

УДК 621.316.726.078

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

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНТУРЕ ФАПЧ ПРИ БОЛЬШИХ НАЧАЛЬНЫХ РАССТРОЙКАХ ПО ЧАСТОТЕ

*Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем
и управления, Таганрог, Россия*

В обработке и формировании радиосигналов широко применяется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При обработке сигналов в демодуляторах осуществляется синхронизация по несущему колебанию и тактовая синхронизация. Диапазонно-кварцевая стабилизация частоты осуществляется цифровыми синтезаторами частоты, построенными на основе ФАПЧ с программируемыми цифровыми делителями частоты. Для формирования опорных синусоидальных колебаний обычно требуется получение низкого уровня негармонических дискретных спектральных составляющих, локализуемых вблизи несущей. Эти побочные составляющие обусловлены пульсациями управляющего напряжения импульсно-фазового детектора (ИФД) системы ФАПЧ, работающей в режиме дискретизации по времени. Подавление этих спектральных составляющих осуществляют включением в контур ФАПЧ ФНЧ высоких порядков. Применение таких фильтров в следящих демодуляторах повышает их избирательность по соседнему каналу. При этом возникают проблемы с обеспечением устойчивости системы в «малом» и в «большом». Рассмотрена система ФАПЧ, обладающая свойством самоорганизации и обеспечивающая быстрое восстановление режима синхронизации при больших возмущениях. В состав этой системы включен биномиальный ФНЧ. Показано, что эта система с биномиальными ФНЧ, включая 5-й порядок, может при определенных условиях удовлетворять критерию устойчивости в «большом». Моделирование системы ФАПЧ, с включенными в ее состав биномиальными ФНЧ высоких порядков, показало, что процессы в ней устойчивы при больших начальных расстройках по частоте. Длительность переходных процессов пропорциональна величине расстройки по частоте. На основании полученных результатов можно утверждать, что рассмотренная фазовая система обеспечивает расширение функциональных возможностей при обработке и формировании радиосигналов.

Ключевые слова: фаза, частота, переходный процесс, устойчивость, фазовый детектор, автоматическая система.

Введение. Для формирования и обработки сигналов широко используются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1,2,3,4,5]. Диапазонно-кварцевая стабилизация частоты осуществляется цифровыми синтезаторами частоты, построенными на основе ФАПЧ с программируемыми делителями частоты. В современных устройствах формирования опорных синусоидальных колебаний обычно требуется получение низкого уровня (менее -100...-120дБ) негармонических дискретных спектральных составляющих, локализуемых вблизи несущей. Обусловлены эти побочные составляющие пульсациями

управляющего напряжения импульсно – фазового детектора (ИФД) системы фазовой автоподстройки частоты, работающей в режиме дискретизации по времени. Для подавления этих спектральных составляющих в контур ФАПЧ включают фильтры нижних частот высоких порядков. Включение таких ФНЧ в состав следящих демодуляторов повысит их избирательность по соседнему каналу. При этом возникают проблемы с обеспечением устойчивости системы ФАПЧ как в «малом» так и в «большом».

Для обеспечения устойчивости в «малом» выбран определенный интервал между частотой среза системы и полосой пропускания фильтра нижних частот высокого порядка [6,7].

Устойчивость в «большом» определена методом абсолютной устойчивости, согласно которому необходимо, чтобы годограф частотной характеристики разомкнутой системы не пересекал критический круг [6,7].

Приводятся результаты имитационного моделирования, выполненные для нелинейной системы фазовой автоподстройки частоты с импульсно-фазовым дискриминатором со статической фазовой характеристикой, линейной в некоторых пределах. Исследуемая система ФАПЧ при больших возмущающих воздействиях способна изменять свою структуру.

Исследуемая система ФАПЧ. В настоящей работе проведено исследование переходных процессов в системе ФАПЧ, в которой используется импульсно-фазовый детектор (ИФД) со статической характеристикой, линейной в пределах $(-\pi, +\pi)$. Для расширения полосы захвата до пределов полосы удержания, система ФАПЧ с ИФД выполнена в соответствии с [8, 9] и обладает свойством самоорганизации [6].

Из теории автоматических систем управления [7] известно, что для устойчивости в «большом» следящей системы, содержащей одну нелинейность, характеристика которой укладывается в сектор $[a, K]$, где K – наклон верхней границы сектора, и a – наклон нижней границы сектора, необходимо, чтобы годограф частотной характеристики разомкнутой системы не пересекал критический круг, границы которого лежат на действительной оси комплексной плоскости с координатами $-1/K$ и $-1/a$. Этот круговой критерий устойчивости будет использован для определения устойчивости состояний равновесия системы ФАПЧ.

Эквивалентная характеристика ИФД, формируемая в составе системы ФАПЧ [8, 9], имеет вид, представленный на рисунке 1.

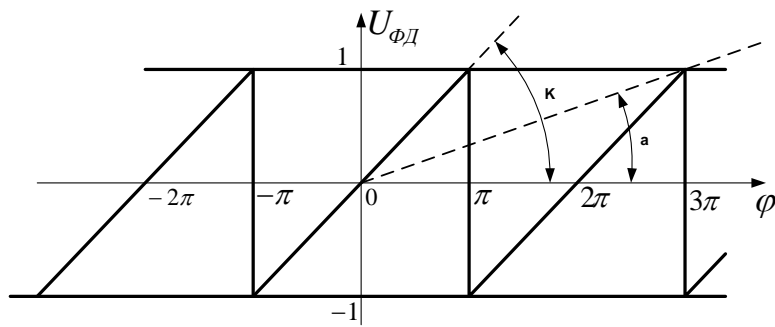


Рисунок 1 – Эквивалентная дискриминационная характеристика ИФД

Из рисунка 1 видно, что верхняя граница вышеупомянутого сектора имеет наклон $K = 1/\pi$. Если величина набега фаз при обработке начальной расстройки по частоте ограничена и составляет, например 3π , то сектор, в который укладывается характеристика ИФД будет $[a, K]$, при этом наклон нижней границы сектора будет равен $a = 1/3\pi$.

Математическая модель системы ФАПЧ [8, 9] с вышеупомянутым фазовым детектором представлена на рис. 2.

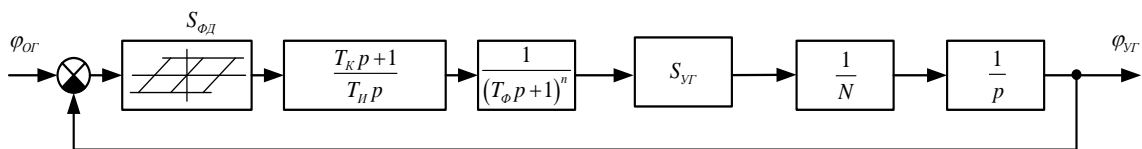


Рисунок 2 - Математическая модель системы ФАПЧ [8, 9]

На рисунке 2 обозначено $\varphi_{ог}$ - фаза опорного автогенератора; $S_{ФД}$ - крутизна характеристики ИФД; T_k - постоянная времени корректирующего звена; T_i - постоянная времени интегратора; T_ϕ - постоянная времени биномиального фильтра n -го порядка; S_{yg} - крутизна регулировочной характеристики управляемого по частоте автогенератора; N - коэффициент деления делителя частоты; φ_{yg} - фаза формируемого колебания.

В контур ФАПЧ включен биномиальный фильтр n -го порядка. Необходимость такого фильтра объяснена выше. Например, использование в составе ФАПЧ биномиальных ФНЧ 2, 3, 4 и 5 порядков может позволить дополнительно ослабить уровень упомянутых дискретных негармонических спектральных составляющих на 20, 30, 40 и 50дБ соответственно [10, 6].

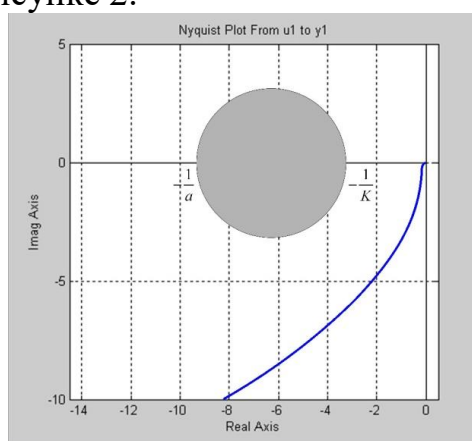
Устойчивость в «малом» системы ФАПЧ обеспечена тем, что полоса пропускания (по уровню -3дБ) биномиального ФНЧ выбрана в $2n$ -раза (где n – порядок ФНЧ) выше частоты среза системы, определяемой параметрами T_k , T_i , S_{yg} , $S_{ФД}$ и N , при этом выбором величины T_k создается запас устойчивости по фазе системы без ФНЧ, равный 65° [10,6].

Постановка задачи. Ставится задача определить устойчивость процессов в системе ФАПЧ [8,9] с ФНЧ биномиального типа при больших начальных расстройках по частоте.

Способ выбора параметров контура ФАПЧ определен выше.

Для определения устойчивости в «большом» рассматриваемой системы ФАПЧ [8, 9] использован круговой критерий [6,7].

Характер переходных процессов при больших начальных расстройках по частоте определен моделированием системы, математическая модель которой показана на рисунке 2.



Результаты анализа устойчивости системы ФАПЧ при больших начальных расстройках. Для теоретической оценки устойчивости в «большом» процессов в рассматриваемом контуре ФАПЧ [8, 9] на рисунках 3...6 приведены годографы частотной характеристики разомкнутой системы с биномиальными ФНЧ 2, 3, 4 и 5 порядков соответственно.

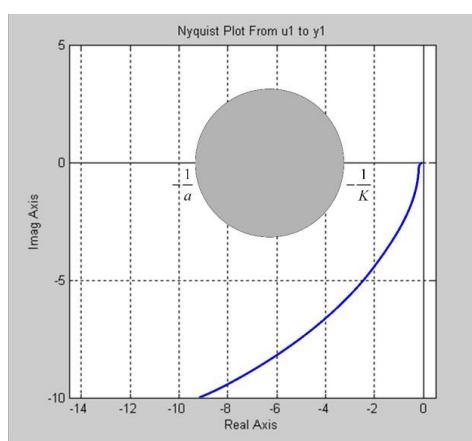


Рисунок 3 - Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 2-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

Рисунок 4 - Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 3-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

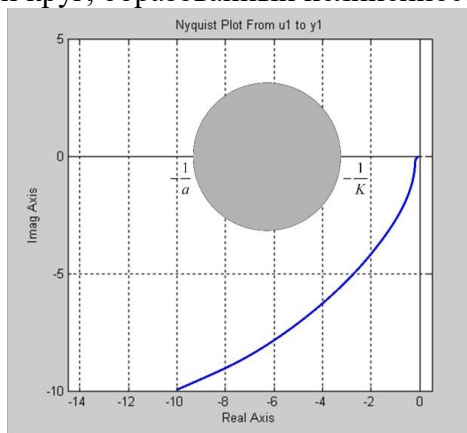


Рисунок 5 -Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

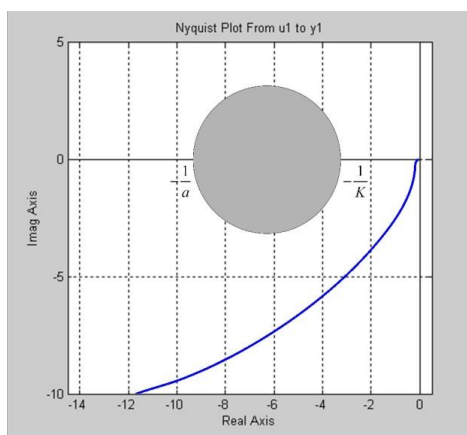


Рисунок 6 - Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 5-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

Из рисунков 3...6 видно, что имеется запас устойчивости в «большом», поскольку годограф частотных характеристик не касается круга.

Ниже, для примера, приведены результаты моделирования переходных процессов в контуре ФАПЧ для различных начальных расстроек по частоте и при использовании биномиального ФНЧ 4-го порядка. Оценка характера переходного процесса осуществлена путем наблюдения выходного напряжения ИФД.

На рисунках 7...10 приведены осциллограммы переходных процессов в рассматриваемой системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка для нормированных по частоте начальных расстроек γ_n , равных 0,4; 0,6; 0,8 и 0,9 соответственно.

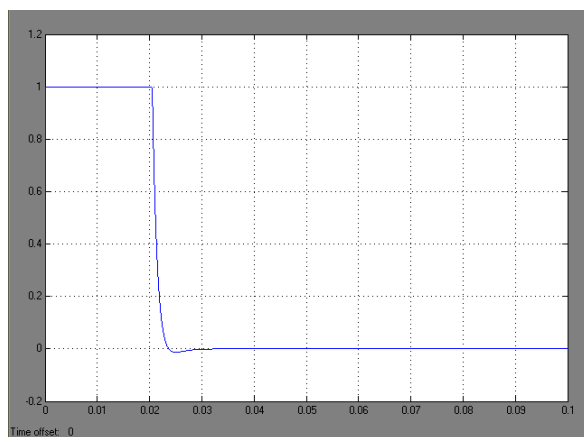


Рисунок 7 - График переходного процесса при $\gamma_H = 0,4$

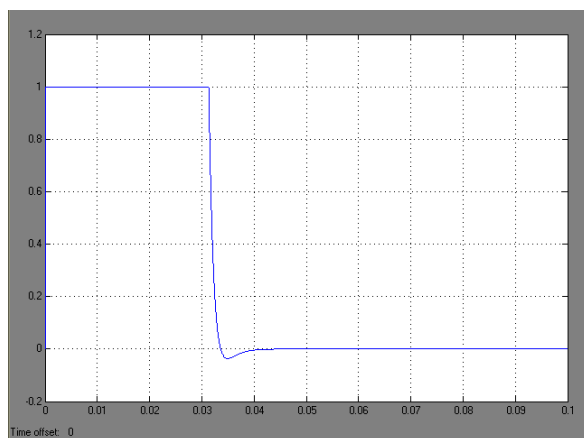


Рисунок 8 - График переходного процесса при $\gamma_H = 0,6$

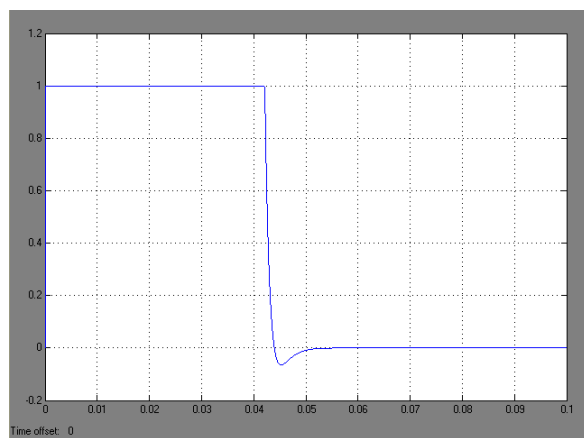


Рисунок 9 - График переходного процесса при $\gamma_H = 0,8$

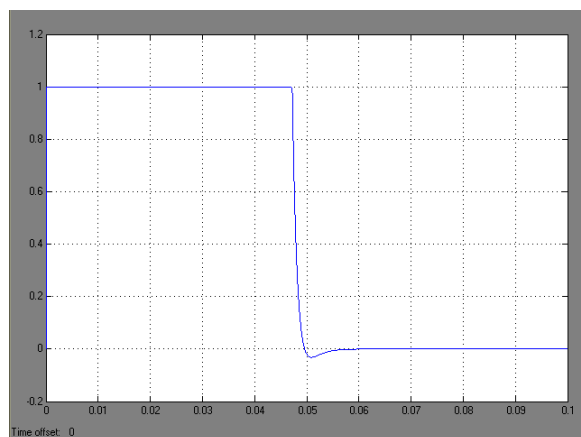


Рисунок 10 - График переходного процесса при $\gamma_n = 0,9$

Из рисунков 7...10 видно, что переходные процессы устойчивые. Длительность переходного процесса увеличивается пропорционально величине начальной расстройке, что объясняется особенностью управления процессами в контуре ФАПЧ [8, 9].

Заключение. Проведенные исследования показали, что система ФАПЧ с биномиальными ФНЧ, включая 5-й порядок, может удовлетворить критерию устойчивости в «большом».

Моделирование системы ФАПЧ, обладающей свойством самоорганизации и с включенными в ее состав биномиальными ФНЧ высоких порядков, показало, что процессы в ней устойчивы при больших начальных расстройках по частоте. Длительность переходных процессов пропорциональна величине расстройки по частоте.

На основании полученных результатов можно утверждать, что рассмотренная фазовая система обеспечивает расширение функциональных возможностей при обработке и формировании радиосигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pasternak G., Whalin R.L. Analysis and synthesis of a digital phase-locked loop for FM demodulation // Bell Syst. Tech. J. 1968. Dec. PP. 97–105.
2. W.C. Lindsey. Synchronization Systems in Communication and Control, Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1972.
3. U. Mengali. Synchronization techniques for digital receivers/ Umberto Mengali and Aldo N. D’Andrea. Plenum Press, New York, 1997.
4. Yamamoto H., Mori S. Performance of a binary quantized all digital phase-locked loop with a new class of sequential filter // IEEE Trans. 1978. Vol. Com-26. No 1. PP. 35–45.

5. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно – фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь. 1989.
6. Гелозе Ю.А., Клименко П.П. Управление процессами в нелинейных системах. М.: Радио и связь, 2006.
7. Сю. Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применения / Перевод с английского. Под ред. Ю.И. Топчиева. М.: Машиностроение, 1972.
8. А.с.484617 (СССР) Устройство ИФАПЧ / Гелозе Ю.А. 1975. Бюл.№34.
9. А.с.987818 (СССР) Синтезатор частот / Гелозе Ю.А. 1977. Бюл.№1.
10. Гелозе Ю.А., Клименко П.П. Системы фазовой автоподстройки частоты с ФНЧ высоких порядков // Радиосистемы. Радиолокационные устройства и системы управления, локации и связи. 2004. Вып. 78.

Y.A. Gelozhe, P.P. Klimenko, A.V. Maksimov

TRANSIENT PROCESSES IN THE PLL LOOP FOR LARGE INITIAL FREQUENCY DETUNINGS

*Southern Federal University,
Institute of Radio Engineering Systems and Control,
Taganrog, Russia*

In the processing and generation of radio signals, a phase locked loop is widely used. When processing signals in demodulators, the carrier wave synchronization and clock synchronization are carried out. The range-quartz frequency stabilization is carried out by digital frequency synthesizers, built on the basis of phase locked loop with programmable digital frequency dividers. Under the conditions of formation of reference sinusoidal oscillations, it is usually necessary to obtain a low level of non-harmonic discrete spectral components localized near the carrier. These secondary components are caused by pulsations of the control voltage of the impulse-phase detector of the phase locked loop system operating in the time-sampling mode. The suppression of these spectral components is carried out by including high-order low pass filters in the phase locked loop circuit. The use of such filters in the tracking demodulators increases their selectivity along the adjacent channel. In this case, there are problems with ensuring the stability of the system in the "small" and "big". The paper considers the work of phase locked loop, which has the property of self-organization and ensures a rapid recovery of the synchronization regime for large perturbations. This system includes a binomial low pass filter that suppresses by products of frequency synthesis and increases the selectivity of demodulators along the adjacent channel. The paper shows that this system with binomial low pass filters, including the 5th order, can satisfy the stability criterion in "big" under certain conditions. Modeling of the phase locked loop system, which has the property of self-organization and with high-order binomial low pass filters included in its composition, has shown that the processes in it are stable at large initial detuning in frequency. The duration of the transient processes is proportional to the magnitude of the

detuning in frequency. On the basis of the obtained results, it can be asserted that the considered phase system provides an extension of the functionality in the processing and generation of radio signals.

Keywords: phase, frequency, transient process, stability, phase detector, automatic control system.

REFERENCES

1. Pasternak G., Whalin R.L. Analysis and synthesis of a digital phase-locked loop for FM demodulation // Bell Syst. Tech. J. 1968. Dec. P. 97–105.
2. W.C. Lindsey. Synchronization Systems in Communication and Control, Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1972.
3. U. Mengali. Synchronization techniques for digital receivers/ Umberto Mengali and Aldo N. D’Andrea. Plenum Press, New York, 1997.
4. Yamamoto H., Mori S. Performance of a binary quantized all digital phase-locked loop with a new class of sequential filter // IEEE Trans. 1978. Vol. Com-26. No.1. PP. 35–45.
5. Levin V.A., Malinovskij V.N., Romanov S.K. Sintezatory chastot s sistemoj impul'sno - fazovoj avtopodstrojki [Frequency synthesizers with a pulsed system PLL] . M.: Radio i svyaz'. 1989. (in Russian)
6. Gelozhe YU.A., Klimenko P.P. Upravlenie processami v nelinejnyh sistemah [Process control in nonlinear systems]. M.: Radio i svyaz', 2006. (in Russian)
7. Su D., Meyer A. Modern theory of automatic control and its application. Moscow: Mechanical engineering, 1972.
8. A.s.484617 (USSR) Ustrojstvo IFAPCH [System PLL] / Gelozhe Yu.A. 1975. Byul. No 34. (in Russian)
9. A.s.987818 (USSR) Sintezator chastot [Frequency Synthesizer]/ Gelozhe Yu.A. 1977. Byul.No.1. (in Russian)
10. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P. Sistemy fazovoj avtopodstrojki chastoty s FNCH vysokih poryadkov [Phase Locked Loops with high-order low-pass filter] // Radiosistemy. Radiolokacionnye ustrojstva i sistemy upravleniya, lokacii i svyazi. 2004. Vyp. 78. (in Russian)