординаты точки В, а потенциальная разности абсцисс точки разрыва пилообразной характеристики ИФД и аттрактора  $O_1$ , т.е. пропорциональна  $\pi(1-\gamma_H)$ . Таким образом, чем больше начальная расстройка, тем меньше ордината точки В и величина  $\pi(1-\gamma_H)$ , т.е. меньше кинетической и потенциальной энергии должно рассеиваться в линейном режиме работы. Это означает, что взаимодействие элементов системы выполнено так, что большая часть энергии рассеивается при реализации принципа управления, если начальная расстройка большая, что необходимо. При уменьшении коэффициента демпфирования системы уменьшается расстояние между точками А и Б. Следовательно, при ухудшении диссипативных свойств контура ФАПЧ самосогласованность процессор в системах [10, 11] обеспечивает еще больше рассеивание энергии при реализации принципа управления. При этом, если  $\gamma_H \rightarrow 1$ , то остаточная (кинетическая и потенциальная) энергия будет стремиться к нулю  $W \rightarrow 0$ .

Кроме того, важнейшим свойством диссипативной структуры (см. рис. 1) является то, что в результате реализации принципа управления происходит трансформация задающих воздействий: при задающем воздействии  $\gamma_H$  в системе реализуется «задание»  $(1-\gamma_H)$  (см. рис. 1).

Таким образом, в контуре системы ФАПЧ [10, 11] взаимодействие элементов приобретает характер взаимодействия.

Рассмотрим случай, когда кратковременные возмущения имеют такую высокую интенсивность, что их последствиями будут большие отклонения начальных точек от состояния равновесия. Фазовый портрет системы в этом случае будет иметь вид, приведенный на рис. 2, на котором сплошными линиями показаны фазовые траектории, соответствующие движению при реализации принципа управления, а пунктирными – в автономной системе.

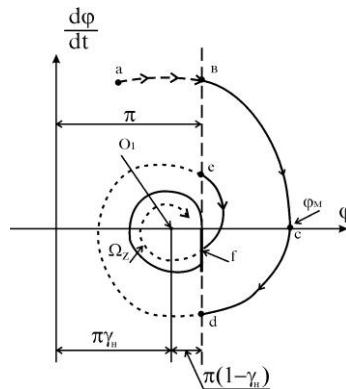


Рис. 2. Фазовый портрет системы в случае кратковременных возмущений, имеющих высокую интенсивность

Анализ рис. 2 показывает, что при движении изображающей точки из удаленных областей фазового пространства может потребоваться многократное управление в соответствии с принципом управления (на рисунке показано двукратное управление). Кроме того, возможны большие отклонения разности фаз  $\phi_M$  от абсциссы точки разрыва характеристики ИФД, равной  $\pi$ , что приводит к увеличению кинетической энергии в точке d. Это будет приводить к затягиванию вре-

мени пребывания системы в критическом режиме, поскольку для достижения равновесного состояния необходимо рассеять всю энергию, внесенную в систему большим кратковременным возмущением.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что недостаточно (в случае очень больших возмущений) организации взаимодействия элементов только контура ФАПЧ, даже если она столь совершенна, что взаимодействие элементов (известных и вновь введенных) приобретает характер взаимосодействия (реализация одного этапа управления формирует для следующего более благоприятные начальные условия (см. рис. 2)).

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является такое усовершенствование системы ФАПЧ (с цифровыми делителями частоты в обратной связи и в цепи формирования опорного сигнала [1, 2, 10, 11]), чтобы взаимодействие элементов не только ее контура, но и канала формирования опорного сигнала, приобрело характер взаимосодействия.

При этом может быть осуществлено большее рассеивание энергии (запасенной в результате воздействия большого кратковременного возмущения) в процессе реализации принципа управления, что при прочих равных условиях обеспечит достижение главной цели – уменьшить затраты времени на восстановление заданного состояния системы.

Эффективным средством достижения этой цели в ФАПЧ, представляющей собой грубую динамическую систему [13], является не изменение ее параметров, приводящих лишь к «смещению» фазовых траекторий [13], а введение еще одного дополнительного управления.

**Формирование дополнительных управлений.** Основная идея решения этой задачи состоит в том, чтобы в процессе реализации принципа управления производить еще некоторое управление, которое бы обеспечивало совпадение знака мгновенной расстройки по частоте  $sign\left[\frac{d\varphi}{dt}\right] = sign[\Omega_{ог}(t) - \Omega_{вт}(t)]$ , где  $\Omega_{ог}(t)$  и  $\Omega_{вт}(t)$  – текущие значения частот опорного и управляемого автогенераторов, приведенных ко входам ИФД, и знака приращения разности фаз  $\sin g(\Delta\varphi) = \sin g[\varphi(t) - \pi]$ .

Если такие управляющие действия осуществить, то фазовая траектория реализации принципа управления может иметь, например, вид, показанный на рис. 3.

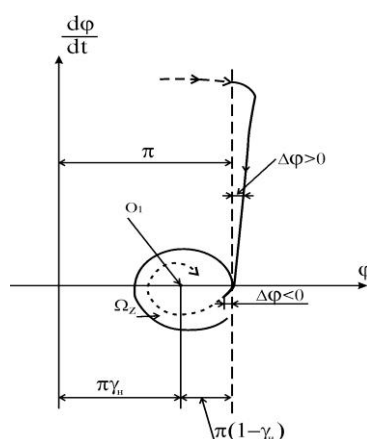


Рис. 3. Фазовая траектория реализации принципа управления

Из рис. 3 видно, что изображающая точка вводится в область  $\Omega_z$  при малых значениях  $\frac{d\varphi}{dt}$ , т.е. при этом обеспечивается малая кинетическая энергия в момент времени возвращения системы в линейный режим работы. Это обеспечит уменьшение рассеивания остаточной энергии в основном режиме работы системы. Кроме того, за счет исключения отрезка траектории с-d (см. рис. 2) уменьшается время пребывания системы в критическом режиме.

Технически задача согласования знаков мгновенной расстройки по частоте  $\text{sign}\left[\frac{d\varphi}{dt}\right]$  и приращения разности фаз  $\text{sign}[\Delta\varphi]$  может быть решена на основе избранных [14, 15]. При этом используется свойство цифровых делителей частоты возвращаться практически мгновенно в исходное состояние при действии на вход «сброс» счетчика короткого импульса. На рис. 4,а,б приведена иллюстрация формирования разности фаз при осуществлении операции сброса («управляющего действия») в исходное состояние одного из делителей частоты выходным сигналом другого делителя. При этом сброс осуществляется выходным импульсом того делителя частоты, выходной сигнал которого имеет меньшую частоту. Знаком «+» помечены моменты времени осуществления сброса. Рис. 4,а иллюстрирует процесс при  $\frac{d\varphi}{dt} > 0$ , а рис. 4,б – при  $\frac{d\varphi}{dt} < 0$ .

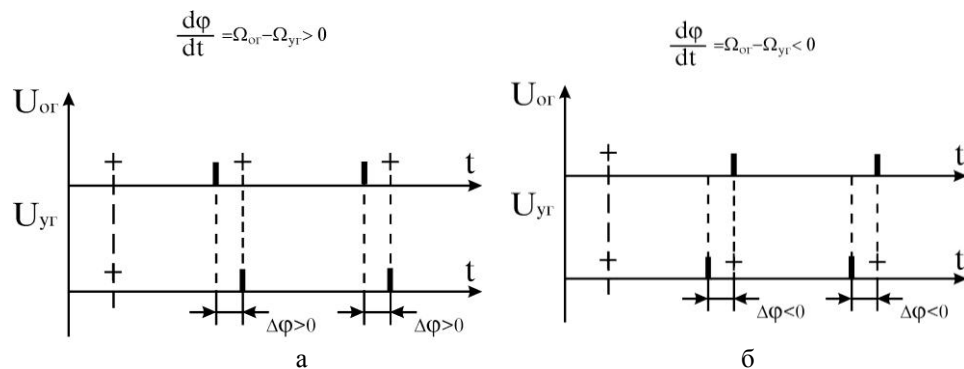


Рис. 4. Иллюстрация формирования разности фаз при осуществлении операции сброса

Из рис. 4,а,б видно, что при выполнении дополнительных управляющих действий для  $\Omega_{ог} \neq \Omega_{уг}$ , где  $\Omega_{ог} - \text{const}$  и  $\Omega_{уг} - \text{const}$ , не возникает набег фаз, свойственный обычным ФАПЧ [4], в том числе и системам [10, 11].

Кроме того, знак приращения разности фаз совпадает со знаком мгновенной расстройки по частоте и величина приращения разности фаз пропорциональна расстройке по частоте. Поэтому фазовая траектория на рис.3 приближается к абсциссе, равной  $\pi$ , по мере уменьшения мгновенной расстройки  $\frac{d\varphi}{dt}$ .

Здесь можно отметить, что процесс, отображаемый фазовым портретом (рис. 3), можно представить в виде подвижной области  $\Omega_z$ , перемещающейся синхронно и синфазно с процессами в системе в точку «с» на фазовом портрете рис. 2. Поэтому выше отмечалось, что исключается отрезок траектории с-d в результате выполнения управляемых операций сброса.

На основании изложенного можно сделать вывод, что фазовый портрет (см. рис. 3) наблюдаемых процессов в системе ФАПЧ с цифровыми делителями частоты в обратной связи и в цепи формирования опорного сигнала реализуем.

Это также доказывает, что возможно создание систем, взаимодействие всех элементов которой в критических режимах приобретает характер взаимосодействия на получение следующего результата: уменьшается время пребывания системы в критическом режиме работы (исключается отрезок «с-d» фазовой траектории) и уменьшается время возвращения в состояние покоя, т.к. кинетическая энергия при возвращении системы в линейный режим работы приблизительно равна нулю.

Все упомянутые управления реализованы в ЦСЧ [16]. Поскольку описание принципа его действия в [16] дано подробно, рассмотрим здесь его укрупненную структуру и связи, возникающие в процессе его самоорганизации только в критическом режиме. Структурная схема ЦСЧ [16] приведена на рис. 5.

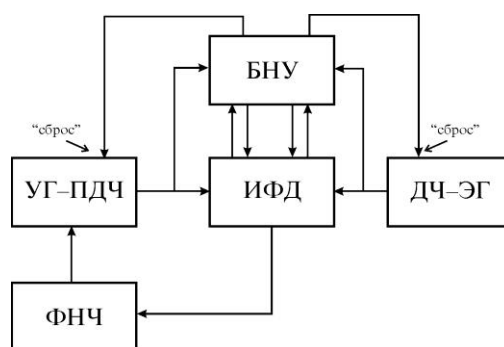


Рис. 5. Структурная схема ЦСЧ

На рис. 5 кроме базовых узлов ФАПЧ показаны: УГ – ПДЧ – управляемого автогенератора-программируемого делителя частоты; ИФД, ФНЧ и ДЧ-ЭГ – делителя частоты – эталонного автогенератора, показан блок БНУ – блок наблюдения – управления. В этом блоке осуществляется анализ процессов в системе, выявление признаков развития кризиса в переходном процессе и формирование всех управлений процессами в том числе и короткого импульса сброса, адресованного только определенному делителю частоты.

Испытания ЦСЧ [16] показали, что он надежно функционирует при любых начальных расстройках, в том числе и близких к полосе удержания. Особенно высока его эффективность при использовании элементов в цепи настройки частоты, в динамическом отношении представляемых соединениями интегратора и других звеньев, в частности, при использовании ИФД с третьим состоянием [2].

**Заключение.** Оптимизация параметров системы ФАПЧ для различных приложений являлось предметом многочисленных исследований [17–31], однако в указанной постановке задача рассматривается впервые. При этом показано, что для обеспечения надежного функционирования системы ФАПЧ с цифровыми делителями частоты в условиях воздействия непредвиденно больших дестабилизирующих факторов и внезапных кратковременных больших возмущений, целесообразно в критических режимах управлять не только процессами в фазовом контуре, но и процессом формирования опорного сигнала. При этом, за счет исходной организации взаимодействия всех, без исключения, элементов автоматической системы, возникающий процесс самоорганизации обеспечивает новое взаимодействие элементов, приобретающее характер **взаимосодействия** на получение нового результата, состоящего в уменьшении времени пребывания в критическом режиме и восстановления требуемого состояния системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы классической и современной теории управления: Учебник в 5-и т. – 2-е изд. перераб. и доп. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под. ред. К.А. Пушкова, Н.Д. Ягупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. *Красовский А.А.* Синтез цилиндрических аттракторов с приложением к ветро-энергетической установке нового класса // Известия Российской Академии наук. Теория и системы управления. – 1996. – № 2. – С. 21-30.
3. *Манасевич В.* Синтезаторы частоты (Теория и проектирование): Пер.с англ. / Под. ред. А.С. Галина. – М.:Связь. – 1979. – 384 с.
4. *Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К.* Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь. – 1989. – 232 с.
5. *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ. / Под ред. З.В. Маркова. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
6. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972. – 447 с.
7. *Кузин Л.Т.* Расчет и проектирование дискретных систем управления. – М.: Машгиз.-1963. – 684 с.
8. *Геложе Ю.А., Клименко П.П.* Управление процессами в фазовых автоматических системах формирования и обработки радиосигналов // Телекоммуникации. – 2000. – № 5. – С. 10-15.
9. *Геложе Ю.А., Клименко П.П.* Управление процессами в нелинейных системах. – М.: Радио и связь, 2006.
10. А.с.479215(СССР) Синтезатор частот / Ю.А. Геложе. – Оpubл. 1975. Бюл. №28.
11. А.с.484617(СССР) Устройство импульсно-фазовой автоподстройки частоты / Ю.А. Геложе – Оpubл. 1975. Бюл. №N34.
12. *Анохин П.К.* Очерки по физиологии функциональных систем. – М.: Медицина. – 1975. – 352 с.
13. *Андронов А.А., Витт А.А. и Хайкин С.Э.* Теория колебания. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. – 1959. – 915 с.
14. А.с.641285 (СССР) Устройство для выбора максимальной усредненной величины / Ю.А. Геложе – Оpubл. 1979. – Бюл. №1.
15. А.с.470814 (СССР) Устройство для выбора минимальной усредненной величины / Ю.А. Геложе – Оpubл. 1975. – Бюл. N18.
16. А.с.55534(СССР) Синтезатор частот / Ю.А. Геложе – Оpubл. 1977. – Бюл. № 15.
17. *Van Trees, H. L.* Functional Techniques for the Analysis of the Nonlinear Behavior of Phase – Locked Loops. «Proc. IEEE», 52, (August 1964), P. 894-911.
18. *Lindsey W.C.* Synchronization Systems in Communication and Control, Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1972.
19. *Mengali U.* Synchronization techniques for digital receivers/ Umberto Mengali and Aldo N. D’Andrea. Plenum Press, New York, 1997.
20. *Gardner F.M.* Hangup in Phase – Lock Loops // IEEE Trans. Commun., COM – 25. – Oct. 1977. – P. 1210-1214.
21. *Asheid G. and Meir H.* Cycle Slips in Phase – Lock Loops: A Tutoriel Survey // IEEE Trans. Commun., COM – 30. – Oct. 1982. – P. 2228-2241.
22. *Meyr H. and Popken L.* Phase Acquisition Statistics for Phase – Locked Loops // IEEE Trans. Commun., COM – 28. – Aug.1980. – P. 1365-1372.
23. *Meyr H. and Asheid G.* Synchronization in Digital Communications. – New York: John Wiley @ Sons, 1990.
24. *Tomasi W.* Electronic Communication Systems. Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Holl, 2004.
25. *H.sari and S.Moridi.* New Phase and Frequency Detectors for Carrier Recovery in PSK and QAM Systems, IEEE Trans.Commun. COM-36, 035-1043, Sept.1988.
26. *Cahn C.R.* Improving Frequency Acquisition of a Coasts Loop // IEEE Trans. Commun., COM-25. – Dec. 1977. – P. 1453-1459.
27. *Gardner F.M.* Properties of Frequency Difference Detectors // IEEE Trans. Commun., COM-33. – Feb.1985. – P. 131-138.
28. *Pasternak G., Whalin R.I.* Analysis and synthesis of a digital phase-locked loop fo FM demodulation. Bell Sysyt. Tech. J. – 1968, Dec. – P. 97-105.

29. Cessna J.R., Levy D.M. Phase noise and transient times for a binary quantized digital phase-locked loop in which Gaussian noise // IEEE Trans, 1972, Com-20, № 2. – P.94-104.
30. Yakaws J., Mori S. A binary quantized digital phase-locked loop // IEEE. – 1973. – Vol. 56-A, № 12. – P. 79-85.
31. Yamamoto H. Mori S. Performance of a binary quantized all digital phase-locked loop with a new class of sequential filter // IEEE Trans. – 1978. – V.Com-26, № 1. – P. 35-45.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

**Максимов Александр Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: kafmps@tspark.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328058, кафедра встраиваемых систем; доцент.

**Гелозе Юрий Андреевич** – e-mail: rts@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

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

**Maksimov Aleksandr Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: kafmps@tspark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

**Gelozhe Yuriy Andreevich** – e-mail: rts@tsure.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

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

УДК 621.396.663

**А.И. Паньчев, А.В. Максимов, А.А. Ваганова**

#### **АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОПЕЛЕНГАТОРА МОБИЛЬНОГО ПОСТА РАДИОМОНИТОРИНГА**

*Одной из основных технических характеристик средств автоматизированного радиомониторинга является точность радиопеленгатора, определяемая угловой ошибкой пеленгования. Инструментальные ошибки пеленгования обусловлены погрешностями конструкции антенной системы, разбросом параметров антенных элементов, различием характеристик фидерных трактов. Задача теоретической оценки инструментальной погрешности для текущей коррекции среднеквадратической ошибки пеленгования актуальна ввиду большой трудоемкости стендовых испытаний и поверочных процедур средств автоматизированного радиомониторинга, а также необходимости размещения оборудования на специальных полигонах, что для активно эксплуатируемых радиопеленгаторов затруднительно. Рассмотрена степень влияния погрешностей компоновки элементов антенной системы на обусловленную искажением диаграммы направленности ошибку пеленгования радиопеленгатора, работающего по принципу корреляционно-интерферометрического измерителя, в котором результирующая характеристика направленности антенной решетки образуется методом прямого синтеза. Учет погрешностей позиционирования вибраторных элементов радиопеленгаторной системы произведен с помощью модели, представляющей собой объемную совокупность линейных излучателей, способных принимать произвольную ориентацию и размещенных без затенения друг друга. Поляризационные погрешности антенной системы учтены произвольной ориентацией вибратора в пространстве, которая задаётся его вращением вокруг координатных осей локальной декартовой системы координат, совмещенной с серединой этого излучателя. Проведен сравнительный анализ синтезированных по методу прямого синтеза диаграмм направленности корреляционно-*