

17. *Preobrazhenskiy N.B., Fayzulkhakov Ya.R.* Problema kompensatsii releevskikh zamiraniy v radiokanalakh podvizhnykh sistem golosovoy svyazi [The problem of compensation for Rayleigh fading in radio channels of mobile voice communication systems], *Informatika i ee primeneniye* [Informatics and its application], 2011, Vol. 5, Issue 2, pp. 82-89.
18. *Collings I.B., Moore J.B.* An HMM approach to adaptive demodulation of QAM signals in fading channels, 1994. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acs.4480080503>.
19. *Sun Q., Qi W.* Soft-Demodulation Algorithm for 64-QAM And it's application in HSPA+. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiao tong University, Beijing, China. 2012.
20. *Shilian Zheng, Xiaoyu Zhou, Shichuan Chen, Peihan Qi, and Xiaoni Yang.* DemodNet: Learning Soft Demodulation from Hard Information Using Convolutional Neural Network, 2020.
21. *Athar W., Sadath Hossain A.H.M, Erman M.* MIMO Channel Equalization and Symbol Detection using Multilayer Neural Network. School of Engineering, Dept of Electrical Engineering Blekinge Institute of Technology. 371 79 Karlskrona. Sweden.

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

**Марьев Александр Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: aamarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

**Понимаш Захар Алексеевич** – e-mail:ponimashz@mail.ru; тел.: +79885464739; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Maryev Alexander Alexandrovich** – Southern Federal University; e-mail: aamarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; associate professor.

**Ponimash Zahar Alekseevich** – e-mail: ponimashz@mail.ru; phone: +79885464739; the department of fundamentals of radio engineering; graduate student.

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-190-199

**А.М. Пилипенко, И.В. Бондаренко**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ С УЧЕТОМ ПОРЯДКА ПЕТЛЕВОГО ФИЛЬТРА\***

*Представлены модели синтезаторов частот с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) для диапазона 4,4...4,99 ГГц, который является наиболее перспективным для систем связи 5G в Российской Федерации. Рабочая полоса 4,4...4,99 ГГц предназначена для обеспечения беспроводной связи стандарта 5G в пределах города и не используется другими беспроводными сетями связи гражданского или военного назначения. Целью данной работы является определение оптимальных параметров системы ФАПЧ, позволяющих обеспечить максимальное ослабление паразитных составляющих спектра (ПСС) при минимальном времени установления заданной частоты на выходе синтезатора в полосе выделенной для систем связи 5G. В соответствии с поставленной целью в статье были решены следующие задачи: математическое описание системы ФАПЧ с петлевыми фильтрами различных порядков; анализ частотных характеристик системы ФАПЧ с петлевыми*

---

\* Публикация осуществляется в рамках проекта «Разработка нового учебного курса "Методы математического и компьютерного моделирования элементов и устройств инфокоммуникационных систем"», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2022/2023 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

фильтрами различных порядков; определение оптимальных параметров системы ФАПЧ. В качестве параметров оптимизации использовались отношение постоянных времени петлевого фильтра и запас устойчивости системы ФАПЧ. Для решения поставленных задач был проведен расчет зависимостей ослабления ПСС от параметров оптимизации для случаев применения петлевых фильтров 2-го, 3-го и 4-го порядков. Кроме того, был выполнен анализ зависимостей времени установления заданной частоты от оптимизируемых параметров в трехмерном координатном базисе и определены минимальные значения времени установления частоты для каждого из используемых петлевых фильтров. Показано, что применение петлевых фильтров высокого порядка с оптимальными параметрами позволяет существенно повысить уровень ослабления высших ПСС и одновременно уменьшить время установления заданной частоты. В частности, петлевой фильтр 4-го порядка позволяет обеспечить ослабление высших ПСС на 18 дБ больше и время установления заданной частоты на 12,5% меньше, чем петлевой фильтр 2-го порядка. Кроме того, применение фильтра 4-го порядка позволяет повысить ослабление основной ПСС на 5 дБ по сравнению с петлевым фильтром 2-го порядка.

Система связи 5G; синтезатор частот; фазовая автоподстройка частоты; паразитные составляющие спектра; быстроедействие.

**A.M. Pilipenko, I.V. Bondarenko**

### **MODELING AND PARAMETERS OPTIMIZATION OF A PHASE-LOCKED LOOP SYSTEM WITH CONSIDERATION OF THE LOOP FILTER ORDER**

*Frequency synthesizer models with a phase-locked loop (PLL) system have been obtained for the 4,4...4,99 GHz range, which is the most promising for the fifth generation (5G) communication systems in the Russian Federation. The 4,4...4,99 GHz operating band is intended to provide wireless communications of the 5G standard within the city and is not used by other wireless communications networks for civil or military purposes. The goal of this work is to determine the parameters of a PLL system to implement the frequency synthesizer that provides maximum attenuation of spurs with the minimum setting time of the specified frequency in the band allocated for 5G communication systems. In accordance with the present goal, the following problems are solved: description of frequency synthesizers models based on a PLL system with loop filters of various orders; analysis of the transfer characteristics of the PLL system in the frequency domain; determination of the dependences of the PLL system spurs attenuation and the operation speed upon the order and the parameters of loop filters; calculation of the optimal parameters of the loop filters to ensure maximum spurs attenuation and minimum setting time of the specified frequency. To solve the assigned problems, the dependences of the spurs attenuation upon the optimization parameters were calculated for the cases of using loop filters of the 2nd, 3rd and 4th orders. In addition, an analysis of the dependences of the setting time upon the optimized parameters was performed. It has been shown that the use of high-order loop filters with optimal parameters can significantly increase the level of attenuation of higher spurs and at the same time reduce the setting time of the specified frequency. In particular, the fourth-order loop filter makes it possible to provide 18 dB more attenuation of higher spurs and 12,5% less setting time of the specified frequency than the second-order loop filter. In addition, the use of higher-order filters makes it possible to increase the attenuation of the main spurs by 5 dB compared to the second-order loop filter.*

*5G communication system; frequency synthesizer; phase-locked loop; spurious spectral components; operation speed.*

**Введение.** В настоящее время в России продолжается развитие систем связи пятого поколения (5G). Для разработки приемопередающих модулей систем связи 5G необходимы синтезаторы частот для следующих диапазонов: FR1 (410 МГц – 7,125 ГГц) и FR2 (24,25 ГГц – 71 ГГц) [1, 2]. В частности, диапазон частот FR1 предназначен для обеспечения связи в пределах города. Рабочая полоса 4,4...4,99 ГГц в диапазоне частот FR1 является наиболее перспективной для реализации систем связи 5G в Российской Федерации, так как данная полоса не используется другими беспроводными сетями связи гражданского или военного назначения [3].

Целью данной работы является определение оптимальных параметров системы ФАПЧ, позволяющих обеспечить максимальное ослабление паразитных составляющих спектра (ПСС) при минимальном времени установления синтезируемой частоты в полосе, выделенной для систем связи 5G.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- ◆ математическое описание системы ФАПЧ с петлевыми фильтрами различных порядков;
- ◆ анализ частотных характеристик системы ФАПЧ с петлевыми фильтрами различных порядков;
- ◆ определение оптимальных параметров системы ФАПЧ.

**1. Структура синтезатора частот и математическое описание системы ФАПЧ.** Синтезатор частот с ФАПЧ (рис. 1) содержит следующие узлы: опорный генератор (ОГ); делитель опорной частоты ( $\div R$ ); частотно-фазовый детектор (ЧФД); фильтр нижних частот (ФНЧ); генератор, управляемый напряжением (ГУН); делитель частоты ГУН ( $\div N$ ) [4].

ЧФД, ФНЧ, ГУН и делитель частоты  $\div N$  являются элементами системы ФАПЧ. Математические модели данных элементов в линейном режиме работы системы ФАПЧ описаны ниже.

Ток на выходе ЧФД имеет вид:

$$I_D = K_D \varphi, \quad (1)$$

где  $K_D$  – крутизна характеристики ЧФД;  $\varphi$  – разность фаз сигналов на входах ЧФД.

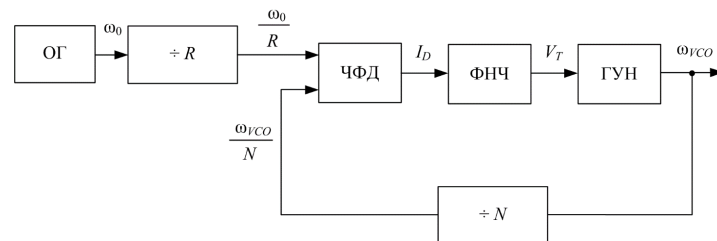


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот с ФАПЧ

ФНЧ системы ФАПЧ (петлевой фильтр) описывается операторным передаточным сопротивлением

$$Z(s) = \frac{V_T}{I_D}, \quad (2)$$

где  $s = j\omega$  – оператор Лапласа;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $V_T$  – напряжение на входе ГУН.

Частота ГУН прямо пропорциональна напряжению на его входе:

$$\omega_{VCO} = K_V V_T, \quad (3)$$

где  $K_V$  – крутизна характеристики ГУН.

Коэффициент передачи делителя частоты ГУН равен  $1/N$ .

Соотношение между разностью фаз  $\varphi$  и разностью частот  $\omega$  сигналов на входах ЧФД имеет вид

$$\varphi = \int_0^t \omega dt,$$

где  $\omega = \frac{\omega_0}{R} - \frac{\omega_{VCO}}{N}$ .

Как известно, интегрирование мгновенной частоты соответствует делению ее операторного изображения на  $s$ . Таким образом, знаменатель передаточной функции разомкнутой системы ФАПЧ будет содержать оператор Лапласа  $s$ . Выражение для передаточной функции разомкнутой системы ФАПЧ имеет следующий вид [5]:

$$G(s) = \frac{K_D K_V Z(s)}{Ns}. \quad (4)$$

Передаточная функция замкнутой системы ФАПЧ определяется следующим образом [6]:

$$W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}. \quad (5)$$

Для ослабления ПСС в современных синтезаторах частот используются петлевые фильтры 2-го, 3-го и 4-го порядков (рис. 2) [7].

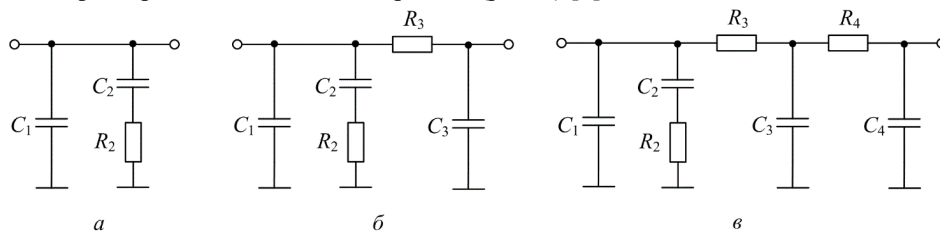


Рис. 2. Принципиальные схемы пассивных петлевых фильтров 2-го порядка (а), 3-го порядка (б) и 4-го порядка (в)

Передаточные сопротивления пассивных петлевых фильтров 2-го, 3-го и 4-го порядков соответственно имеют вид

$$Z_2(s) = \frac{1 + sT_2}{sC_0(1 + sT_1)}; \quad (6)$$

$$Z_3(s) = \frac{1 + sT_2}{sC_0(1 + sT_1)(1 + sT_3)}; \quad (7)$$

$$Z_4(s) = \frac{1 + sT_2}{sC_0(1 + sT_1)(1 + sT_3)(1 + sT_4)}, \quad (8)$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – постоянные времени петлевых фильтров;  $C_0$  – общая емкость петлевого фильтра.

Соотношения, связывающие постоянные времени и общую емкость петлевого фильтра со значениями сопротивлений и емкостей его элементов приведены в [7].

Следует отметить, что в современных синтезаторах частот также применяются активные петлевые фильтры, которые позволяют обеспечить требуемый уровень напряжения на входе ГУН для перестройки синтезатора частот в широких

пределах [8, 9]. Передаточная функция активного петлевого фильтра с точностью до постоянного множителя совпадает с передаточной функцией пассивного петлевого фильтра соответствующего порядка, поэтому результаты данной работы будут справедливы для синтезаторов частот как с пассивным фильтром, так и с активным фильтром.

**2. Анализ частотных характеристик системы ФАПЧ.** Обобщенная передаточная функция разомкнутой системы ФАПЧ определяется на основании выражений (4), (6)–(8):

$$G(s) = \frac{K_D K_V}{N} \frac{1 + sT_2}{s^2 C_0 (1 + sT_1)(1 + sT_3)(1 + sT_4)}. \quad (9)$$

Значения крутизны характеристики ЧФД  $K_D$  и крутизны характеристики ГУН  $K_V$  содержатся в технических описаниях соответствующих элементов.

Коэффициент деления частоты ГУН имеет вид:

$$N = \sqrt{N_{\min} N_{\max}}, \quad (10)$$

где  $N_{\min} = f_{VCO \min} / f_{PFD}$  и  $N_{\max} = f_{VCO \max} / f_{PFD}$ ;  $f_{VCO \min}$  и  $f_{VCO \max}$  – минимальная и максимальная частоты ГУН;  $f_{PFD}$  – частота сравнения.

Постоянные времена  $T_1$  и  $T_2$  определяются численными методами из следующих уравнений [10, 11]:

$$\psi = \arctg(\omega_c T_2) - \arctg(\omega_c T_1) - \arctg(\omega_c T_3) - \arctg(\omega_c T_4); \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{\gamma}{\omega_c^2 (T_1 + T_3 + T_4)}, \quad (12)$$

где  $\gamma$  – основной параметр оптимизации;  $\psi$  – запас устойчивости системы ФАПЧ;  $\omega_c = 2\pi f_c$  – частота среза системы ФАПЧ.

Постоянные времена  $T_3$  и  $T_4$  имеют следующие значения:

$T_3 = T_4 = 0$  – для петлевого фильтра 2-го порядка;

$T_3 = \lambda T_1, T_4 = 0$  – для петлевого фильтра 3-го порядка;

$T_3 = \lambda T_1, T_4 = \lambda^2 T_1$  – для петлевого фильтра 4-го порядка,

где  $\lambda$  – вспомогательный параметр, оптимальное значение которого равно единице [10].

Общая емкость системы ФАПЧ рассчитывается по формуле [12]:

$$C_0 = \frac{K_D K_V}{N \omega_c^2} \sqrt{\frac{1 + \omega_c^2 T_2^2}{(1 + \omega_c^2 T_1^2)(1 + \omega_c^2 T_3^2)(1 + \omega_c^2 T_4^2)}}. \quad (13)$$

С учетом выражений (10)–(13) передаточные функции (4) и (5) можно представить в виде зависимостей от частоты и оптимизируемых параметров

$$G(s) = G(\omega, \gamma, \psi) \text{ и } W(s) = W(\omega, \gamma, \psi).$$

**3. Определение оптимальных параметров системы ФАПЧ.** Оптимальные значения параметров  $\gamma$  и  $\psi$  должны обеспечивать максимальное ослабление ПСС при минимальном времени установления частоты.

Уровень ослабления ПСС можно определить по формуле [13]:

$$L_k = -20 \lg |W(\omega, \gamma, \lambda)|_{\omega=k\omega_{PFD}}, \quad (14)$$

где  $k$  – номер ПСС;  $\omega_{PFD} = 2\pi f_{PFD}$ .

Частота сравнения  $f_{PFD}$  определяется полосой частот одного канала системы связи [14].

Время установления заданной частоты определяется максимальной постоянной времени замкнутой системы ФАПЧ

$$t_L = 5 \max(\tau_k). \quad (15)$$

Постоянные времени замкнутой системы ФАПЧ будем определять с помощью следующего соотношения:

$$\tau_k = \frac{1}{|\operatorname{Re}(p_k)|}, \quad (16)$$

где  $p_k$  – полюсы функции  $W(s)$ .

Полюсы функции  $W(s)$  – это значения  $s = p_k$ , при которых знаменатель  $W(s)$  равен нулю. Полагая, что  $W(s) = A(s)/B(s)$ , полюсы функции  $W(s)$  можно найти из уравнения

$$B(s)|_{s=p_k} = 0. \quad (17)$$

Нетрудно показать, что знаменатель  $W(s)$  представляет собой степенной полином  $(n + 1)$ -порядка, где  $n$  – порядок петлевого фильтра. Таким образом, корни уравнения (17) можно найти методом Лагерра, который реализован, например, в программе компьютерной математики Mathcad [15, 16].

На рис. 3 представлены зависимости ослабления основной ПСС ( $k = 1$ ) от оптимизируемых параметров  $\gamma$  и  $\psi$  при использовании петлевых фильтров различных порядков. Указанные зависимости определялись для модели синтезатора частот, соответствующей системам связи 5G:  $f_{VCO \min} = 4,4$  ГГц;  $f_{VCO \max} = 4,99$  ГГц;  $f_{PFD} = 5$  МГц;  $f_c = f_{PFD}/10 = 500$  кГц;  $K_D = 5/2\pi$  мА/рад;  $K_V = 2\pi \cdot 337 \cdot 10^6$  (рад/с)/В [17–21].

Как видно из рис. 3 ослабление ПСС возрастает при увеличении параметра оптимизации  $\gamma$  и уменьшении запаса устойчивости  $\psi$ . Однако, при таком изменении параметров  $\gamma$  и  $\psi$  возрастает время установления заданной частоты [7], таким образом оптимальные значения параметров  $\gamma$  и  $\psi$  необходимо определять из условия минимума времени установления заданной частоты (16).

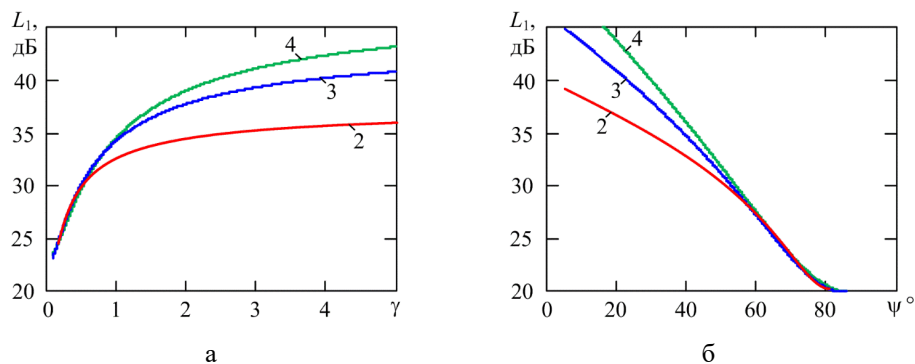


Рис. 3. Зависимости ослабления основной ПСС от параметра оптимизации  $\gamma$  при  $\psi = 45^\circ$  (а) и от запаса устойчивости  $\psi$  при  $\gamma = 1$  (б) для случаев применения петлевых фильтров 2-го, 3-го и 4-го порядков

На рис. 4 представлены зависимости времени установления заданной частоты от оптимизируемых параметров  $t_L(\gamma, \psi)$  при использовании петлевых фильтров различных порядков. Анализ зависимостей  $t_L(\gamma, \psi)$  позволяет определить оптимальные параметры системы ФАПЧ.

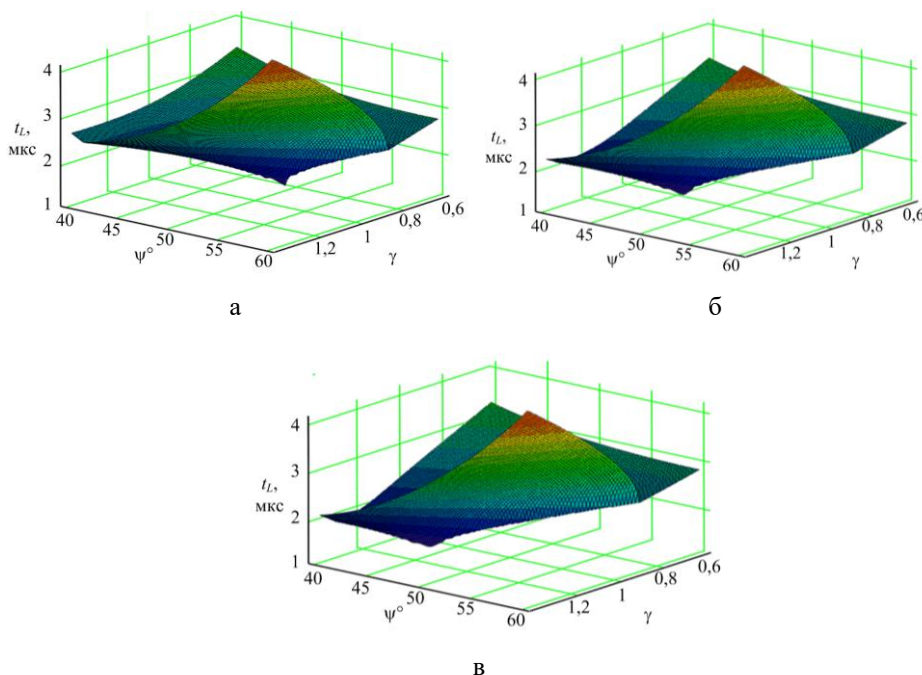


Рис. 4. Зависимости времени установления заданной частоты от оптимизируемых параметров  $\gamma$  и  $\psi$  при использовании петлевого фильтра 2-го порядка (а), 3-го порядка (б) и 4-го порядка (в)

В табл. 1 приведены оптимальные параметры системы ФАПЧ и соответствующие этим параметрам минимальные значения времени установления заданной частоты при использовании петлевых фильтров различных порядков. Кроме того, в табл. 1 приведены уровни ослабления основной и высших ПСС, рассчитанные для найденных оптимальных параметров.

Таблица 1

#### Оптимальные параметры и характеристики системы ФАПЧ

Порядок петлевого фильтра	$\gamma$	$\psi^\circ$	$t_L$ , мкс	$L_1$ , дБ	$L_2$ , дБ	$L_3$ , дБ
2	1	53	1,6	30	43	50
3	1,15	49	1,5	34	51	61
4	1,21	47	1,4	35	55	68

Как видно из табл. 1 с ростом порядка петлевого фильтра увеличивается оптимальное значения параметра  $\gamma$  и уменьшается оптимальное значение запаса устойчивости. Применение фильтров высокого порядка обеспечивает существенное снижение уровня высших ПСС ( $k \geq 2$ ) при одновременном уменьшении уровня основной ПСС ( $k = 1$ ) и времени установления заданной частоты.

**Заключение.** В данной работе проведено моделирование синтезаторов частот, предназначенных для систем связи 5G. Полученные результаты позволяют определить оптимальные параметры системы ФАПЧ для обеспечения максимального ослабления ПСС при минимальном времени установления синтезируемой частоты.

Показано, что применение петлевых фильтров высокого порядка с оптимальными параметрами позволяет существенно повысить уровень ослабления высших ПСС и одновременно уменьшить время установления заданной частоты. В частности, петлевой фильтр 4-го порядка позволяет обеспечить ослабление высших ПСС на 18 дБ больше и время установления заданной частоты на 12,5% меньше, чем петлевой фильтр 2-го порядка. Кроме того, применение фильтра 4-го порядка позволяет повысить ослабление основной ПСС на 5 дБ по сравнению с петлевым фильтром 2-го порядка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3GPP TS 38.104 V18.0.0, Base Station (BS) radio transmission and reception; Technical Specification Group Radio Access Network, 3rd Generation Partnership Project, 2022.
2. Fang D., Qian Y., Hu R.Q. Security for 5G Mobile Wireless Networks // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 4850-4874.
3. Мовчан А.К., Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1 // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 17-23. – DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23.
4. Pilipenko A. M. Increasing Operation Speed of Frequency Synthesizers Using Nonlinear Control in Phase-Locked Loop System // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 2021. – P. 385-388. – DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494078.
5. Pilipenko A.M. Simulation and parameters optimization of hybrid frequency synthesizers for wireless communication systems // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan, 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998453.
6. Бесекерский В.Л., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
7. Vanerjee D. PLL Performance, Simulation and Design. – 5th ed. – Dog Ear Publishing, LLC, 2017. – 500 p.
8. Харни О., Иоффе Д. Разработка точной петли фазовой автоподстройки частоты с высоковольтным ГУН // Компоненты и технологии. – 2010. – № 7 (108). – С. 138-142.
9. Chenakin A. Frequency Synthesizers: Concept to Product. – Norwood, MA: Artech House, 2011. – 214 p.
10. Pilipenko A.M. Parameter Optimization of Frequency Synthesizers for 5G Communication Systems // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russian Federation, 2023. – P. 276-279. – DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202136.
11. Rohde U.L., Rubiola E., Whitaker J.C. Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. – 2nd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2021. – 816 p.
12. Best R.E. Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 490 p.
13. Шахтарин Б.И., Прохладин Г.Н., Иванов А.А., Быков А.А., Чечулина А.А., Гречищев Д.Ю. Синтезаторы частот: учеб. пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 128 с.
14. Пилипенко А.М., Кольцов А.А. Анализ переходных процессов в синтезаторах частот с различными характеристиками нелинейного звена в контуре фазовой автоподстройкой частоты // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 52-63. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-6-52-63.
15. Press WH., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. – 3rd ed. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 1235 p.
16. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 832 с.



17. Kuai L., Hong W., Chen J., Zhou H. A Frequency Synthesizer for LO in Millimeter-wave 5G Massive MIMO System // 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – Singapore, 2019. – P. 1014-1016.
18. HMC586LC4B Wideband MMIC VCO w/ Buffer Amplifier, 4 – 8 GHz, Data Sheet, Analog Devices, 2017. – <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/ee-HMC586LC4BTR-R5.pdf>.
19. PLL Frequency Synthesizer ADF4106, Data Sheet, Analog Devices, 2012. – <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/670927/AD/ADF4106BCPZ.html>.
20. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. – Rev. 9. – Nexperia B.V. 2020.
21. Пилипенко А.М. Исследование быстродействия гибридных синтезаторов частот // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 15-30.

## REFERENCES

1. 3GPP TS 38.104 V18.0.0, Base Station (BS) radio transmission and reception; Technical Specification Group Radio Access Network, 3rd Generation Partnership Project, 2022.
2. Fang D., Qian Y., Hu R.Q. Security for 5G Mobile Wireless Networks, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 4850-4874.
3. Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. Raschet oslableniya signala setey sotovoy svyazi 5G dlya chastot diapazona FR1 [Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for frequencies of the FR1 band], *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2022, Vol. 25, No. 1, pp. 17-23. DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23.
4. Pilipenko A. M. Increasing Operation Speed of Frequency Synthesizers Using Nonlinear Control in Phase-Locked Loop System, *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 2021*, pp. 385-388. DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494078.
5. Pilipenko A.M. Simulation and parameters optimization of hybrid frequency synthesizers for wireless communication systems, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan, 2017*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998453.
6. Besekerskiy V.L., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. 4th ed. Saint Petersburg: Izd-vo «Professiya», 2003, 752 p.
7. Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design. 5th ed. Dog Ear Publishing, LLC, 2017, 500 p.
8. Kharni O., Ioffe D. Razrabotka tochnoy petli fazovoy avtopodstroyki chastoty s vysokovol'tnym GUN [Designing High-Performance Phase-Locked Loops with High-Voltage VCOs], *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2010, No. 7 (108), pp. 138-142.
9. Chenakin A. Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood, MA: Artech House, 2011, 214 p.
10. Pilipenko A.M. Parameter Optimization of Frequency Synthesizers for 5G Communication Systems, *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russian Federation, 2023*, pp. 276-279. DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202136.
11. Rohde U.L., Rubiola E., Whitaker J.C. Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2021, 816 p.
12. Best R.E. Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2007, 490 p.
13. Shakhhtar B.I., Prokhladin G.N., Ivanov A.A., Bykov A.A., Chechulina A.A., Grechishchev D.Yu. Sintezatory chastot: ucheb. posobie [Frequency synthesizers: tutorial]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 128 p.
14. Pilipenko A.M., Koltsov A.A. Analiz perekhodnykh protsessov v sintezatorakh chastot s razlichnymi kharakteristikami nelineynogo zvena v konture fazovoy avtopodstroykoj chastoty [Analysis of transient processes in PLL frequency synthesizers with various characteristics of nonlinear link], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp. 52-63. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-6-52-63.
15. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007, 1235 p.
16. D'yakonov V.P. Entsiklopediya Mathcad 2001i i Mathcad 11 [Encyclopedia Mathcad 2001i and Mathcad 11]. Moscow: SOLON-Press, 2004, 832 p.

17. Kuai L., Hong W., Chen J., Zhou H. A Frequency Synthesizer for LO in Millimeter-wave 5G Massive MIMO System, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore, 2019, pp. 1014-1016.
18. HMC586LC4B Wideband MMIC VCO w/ Buffer Amplifier, 4–8 GHz, Data Sheet, Analog Devices, 2017. Available at: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/ee-HMC586LC4BTR-R5.pdf>.
19. PLL Frequency Synthesizer ADF4106, Data Sheet, Analog Devices, 2012. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/670927/AD/ADF4106BCPZ.html>.
20. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. Rev. 9. Nexperia B.V. 2020.
21. Pilipenko A.M. Issledovanie bystrodeystviya gibridnykh sintezatorov chastot [Research of performance of hybrid frequency synthesizers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), S. 15-30.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

**Пилипенко Александр Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: [ampilipenko@sfedu.ru](mailto:ampilipenko@sfedu.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

**Бондаренко Иван Владимирович** – ПАО «Яковлев», филиал «Региональные самолеты»; e-mail: [vanya5911@mail.ru](mailto:vanya5911@mail.ru); г. Таганрог, Россия; инженер-конструктор.

**Pilipenko Alexandr Mikhaylovich** – Southern Federal University; e-mail: [ampilipenko@sfedu.ru](mailto:ampilipenko@sfedu.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the department.

**Bondarenko Ivan Vladimirovich** – PJSC «Yakovlev», branch «Regional aircraft»; e-mail: [vanya5911@mail.ru](mailto:vanya5911@mail.ru); Taganrog, Russia; design engineer.

УДК 004.42+004.3; 57.08+615.47+615.8 DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-199-211

### А.В. Проскураков

#### АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РЕАЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОНЦЕПЦИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЕРИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ФРАГМЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Рассматриваются подходы и их анализ к проектированию и реализации медицинских информационных систем на базе концепции киберфизической системы для решения задач верификации состояния фрагментов медицинских биологических объектов в процессе диагностики заболеваний. Показана актуальность разработки средств и методов автоматизации процессов диагностики и лечения на базе передовых технологий с повсеместным внедрением медицинских информационных систем (МИС), медицинских автоматизированных информационных систем (МАИС), медицинских автоматизированных диагностических информационных систем (МАДИС) на базе комплекса технических средств (КТС) вычислительной техники (ВТ), комплекса программных средств (КПС,) системных и инструментальных, сетевых технологий и вычислительных сетей, новых информационных технологий в целом, при реализации модели развития отечественного производства технологического оборудования и медицинских изделий. Сделан анализ, что должна включать в свой состав, по какому принципу строиться, каким принципам построения удовлетворять МИС, как киберфизическая система (КФС). Показана технологическая последовательность, представляющая собой анализ рентгенографических изображений, принятие решений на основании анализа этих изображений, постановка диагноза на основании принятых решений подсистемой принятия решений МИС, которые должны осуществляться путем разработки и применения алгоритмов автоматизации процесса диагностики, реализуемых*