

УДК 621.376.43:621.39(024)

Исследование системы ФАПЧ с фазовым дискриминатором с обратными связями*

В.С. ПЛАКСИЕНКО¹, Н.Е. ПЛАКСИЕНКО², А.С. СИДЕНКОВ³

¹ 347928, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, доктор технических наук, профессор. E-mail: vsp46@mail.ru.

² 347928, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vsp46@mail.ru.

³ 347928, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, аспирант. E-mail: alexandrsidenkov@rambler.ru.

В настоящее время при анализе систем фазовой автоподстройки частоты необходимо проанализировать не только величины полос захвата и удержания, но и время входа в синхронизм и т. д. На основе схемотехнического моделирования в среде Micro-Cap проведено определение полосы захвата системы ФАПЧ с различной формой характеристики фазового детектора, реализуемой схемой с обратными связями и фильтром нижних частот типа 2/2. Известно, что полоса захвата при прямоугольной характеристике ФД максимальна и полученное при расчетах значение можно рассматривать как предельное. Важное значение имеет тип выбранного ФНЧ и с точки зрения величины полос захвата и удержания, и с точки зрения устойчивости. Знание точного значения полосы захвата позволит оценить точность приближенных методов расчета, пригодных при произвольных характеристиках ФД. Задача определения основных характеристик кольца ФАПЧ при сложных ФНЧ решена приближенно. В работе решается задача определения полосы захвата системы ФАПЧ при различных формах характеристики ФД и ФНЧ типа 2/2. На основе полученных результатов можно оценить полосу захвата системы ФАПЧ с различной формой характеристики ФД, если известен его коэффициент передачи. Прямоугольная характеристика фазового дискриминатора реализуется структурами с обратными связями, обладающими достаточно высокими частотными свойствами и устойчивостью. Важно также отметить, что такие дискриминаторы обеспечивают повышение устойчивости к воздействию аддитивных помех. В результате проведенных исследований установлено, какие параметры оказывают влияние на полосу захвата системы ФАПЧ и одновременно обеспечивают устойчивость.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование в среде Micro-Cap, система ФАПЧ, тип ФНЧ, характеристика ФД, оптимальный фазовый дискриминатор, фазовый дискриминатор с обратными связями, полоса захвата, полоса удержания, влияние крутизны характеристики ФД на полосу захвата

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-109-118

Выполним моделирование и исследование системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), построенной с использованием фазового дискриминатора с обратными связями (ФДОС) с помощью пакета схемотехнического моделирования Micro-Cap [1]. Схема моделирования приведена на рис. 1.

В целях сравнения результатов одновременно выполним моделирование системы ФАПЧ, где в качестве фазового детектора (ФД) применен идеальный перемножитель. В целях обеспечения большей устойчивости в качестве ФНЧ в цепях обратных связей выберем идентичные фильтры нижних частот (ФНЧ) типа 2/2.

Генератор (рис. 1) формирует опорное линейно изменяющееся напряжение. Формирователь ЛЧМ (ГУН – блок VCO в среде Micro-Cap) настроен на центральную частоту 465 кГц и

* Статья получена 20 мая 2014 г.

имеет девиацию частот ± 20 кГц. Встроенный в ГУН линейный усилитель имеет коэффициент усиления, равный единице. Форма управляющего напряжения генератора и модуль спектра сформированного таким образом ЛЧМ колебания представлены на рис. 2, *а* и *б* соответственно.

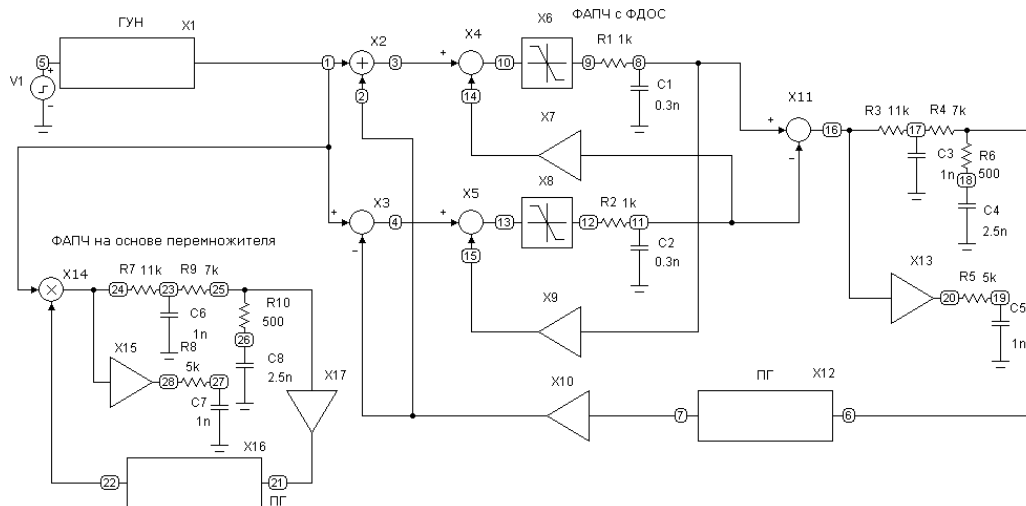


Рис. 1. Моделирование систем ФАПЧ

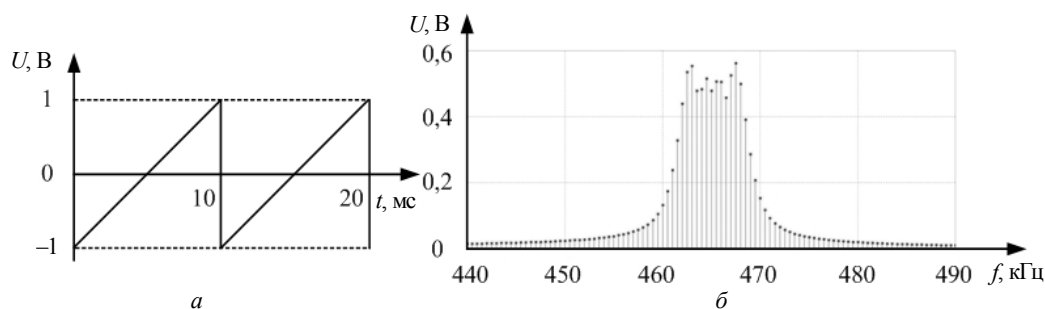


Рис. 2. Форма управляющего напряжения и модуль спектра сигнала с ЛЧМ

Напряжения на выходах ФНЧ системы ФАПЧ с ФДОС (при разомкнутых обратных связях, когда $K = 0$ [2, 3]) и идеального ФД (на входах перестраиваемых генераторов ПГ) имеют вид, представленный на рис. 3.

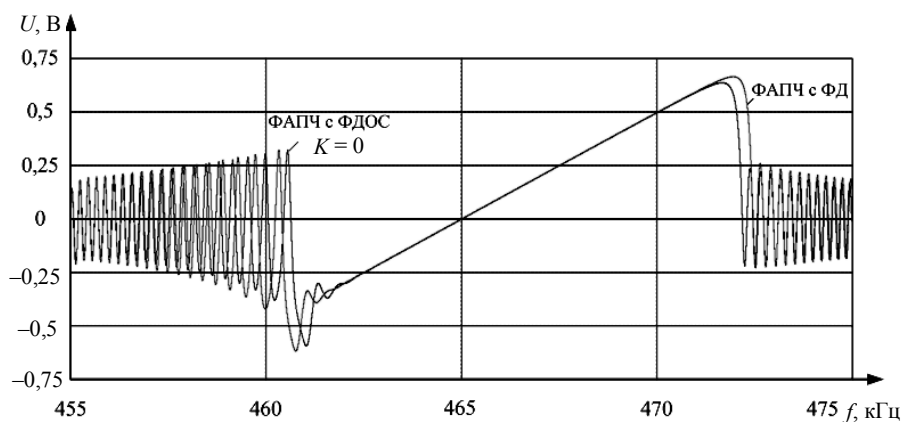


Рис. 3. Напряжения на входах ПГ для ФАПЧ с ФДОС и ФД

В цепи обратной связи ФАПЧ с ФД в виде идеального перемножителя установлен усилитель Х17 с коэффициентом усиления 1,33. Усилитель Х17 предназначен для установки одинаковых петлевых коэффициентов систем ФАПЧ с ФДОС и с идеальным ФД.

На рис. 4 приведены фазовые портреты состояний систем ФАПЧ с идеальным ФД и с ФДОС, позволяющие определить полосы захвата и удержания по значению фазового сдвига.

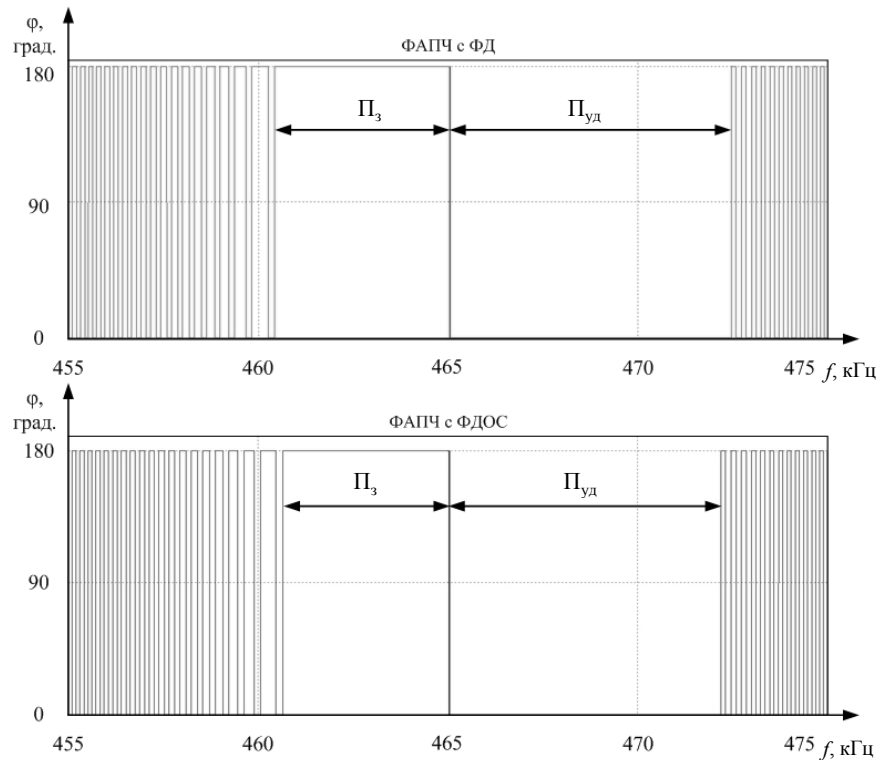


Рис. 4. Фазовые портреты состояний системы ФАПЧ с ФД и ФДОС

В результате моделирования установлено, что полосы захвата Δf_3 и удержания $\Delta f_{уд}$ для систем ФАПЧ с идеальным ФД и с ФДОС при $K = 0$ соответственно равны:

ФАПЧ с ФД: $\Delta f_3 = 4,58$ кГц; $\Delta f_{уд} = 7,46$ кГц;

ФАПЧ с ФДОС: $\Delta f_3 = 4,32$ кГц; $\Delta f_{уд} = 7,18$ кГц.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод: полосы захвата (Π_3) и удержания ($\Pi_{уд}$) систем ФАПЧ с идеальным ФД и с ФДОС при $K = 0$ различаются на 5,7 % и 3,8 % соответственно.

Форма выходного напряжения на выходе ПГ приведена на рис. 5.

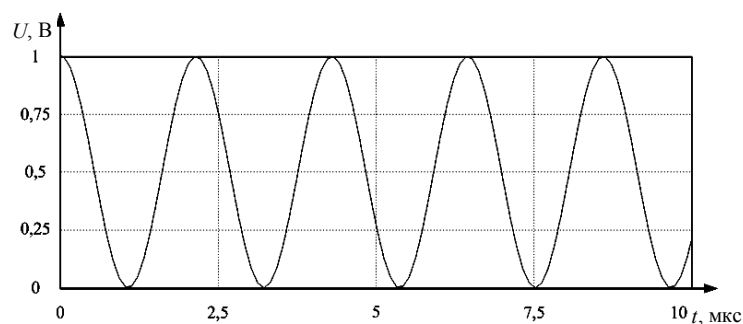


Рис. 5. Форма выходного напряжения на выходе ПГ

Модули спектра выходного напряжения ПГ систем ФАПЧ с ФД в виде перемножителя и с ФДОС приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

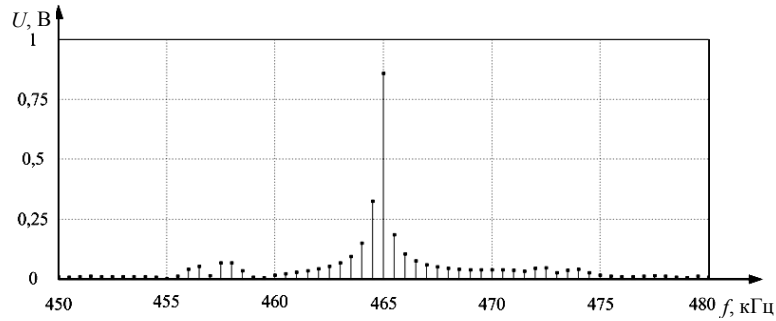


Рис. 6. Модуль спектра выходного напряжения ПГ системы ФАПЧ с ФД

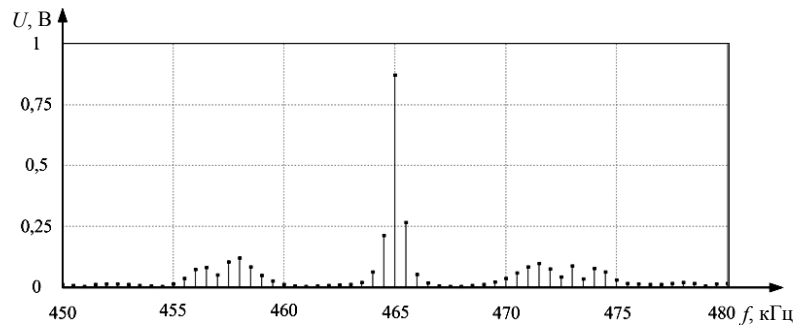


Рис. 7. Модуль спектра выходного напряжения ПГ системы ФАПЧ с ФДОС

На рис. 8–10 приведены напряжения на входах ПГ для ФАПЧ с ФДОС при различных значениях коэффициентов обратной связи K : 0,2; 0,5; 0,9. Анализ рисунков позволяет сделать вывод: увеличение K приводит к расширению полос захвата и удержания системы.

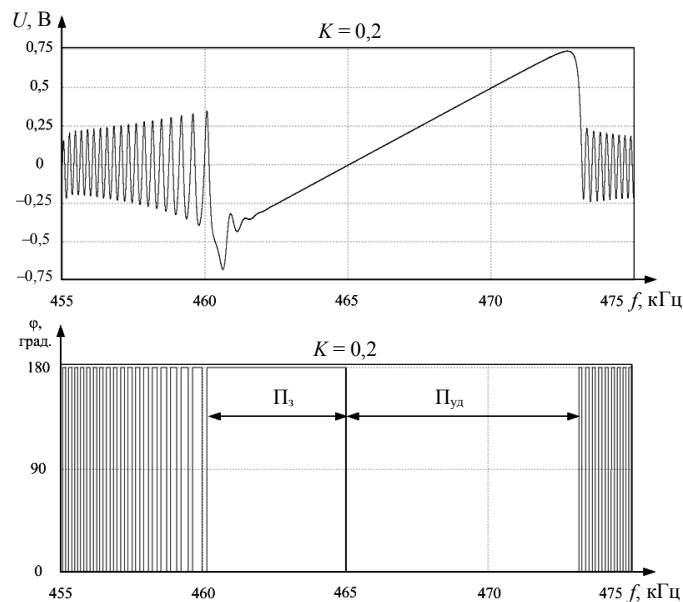


Рис. 8. Напряжения на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС ($K = 0,2$) и фазовые портреты состояний системы

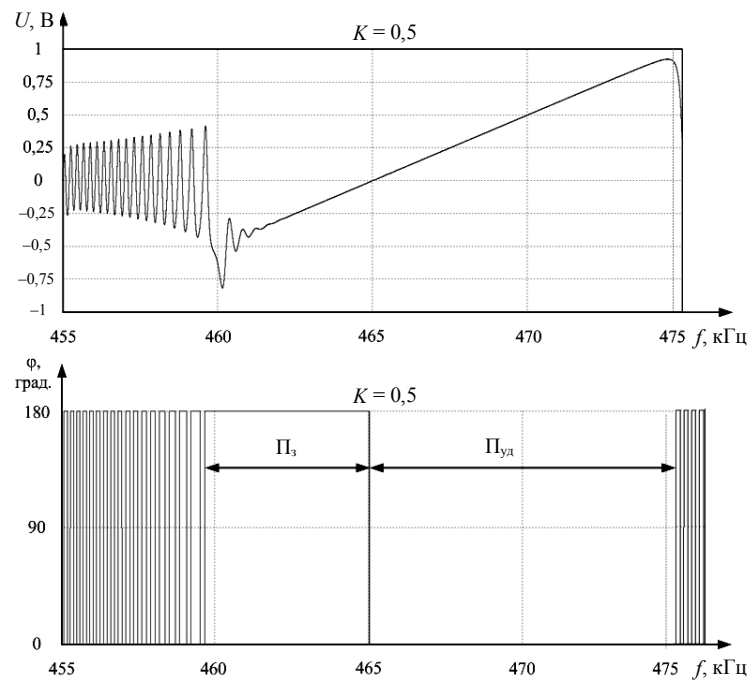


Рис. 9. Напряжения на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС ($K = 0,5$) и фазовые портреты состояний системы

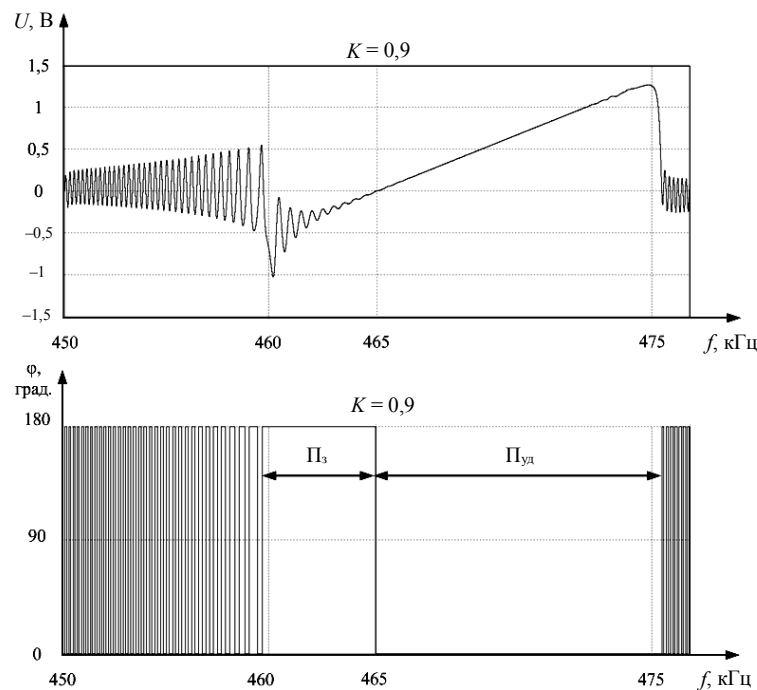


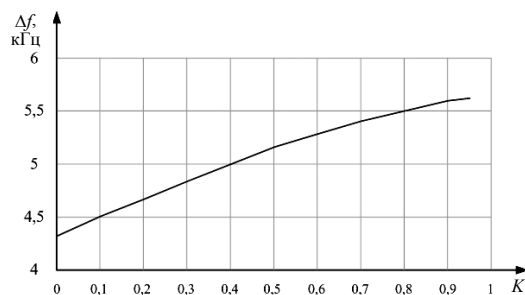
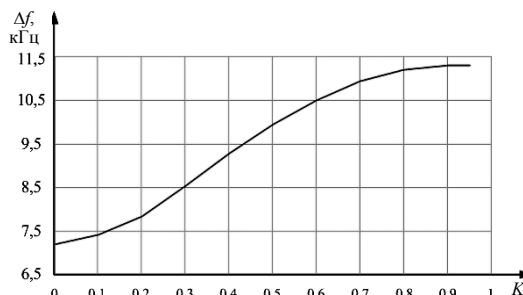
Рис. 10. Напряжения на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС ($K = 0,9$) и фазовые портреты состояний системы

В табл. 1 приведены значения полос захвата и удержания, полученные при моделировании, для значений коэффициента обратной связи K от 0 до 0,95.

Таблица 1

Δf	ФАПЧ с ФД	ФАПЧ с ФДОС										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
$\Delta f_{3\lambda}$ кГц	4,6	4,3	4,5	4,7	4,8	5	5,1	5,3	5,4	5,5	5,6	5,6
$\Delta f_{уд}$ кГц	7,5	7,2	7,4	7,8	8,5	9,3	9,9	10,5	10,9	11,2	11,3	11,3

Графики зависимостей ширины полосы захвата и удержания от величины коэффициентов обратной связи K приведены на рис. 11 и 12 соответственно.

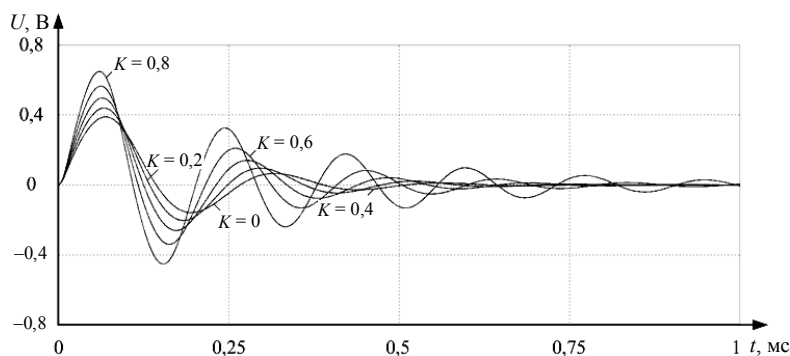
Рис. 11. Зависимость полосы захвата системы ФАПЧ от K Рис. 12. Зависимость полосы удержания системы ФАПЧ от K

Выводы: при установке коэффициента обратных связей ФДОС в системе ФАПЧ $\square 0,9$:

- 1) полоса захвата увеличивается на 30 % по сравнению с системой ФАПЧ с ФД с нерегулируемой характеристикой;
- 2) полоса удержания увеличивается на 50 % по сравнению с системой ФАПЧ с ФД с нерегулируемой характеристикой.

При исследованиях систем ФАПЧ основным вопросом, помимо определения полосы захвата и удержания, является построение проекций фазовых портретов [2, 3] и исследование характера переходного процесса [4–7].

На рис. 13 приведены результаты моделирования переходных процессов в системе ФАПЧ при расстройке в пределах полосы удержания (частота расстройки – 465 кГц).

Рис. 13. Переходные процессы в системе ФАПЧ при разных значениях K

Анализ кривых на рис. 13 позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при $0 \leq K < 1$ переходной процесс носит колебательный характер;
- 2) в системе отсутствуют процессы аperiodического и неколебательного характера.

На рис. 14 показаны полученные при моделировании проекции фазовых портретов системы ФАПЧ при различных значениях K . Для получения проекций фазовых портретов исследуемой системы ФАПЧ параллельно основному ФНЧ системы ФАПЧ подключается измерительный фильтр (ИФ), постоянная времени которого больше по сравнению ФНЧ ФАПЧ.

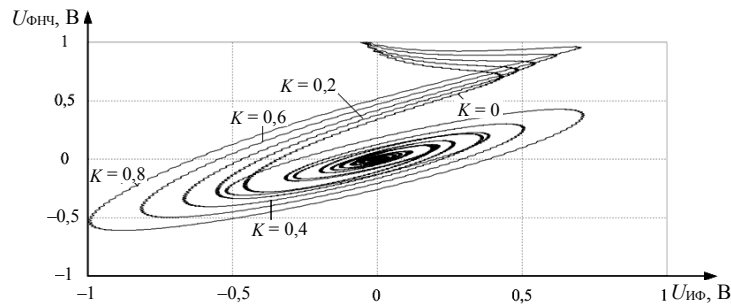


Рис. 14. Проекция фазовых портретов системы ФАПЧ при разных значениях K

На рис. 15 показаны АЧХ ФНЧ ДВОС, АЧХ ФНЧ ФАПЧ и АЧХ ИФ.

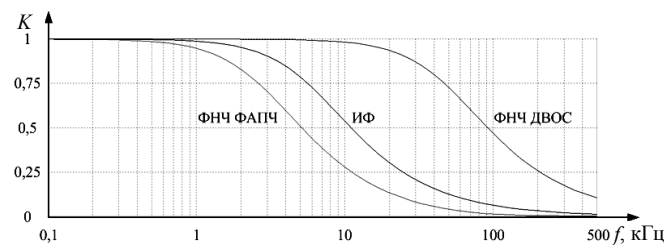


Рис. 15. АЧХ ФНЧ ДВОС, АЧХ ФНЧ ФАПЧ и АЧХ ИФ

Приведенные на рис. 14 проекции фазового портрета и вид переходных процессов на рис. 13 подтверждают реализуемость предложенного в [14] устройства ФАПЧ с ФДОС. В результате путем изменения крутизны характеристики ФДОС в режиме захвата и удержания найдено решение удовлетворения противоречивым требованиям: расширение полосы захвата системы ФАПЧ с ФНЧ высокого порядка и обеспечение устойчивости в «малом».

Характер переходных процессов на рис. 13 и проекции фазовых портретов системы на рис. 14, а также исследование устойчивости ДВОС позволяют сделать вывод: система ФАПЧ с ФДОС устойчива для значений коэффициентов обратной связи $0 \leq K < 1$.

Однако чрезмерное повышение коэффициентов усиления K в цепях обратных связей до значений, приводящих к формированию прямоугольной характеристики ФДОС, приводит к потере устойчивости системы ФАПЧ вследствие возникновения устойчивого предельного цикла первого рода. На рис. 16–18 соответственно приведены графики напряжения на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС при $K = 1$, проекции фазового портрета, фазовые портреты состояний системы.

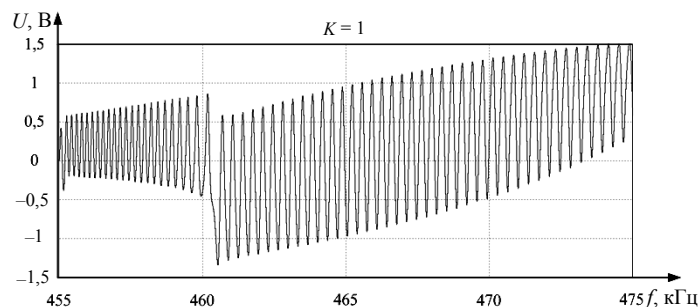
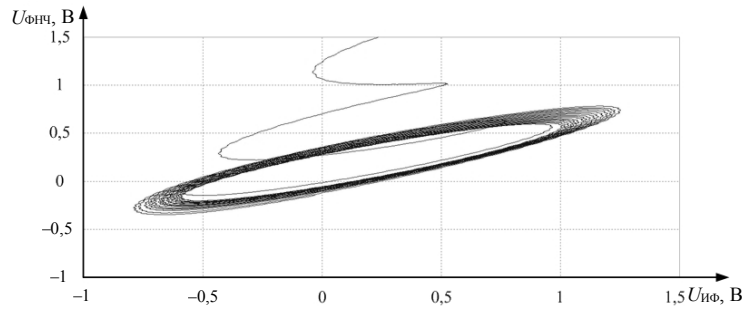
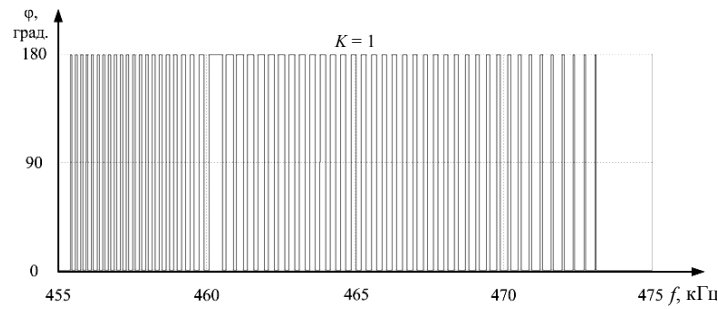
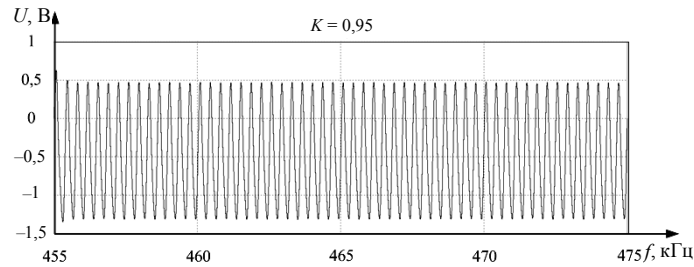
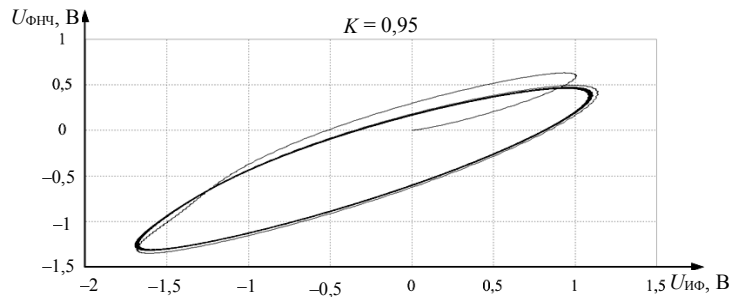


Рис. 16. Напряжение на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС при $K = 1$

В работах [10–13] проведено рассмотрение различных аспектов построения устройств приема и обработки сигналов, эффективных в условиях априорной неопределенности, когда применение дискриминаторов с обратными связями, реализующих способ некогерентного приема сигналов [9], позволяет обеспечить в определенных пределах инвариантность к степени рассогласования параметров сигналов и устройств приема.

Рис. 17. Проекция фазового портрета при $K = 1$ Рис. 18. Фазовые портреты состояний системы при $K = 1$

При изменении частоты опорного генератора (в условиях, когда крутизна характеристики ФДОС не изменяется, $K = 0,95$) на частотах, больших полосы удержания, система теряет устойчивость в «большом» (рис. 19, 20). На рис. 19 и 20 приведены осциллограммы напряжения на входе ПГ и проекции фазового портрета соответственно.

Рис. 19. Напряжения на входе ПГ для ФАПЧ с ФДОС $K = 0,95$ при расстройках выше полосы удержанияРис. 20. Проекция фазового портрета при $K = 0,95$ в режиме биений

Вывод: рассмотрение рис. 16–20 показывает, что система ФАПЧ с ФДОС при $K = 0,95$ переходит в неустойчивое состояние и находится в режиме биений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.
2. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972. – 447 с.
3. Плаксиенко В.С. Уровневая статистическая обработка дискретных сигналов. – М.: Учебная литература, 2006. – 274 с.
4. Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е., Сиденков А.С. Определение полосы захвата системы ФАПЧ при прямоугольной характеристике ФД // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 43–51.
5. Плаксиенко В.С., Бондарь П.А. Балансные дискриминаторы с управляемой характеристикой // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – Вып. 3. – С. 12–14.
6. Плаксиенко В.С., Кравченко Д.А. Моделирование и исследование дискриминаторов с обратными связями // Материалы Международной научной конференции «Методы и алгоритмы эффективных решений» (МАПР-09). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Ч. 3. – С. 67–73.
7. Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е. Система ФАПЧ с дискриминатором с управляемой характеристикой // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – 2011. – Юбилейный том, посвященный 20-летию Академии инженерных наук РФ. – С. 164–168.
8. Бондарь П.А. Применение фазовых дискриминаторов с обратными связями в системе ФАПЧ // 2 Всероссийская конференция ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике–2009», 20–24 апреля 2009 г.: тезисы докладов. – М.: МАИ-Принт, 2009. – С. 40–41.
9. А.с. 1067613 СССР, МКИ⁷, Н 04 L 27/00. Способ некогерентного приема двоичных сигналов / В.С. Плаксиенко. – № 3436672/18-09; заявл. 07.05.82; опубл. 15.01.84, Бюл. № 2. – 4 с.
10. Бондарь П.А. Моделирование и исследование амплитудных дискриминаторов с обратными связями // Сборник трудов XX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2007. – Т. 7. – С. 172–173.
11. Бондарь П.А. Моделирование и исследование частотных детекторов на основе кольца фазовой автоподстройки частоты // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 36.
12. Бондарь П.А. Характеристики устройств обработки сигналов с угловой модуляцией // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 38–39.
13. Радиоприемные устройства: учебник для вузов / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин, А.А. Кубицкий, В.А. Левин, В.С. Плаксиенко, А.И. Фалько, О.И. Тяжев; под ред. Н.Н. Фомина. – М.: Радио и связь, 2003. – 520 с.
14. А.с. 1290519 А1 СССР, МКИ⁷, Н 03 L 7/00. Устройство фазовой автоподстройки частоты / В.С. Плаксиенко, П.В. Сучков, К.А. Самойло, Н.Е. Плаксиенко, Т.С. Федосова (СССР). – № 3896423/24-09; заявл. 16.05.1985; опубл. 15.02.1987, Бюл. № 6. – 3 с.

Плаксиенко Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Основное направление научных исследований – синтез и анализ систем и устройств формирования и обработки сигналов. Имеет более 200 публикаций. E-mail: vsp46@mail.ru

Плаксиенко Нина Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование систем и устройств формирования и обработки сигналов. Имеет более 100 публикаций. E-mail: vsp46@mail.ru

Сиденков Александр Сергеевич, аспирант Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование устройств формирования и обработки сигналов. Имеет 10 публикаций. E-mail: alexandersidenkov@rambler.ru

Research on the PLL system with a feedback phase discriminator^{*}

V.S. PLAKSIENKO¹, N.E. PLAKSIENKO², A.S. SIDENKOV³

¹ Southern Federal University, 44 Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347928, Russian Federation, D.Sc. (Eng.). E-mail: vsp46@mail.ru

² Southern Federal University, 44 Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347928, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: vsp46@mail.ru

³ Southern Federal University, 44 Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347928, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: alexandersidenkov@rambler.ru

At present to analyze systems with phase-locked loop (PLL) frequency control it is necessary to analyze not only the values of capture and holding bands, but also the time of locking in synchronism, etc. The estimation of the capture band of the PLL with different characteristics of the phase discriminator (PD) implemented by a circuit with feedbacks and the low-pass filter (LPF) of type 2/2 was carried out by means of circuit simulation in the Micro-Cap system. It is known that the capture band with a rectangular characteristic of PD is maximal and a calculated value can be considered as marginal. The type of the selected low-pass filter is very important in terms of the value of the capture and holding

^{*}Received 20 May 2014.

bands as well as in terms of stability. Knowing the exact value of the capture band will make it possible to estimate the accuracy of approximate methods of calculation suitable for PD arbitrary characteristics. The problem of determining the main characteristics of the PLL rings with a complex LPF is solved approximately. The problem of determining the PLL capture band for various forms of PD characteristics and LPF of type 2/2 is also solved in the paper. Based on the results obtained it is possible to estimate the PLL capture band with different PD form characteristics if the transfer ratio is known. A rectangular characteristic of the phase discriminator is implemented by feedback structures which have sufficiently high frequency characteristics and stability. It is also important to note that such a discriminator increase the resistance to the additive noise effect. As a result of the research it is established which parameters influence the PLL capture band and simultaneously provide stability.

Keywords: Circuit simulation in Micro-Cap system, PLL, low-pass filter type, the characteristic of PD, optimal phase discriminator, feedback phase discriminator, capture band, holding band, influence of PD slope on capture band

REFERENCES

1. Amelina M.A., Amelin S.A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8* [Program of circuitry modeling of Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007. 464 p.
2. Shakhgil'dyan V.V., Lyakhovkin A.A. *Sistemy fazovoi avtopodstroiki chastoty* [Systems of a phase auto-adjust of frequency]. Moscow, Svyaz' Publ., 1972. 447 p.
3. Plaksienko V.S. *Urovnevaya statisticheskaya obrabotka diskretnykh signalov* [Level statistical processing of discrete signals]. Moscow, Uchebnaya literatura Publ., 2006. 274 p.
4. Plaksienko V.S., Plaksienko N.E., Sidenkov A.S. *Opreделение polosa zakhvata sistemy FAPCh pri pryamougol'noi kharakteristike FD* [The PLL capture range with the PD rectangular characteristic]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 2 (55), pp. 43–51.
5. Plaksienko V.S., Bondar' P.A. *Balansnye diskriminatory s upravlyaemoi kharakteristikoi* [Balancing discriminators with the controlled characteristic]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika – News of higher education establishments of Russian Federation. Radioelectronics*, 2009, iss. 3, pp. 12–14.
6. Plaksienko V.S., Kravchenko D.A. [Modeling and research of discriminators with feedback]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Metody i algoritmy effektivnykh reshenii" (MAPR-09). Ch. 3* [Proceedings of the International scientific conference "Methods and Algorithms of Effective Decisions" (MAPR-09). Pt. 3]. Taganrog, 2009, pp. 67–73.
7. Plaksienko V.S., Plaksienko N.E. *Sistema FAPCh s diskriminatorom s upravlyaemoi kharakteristikoi* [Sistem FAPCh with the discriminator with the operated characteristic]. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk im. A.M. Prokhorova – News of the Academy of Engineering Sciences of A.M. Prokhorov*. Anniversary volume devoted to the 20 anniversary of the Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation, 2011, pp. 164–168.
8. Bondar' P.A. [Use of phase discriminators with feedback in system of FAPCh]. 2 *Vserossiiskaya konferentsiya uchenykh, molodykh spetsialistov i studentov «Informatsionnye tekhnologii v aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhnike–2009»*, 20–24 aprelya 2009 g.: *tezisy dokladov* [The 2nd All-Russian conference of scientists, young specialists and students "Information technologies in aviation and space equipment-2009". Theses of reports]. Moscow, 2009, pp. 40–41.
9. Plaksienko V.S. *Sposob nekogerentnogo priema dvoichnykh signalov* [Way of incoherent reception of binary signals]. Patent USSR, no. 1067613, 1984.
10. Bondar' P.A. [Modeling and research of amplitude discriminators with feedback]. *Sbornik trudov XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh"* [Collection of works XX of the International scientific conference "Mathematical Methods in Equipment and Technologies"]. Yaroslavl, 2007, vol. 7, pp. 172–173.
11. Bondar' P.A. *Modelirovanie i issledovanie chastotnykh detektorov na osnove kol'tsa fazovoi avtopodstroiki chastoty* [Modeling and research of frequency detectors on the basis of a ring of a phase auto-adjust of frequency]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2008, no. 1 (78), pp. 36.
12. Bondar' P.A. *Kharakteristiki ustroystv obrabotki signalov s uglovoi modulyatsiei* [Characteristics of processing devices of signals with angular modulation]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2008, no. 1 (78), pp. 38–39.
13. Fomin N.N., Buga N.N., Golovin O.V., Kubitskii A.A., Levin V.A., Plaksienko V.S., Fal'ko A.I., Tyazhev O.I. *Radiopriemnye ustroystva* [The radio-receiving devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003. 520 p.
14. Plaksienko V.S., Suchkov P.V., Samoilov K.A., Plaksienko N.E., Fedosova T.S. *Ustroystvo fazovoi avtopodstroiki chastoty* [Device of a phase auto-adjust of Frequency]. Patent USSR, no. 1290519, 1987.