

18. Tsaliev T.A., Cherenkov V.S. Vozbuzhdenie odinochnoy kanavki i ekvivalentnyy poverkhnostnyy impedans rebristykh struktur [The excitation of a single groove on top and equivalent surface impedance of the ridged structures], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1985, Vol. 30, No. 9, pp. 1689.
19. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Handbook for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.
20. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. Integraly i ryady [Integrals and series]. Moscow: Nauka, 1981, 800 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.Х. Аджиев.

Кошкидько Владимир Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: kvg59@mail.ru; 347900, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Алпатова Ольга Витальевна – e-mail: alpatova-ov@yandex.ru; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Koshkid'ko Vladimir Georgievich – Southern Federal University; e-mail: kvg59@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Alpatova Olga Vital'evna – e-mail: alpatova-ov@yandex.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.316.726.078

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТУРЕ ФАПЧ

Для формирования и обработки сигналов широко используются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Диапазонно-кварцевая стабилизация частоты осуществляется цифровыми синтезаторами частоты, построенными на основе ФАПЧ с программируемыми делителями частот. В современных устройствах формирования опорных синусоидальных колебаний обычно требуется получение низкого уровня (менее 100...120 дБ) негармонических дискретных спектральных составляющих, локализуемых вблизи несущей. Обусловлены эти побочные составляющие пульсациями управляющего напряжения импульсно-фазового дискриминатора (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. 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 всей системы и полосой пропускания фильтра нижних частот высокого порядка. Для обеспечения устойчивости в «большом» применен метод абсолютной устойчивости, согласно которому необходимо, чтобы годограф частотной характеристики разомкнутой системы не пересекал критический круг. Приводятся результаты имитационного моделирования, выполненные для нелинейной системы фазовой автоподстройки частоты с импульсно-фазовым дискриминатором типа «выборка-запоминание» со статической фазовой характеристикой, линейной в пределах $(-\pi, +\pi)$, обладающей свойством самоорганизации, а также для нелинейной системы фазовой автоподстройки частоты с частотно-фазовым дискриминатором с линейной зависимостью тока управления в пределах фазовых расстроек $\pm 2\pi$, которые демонстрируют ряд преимуществ системы ФАПЧ с импульсно-фазовым дискриминатором типа «выборка – запоминание».

Фазовая автоподстройка частоты; полоса удержания; полоса захвата; импульсно-фазовый дискриминатор; частотно-фазовый дискриминатор; переходные процессы; устойчивость.

Yu.A. Ghelozhe, P.P. Klimenko, A.V. Maksimov

RESEARCH OF TRANSIENTS IN PHASE LOCKED LOOP SYSTEMS

For forming and signal processing systems are widely used phase locked loop systems (PLL). Range-quartz frequency stabilization is performed by digital frequency synthesizer constructed with the PLL used programmable frequency divider. In modern devices for generating reference sine waves is usually required to obtain a low level (less than 100 ... 120 dB) non-harmonic spectral components of discrete, localized near the carrier. These side components are due to fluctuations of the control voltage pulse-phase discriminator (IFD) a phase-locked loop system (PLL), operating in the time sampling mode. The lowpass filters of high orders are include at a PLL circuit for suppressing these spectral components. At the same time there are problems with the sustainability of the PLL in the "small" and the "big". To ensure stability in the "small" has been selected a certain interval between the cutoff frequency of the entire system bandwidth, and a low pass filter of high order. To ensure stability in the "big" method was used for absolute stability, according to which it is necessary to open the hodograph of the frequency response of the system did not cross the critical circle. The results of the simulation performed for the nonlinear phase-locked loop with pulse-phase discriminator such as "sample-remembering" with the static phase characteristic linear in the range $(-\pi, +\pi)$, with the property of self-organization, as well as for non-linear phase-locked frequency with frequency-phase discriminator with a linear dependence of the current control within the phase detuning $\pm 2\pi$, which exhibit a several advantages with PLL pulse-phase discriminator such as "sample - remembering".

Phase-locked loop; holding range; capture range; pulse-phase discriminator; frequency-phase discriminator; transient process; stability.

Введение. В настоящей работе проведено сравнение длительности переходных процессов в системе ФАПЧ, в которой используются следующие два типа ИФД: импульсно-фазовый дискриминатор типа «выборка-запоминание» со статической фазовой характеристикой, линейной в пределах $(-\pi, +\pi)$ и частотно-фазовый дискриминатор (ЧФД) с линейной зависимостью тока управления в пределах фазовых расстроек $\pm 2\pi$. Следует отметить, что в системах ФАПЧ с ЧФД полоса захвата близка к пределам полосы удержания [1–16].

Постановка задачи. Для расширения полосы захвата до пределов полосы удержания система ФАПЧ с ИФД типа «выборка – запоминание» выполнена в соответствии с [17, 18] и обладает свойством самоорганизации [19].

Таким образом, обе сравниваемые системы ФАПЧ имеют полосы захвата, близкие к пределам полосы удержания.

Из теории автоматических систем управления [20] известно, что для устойчивости следящей системы, содержащей одну нелинейность, укладываемую 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 иллюстрации устойчивости состояний равновесия сравниваемых систем ФАПЧ.

Характеристика ИФД типа «выборка – запоминание», используемого в системе ФАПЧ [16, 17], может иметь вид, представленный на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что верхняя граница вышеупомянутого сектора имеет наклон $K = 1/\pi$. Если величина набега фаз при отработке 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 равен $a = 1/3\pi$.

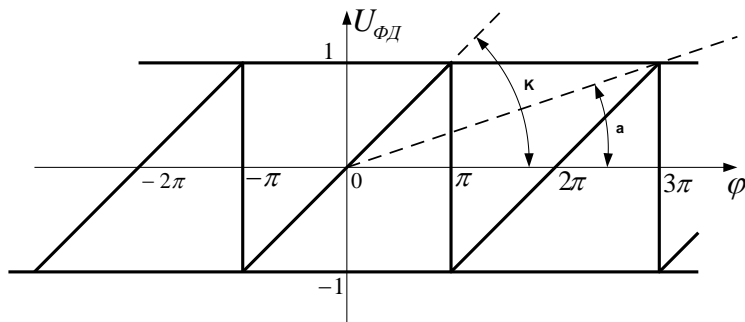


Рис. 1. Дискриминационная характеристика ИФД

Дискриминационная характеристика ЧФД имеет вид, представленный на рис. 2.

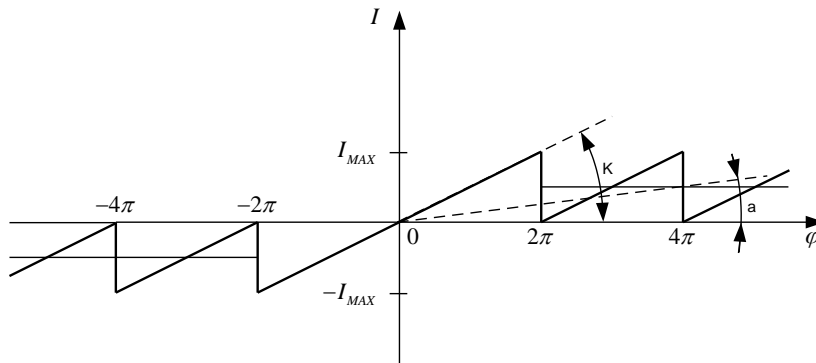


Рис. 2. Дискриминационная характеристика ЧФД

Из рис. 2 видно, что сектор, в который укладывается нормированная по максимальному току накачки I_{max} характеристика ЧФД, будет $[a, K]$, где $K = 1/2\pi$, $a = 1/4\pi$ при набеге фаз 4π . Отметим, что если, например, набег фаз равен 8π , то $a = 1/8\pi$.

Математическая модель системы ФАПЧ с вышеупомянутыми фазовыми дискриминаторами представлена на рис. 3.

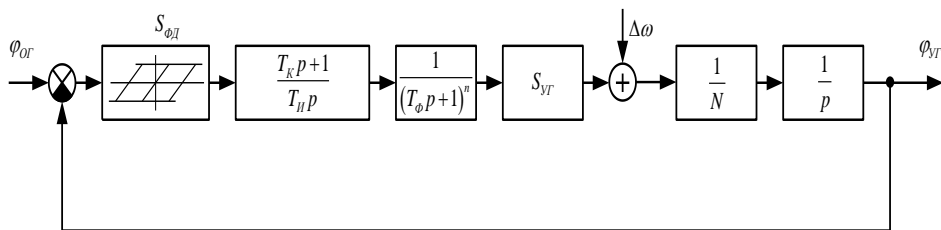


Рис. 3. Математическая модель системы ФАПЧ

Ставится задача сравнить переходные процессы по их длительности в двух упомянутых выше системах ФАПЧ с биномиальными фильтрами нижних частот, обеспечивающими дополнительное подавление негармонических спектральных

составляющих. Параметры систем выбраны так, что устойчивость в «большом», согласно выбранному критерию устойчивости, обеспечена, что иллюстрируется годографами частотных характеристик, приведенными далее.

Экспериментальные исследования. На рис. 4–7 и рис. 8–11 показаны годографы частотных характеристик рассматриваемых систем ФАПЧ с фазовыми дискриминаторами, характеристики которых представлены на рис. 1 и 2 соответственно. В контур ФАПЧ включены биномиальные ФНЧ 2, 3, 4 и 5 порядков, актуальных для подавления негармонических составляющих на 20, 30, 40, 50 дБ соответственно.

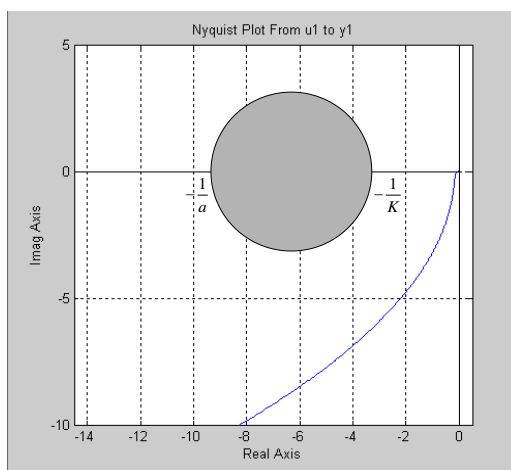


Рис. 4. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 2-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

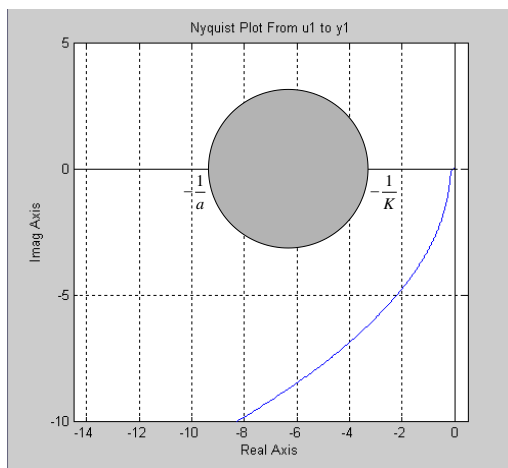


Рис. 5. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 3-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

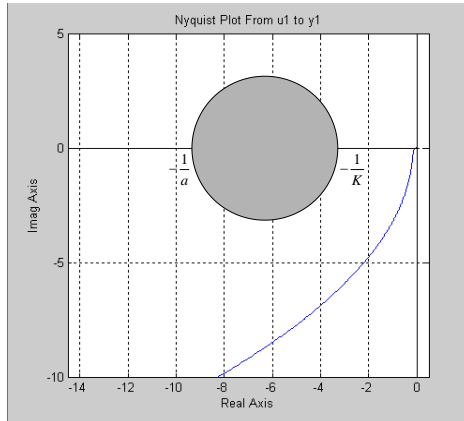


Рис. 6. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

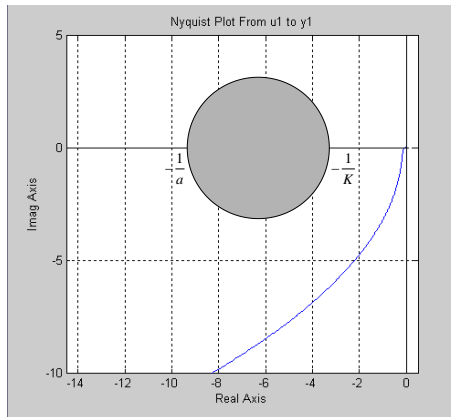


Рис. 7. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 5-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

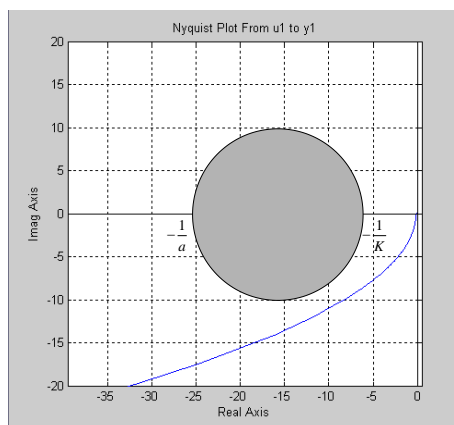


Рис. 8. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 20-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

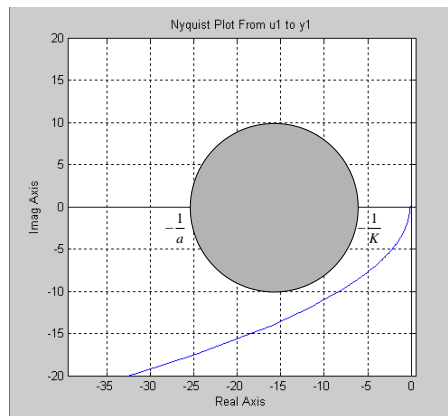


Рис. 9. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 3-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

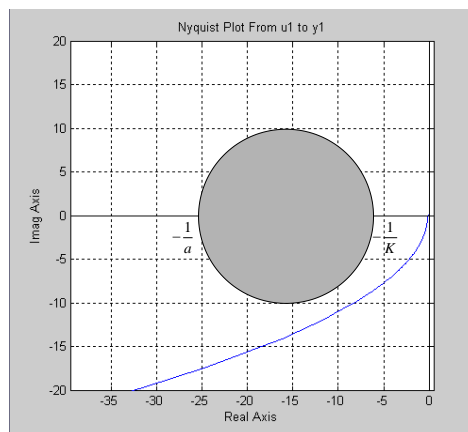


Рис. 10. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

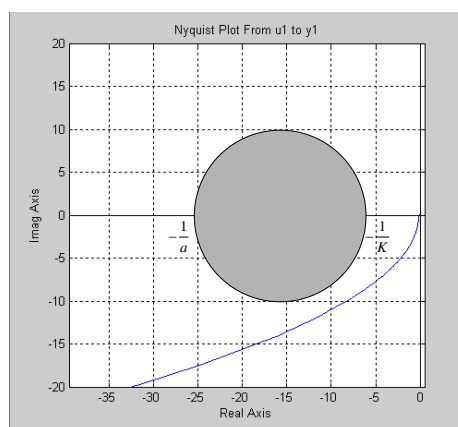


Рис. 11. Годограф частотной характеристики системы ФАПЧ с ФНЧ 5-го порядка и критический круг, образованный нелинейностью системы

Из годографов частотных характеристик системы ФАПЧ, приведенных на рис. 4–7 и рис. 8–11, видно, что, согласно круговому критерию, обе системы ФАПЧ являются устойчивыми в «большом».

Поскольку сравниваемые системы ФАПЧ устойчивы, то проведем анализ переходных процессов в них при различных, нормированных по полосе удержания, начальных расстройках.

На рис. 12–15 показаны графики переходных процессов (зависимость выходного напряжения ИФД (см. рис. 1) от времени) в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при относительных расстройках 0,4, 0,6, 0,8 и 0,9.

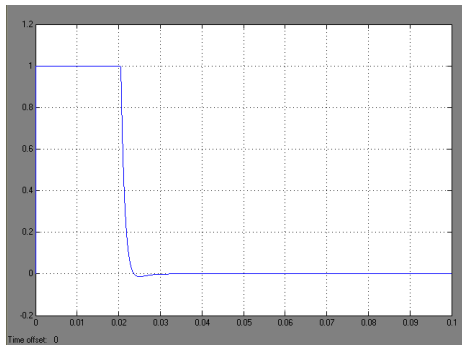


Рис. 12. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,4$

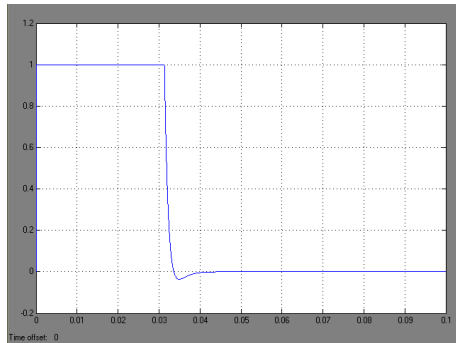


Рис. 13. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,6$

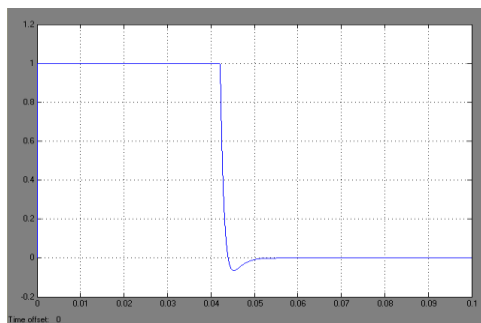


Рис. 14. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,8$

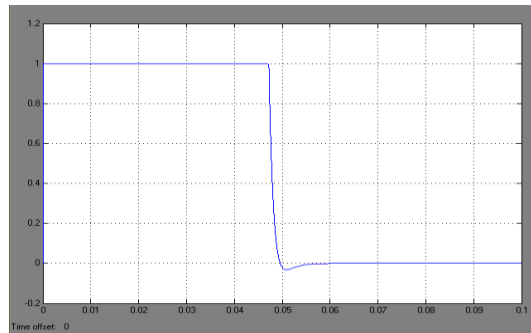


Рис. 15. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,9$

На рис. 16–19 показаны графики переходных процессов (зависимость выходного напряжения ЧФД (см. рис. 2) от времени) в системе с ФНЧ 4-го порядка при относительных расстройках 0,4, 0,6, 0,8 и 0,9.

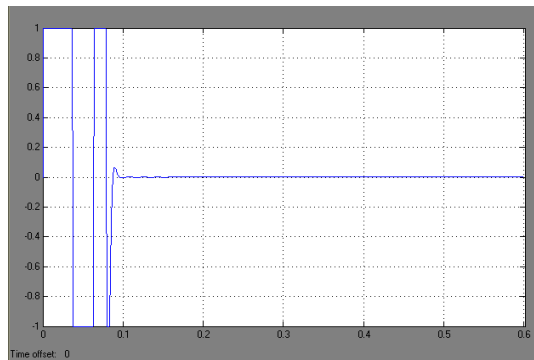


Рис. 16. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,4$

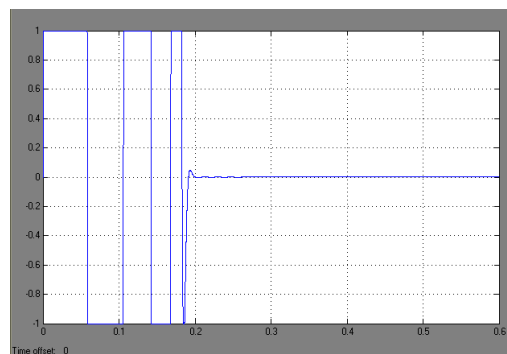


Рис. 17. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,6$

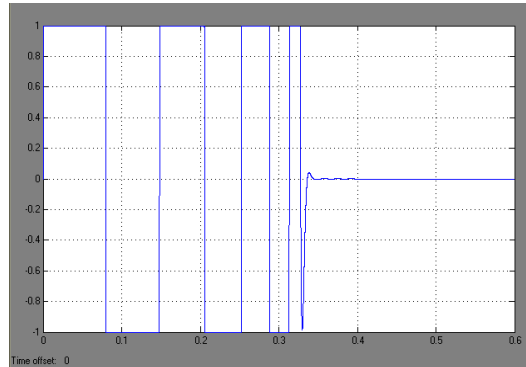


Рис. 18. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,8$

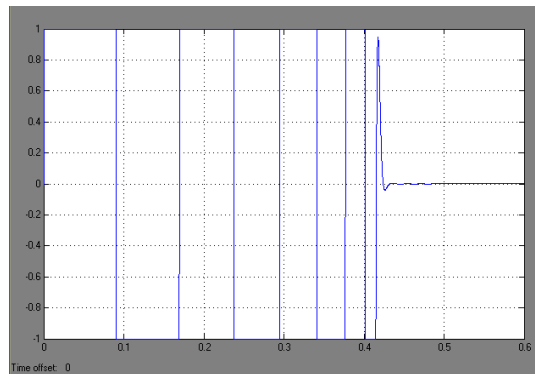


Рис. 19. График переходного процесса в системе ФАПЧ с ФНЧ 4-го порядка при $\Delta\gamma = 0,9$

Выводы. Из графиков, приведенных на рис. 12–15 и рис. 16–19, видно, что при больших расстройках по частоте обе системы ФАПЧ не теряют устойчивости, но переходные процессы имеют меньшую длительность в случае, когда управление процессами в фазовом контуре производится в соответствии с техническими решениями, представленными в [16, 17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геложье 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.
2. 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.
3. 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. – Vol. Com-20, No. 2. – P. 94-104.
4. Yukawa J., Mori S. A binary quantized digital phase-locked loop // IECE. – 1973. – Vol. 56-A, No. 12. – P. 79-85.
5. Van Trees H.L. Functional Techniques for the Analysis of the Nonlinear Behavior of Phase – Locked Loops // Proc. IEEE. – August 1964. – Vol. 52. – P. 894-911.
6. Lindsey W.C. Synchronization Systems in Communication and Control, Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1972.

7. Mengali U., Aldo N. D'Andrea. Synchronization techniques for digital receivers. – Plenum Press, New York, 1997.
8. 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. – P. 35-45.
9. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Управление процессами в фазовой системе автоподстройки частоты цифровых синтезаторов частоты в критических режимах // Материалы четырнадцатого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». г. Донецк, 15-18 апреля 2013г. В 3-х т. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 26-29.
10. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь. 1989. – 232 с.
11. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Исследование переходных процессов в системе ФАПЧ ЦСЧ в критических режимах // Международная научно-практическая конференция «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы», г. Донецк, Украина, 2014.
12. Gardner F.M. Hangup in Phase – Lock Loops // IEEE Trans. Commun., COM – 25. – Oct. 1977. – P. 1210-1214.
13. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Анализ устойчивости контура фазовой автоподстройки частоты, функционирующего при больших возмущениях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (157). – С. 102-107.
14. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Организация процессов управления в системе фазовой синхронизации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 170-178.
15. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Управление процессами в нелинейном автопилоте // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5 (130). – С. 80-84.
16. А.с. 484617 (СССР). Устройство ИФАПЧ / Геложе Ю.А. 1975. Бюл.№34.
17. А.с. 987818 (СССР). Синтезатор частот / Геложе Ю.А. 1977. Бюл.№1.
18. Геложе Ю.А., Клименко П.П. Управление процессами в нелинейных системах. – М.: Радио и связь, 2006. – 264 с.
19. Сю. Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применения / Перевод с английского / под ред. Ю.И. Топчиева. – Л.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
20. Понов В.М. Об абсолютной устойчивости нелинейных систем автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1961. – Т. 22, № 8. – С. 23-31.

REFERENCES

1. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P. Sistemy fazovoy avtopodstroyki chastoty s FNCh vysokikh porjadkov [Phase-locked loop with a LPF of high order], *Radiosistemy. Radiolokatsionnye ustroystva i sistemy upravleniya, lokatsii i svyazi* [Radio system. Radar devices and systems management, location and communication], 2004, Issue 78.
2. 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.
3. 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, Vol. Com-20, No. 2, pp. 94-104.
4. Yukawa J., Mori S. A binary quantized digital phase-locked loop, *IECE*, 1973, Vol. 56-A, No. 12, pp. 79-85.
5. Van Trees H.L. Functional Techniques for the Analysis of the Nonlinear Behavior of Phase – Locked Loops, *Proc. IEEE*, August 1964, Vol. 52, pp. 894-911.
6. Lindsey W.C. Synchronization Systems in Communication and Control, Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1972.
7. Mengali U., Aldo N. D'Andrea. Synchronization techniques for digital receivers. Plenum Press, New York, 1997.
8. 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.

9. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P., Maksimov A.V. Upravlenie protsessami v fazovoy sisteme avtopodstroyki chastoty tsifrovyykh sintezatorov chastoty v kriticheskikh rezhimakh [Management of processes in the system phase-locked loop digital frequency synthesizer in critical conditions], *Materialy chetyrnadtsatogo Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminara «Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly»*. g. Donetsk, 15-18 aprelya 2013g. [materials of the fourteenth International scientific-practical seminar "Practice and prospects of partnership in the sphere of higher education". Donetsk, April 15-18, 2013], In 3 vol. Vol. 2. Donetsk: DonNTU, 2013, pp. 26-29.
10. Levin V.A., Malinovskiy V.N., Romanov S.K. Sintezatory chastot s sistemoy impul'sno – fazovoy avtopodstroyki [Frequency synthesizers with a system of pulse – phase-locked loop]. Moscow: Radio i svyaz'. 1989, 232 p.
11. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P., Maksimov A.V. Issledovanie perekhodnykh protsessov v sisteme FAPCh TsSCh v kriticheskikh rezhimakh [The study of transient processes in the PLL CSC in critical conditions], *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly»*, g. Donetsk, Ukraina, 2014 [International scientific-practical conference "Practice and prospects of partnership development in the sphere of higher education", Donetsk, Ukraine, 2014].
12. Gardner F.M. Hangup in Phase – Lock Loops, *IEEE Trans. Commun.*, COM – 25. – Oct. 1977, pp. 1210-1214.
13. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P., Maksimov A.V. Analiz ustoychivosti kontura fazovoy avtopodstroyki chastoty, funktsioniruyushchego pri bol'shikh vozmushcheniyakh [Researching algorithms control angle list being provided requirement dynamics characteres of system in critical situation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (157), pp. 102-107.
14. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P., Maksimov A.V. Organizatsiya protsessov upravleniya v sisteme fazovoy sinkhronizatsii [Organization of correlated functioning of phase-locked system elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 2 (91), pp. 170-178.
15. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P., Maksimov A.V. Upravlenie protsessami v nelineynom avtopilote [Researching transitional processes in nonlinear autopilot], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 5 (130), pp. 80-84.
16. A.s. 484617 (USSR). Ustroystvo IFAPCh [The device IFPC], Gelozhe Yu.A. 1975. Bulletin No. 34.
17. A.s. 987818 (USSR). Sintezator chastot [The frequency synthesizer], Gelozhe Yu.A. 1977. Bulletin No. 1.
18. Gelozhe Yu.A., Klimenko P.P. Upravlenie protsessami v nelineynykh sistemakh [Management of processes in nonlinear systems]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 264 p.
19. Syu. D., Meyer A. Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i ee primeneniya [Modern automatic control theory and its applications], Translation from English, Ed. by Yu.I. Topcheeva. Leningrad: Mashinostroenie, 1972, 544 p.
20. Popov V.M. Ob absolyutnoy ustoychivosti nelineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [On the absolute stability of nonlinear systems of automatic control the control], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1961, Vol. 22, No. 8, pp. 23-31.

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

Гелозе Юрий Андреевич – 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 – e-mail: rts@tsure.ru; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Максимов Александр Викторович – e-mail: kafmps@tpark.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328058; кафедра встраиваемых систем; доцент.

Gelozhe Yury Andreevich – Southern Federal University; e-mail: rts@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: + 78634371637; the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – e-mail: rts@tsure.ru, the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

Maksimov Aleksandr Viktorovich – e-mail: kafmps@tpark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

УДК 621.371.332.4

С.Г. Грищенко, Н.Н. Кисель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ СЛОЖНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Задачи рассеяния электромагнитных волн многослойными объектами, расположенными на границе раздела (над границей или под границей) являются очень важными в радиолокации и связи. Разработан оригинальный алгоритм, улучшающий классические лучевые методы электродинамического анализа многослойных сред. Для решения задачи использован модифицированный метод геометрической оптики. Траектории лучей в модели многослойной среды представлены в виде набора направленных отрезков, каждый из которых есть геометрический путь луча между двумя соседними границами раздела сред. Разработан и протестирован оригинальный рекуррентный алгоритм определения лучей, многократно переотраженных между границами многослойной среды и рассеянных в направлении точки наблюдения. Модель подстилающей поверхности представлена в виде многослойного полупространства, шероховатость границ которого удовлетворяет критерию Релея. Описание алгоритма включает учет таких свойств многослойной среды, как потери в материале структуры, переотраженные в структуре лучи, кривизну фронта падающей волны и границ раздела сред. Модифицированный алгоритм геометрической оптики эффективнее, чем классический лучевой метод анализа объектов произвольной формы. Результаты для трехмерной задачи в виде тела вращения произвольной формы, полученные с помощью модифицированного оптического алгоритма, продемонстрировали их правильность. Получены численные результаты для многослойного тела вращения произвольной формы, расположенного в свободном пространстве и на подстилающей поверхности. Обсуждены вопросы нахождения центров рассеяния сложных многослойных структур.

Рассеяние электромагнитных волн; траектории лучей; многослойная среда; сложный многослойный рассеиватель; тело вращения; произвольно искривленная граница; рекуррентный алгоритм.

S.G. Grishchenko, N.N. Kisel

DEFINITION OF SCATTERING CENTERS OF COMPLEX MULTILAYERED STRUCTURES

Radar and communication problems of electromagnetic scattering by multilayer objects placed on boundary (up boundary or under boundary) are very important. Original algorithm improving classic ray methods of multilayer media electromagnetic analysis is developed. The modify method of geometrical optics is used to solve the problem. Ray tracing in a multilayered media model are presented by directed segments, each of which has a geometric path of the ray between the two neighboring boundaries. The original recurrent algorithm of determination of rays multiply reflected between boundaries of the multilayered media and scattering in the interest direction is created and tested. In this paper the model of the underlying surface is presented as the plane-layered half-space, the roughness of the interfaces which satisfies the Raleigh criterion. A description of that method including some details about multilayered media such as structure