

15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 1, pp. 201-204.
16. *Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A.* Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpol'yusnika [Equivalent scheme of a crosslinking four-pole], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 162-169. ISSN 1064 2269. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017. pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* Fundamentals of Circuit Theory. Moscow: YuRight Publishing, 2013, 285 p.
19. *Vlakh I., Singkhal K.* Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and design of electronic circuits]: trans. from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
20. The Schur Complement and Its Applications, ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. Springer Verlag, 2005, Vol. 4, 295 p.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2021668540 «Programma dlya polunatural'nogo modelirovaniya nelineynoy sistemy s ispol'zovaniem chetyrekhpol'yusnogo predstavleniya fil'tra Puankare-Steklova» [Certificate of state registration of the computer program No. 2021668540 "Program for semi-natural modeling of a non-linear system using a four-pole representation of the Poincare-Steklov filter"].

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Р.Г. Шаповалов.

**Максимов Михаил Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [maksimovm@mail.ru](mailto:maksimovm@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

**Максимова София Михайловна** – Политехнический институт филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»; e-mail: [sofiamaksimova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaksimova.2003@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623414; учебная часть; студентка.

**Maksimov Mikhail Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: [maksimovm@mail.ru](mailto:maksimovm@mail.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Maksimova Sofia Mikhailovna** – Polytechnic Institute branch of the Don State Technical University in Taganrog; e-mail: [sofiamaksimova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaksimova.2003@mail.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634623414; academic unit; student.

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-52-63

**А.М. Пилипенко, А.А. Кольцов**

### **АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА В КОНТУРЕ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ**

*Рассмотрены синтезаторы частот на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в которых используются фазовые детекторы (ФД) с различными нелинейными передаточными характеристиками. Целью данной работы является оценка быстродействия синтезаторов частот в зависимости от вида нелинейности ФД и математическое описание нелинейной характеристики ФД, обеспечивающей максимальное быстродействие синтезатора частот. В соответствии с поставленной целью в статье были решены следующие задачи: разработана обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ; описаны математические модели статических характеристик нелинейного звена системы ФАПЧ при использовании различных видов известных ФД и модифицированного*

*ФД с апериодической характеристикой; выполнен анализ динамики системы ФАПЧ при изменении статической характеристики нелинейного звена. Модифицированный ФД обеспечивает релейное управление процессами установления заданной частоты в синтезаторе при возникновении большого фазового рассогласования. Получены численные оценки быстродействия синтезатора частот в зависимости от начального отклонения частоты при использовании известных ФД и модифицированного ФД. Показано, что применение модифицированного ФД позволяет уменьшить время установления частоты примерно в 1,5 раза по сравнению с наилучшим по быстродействию известным ФД. Определены оптимальные значения управляющего сигнала, обеспечивающие максимальное быстродействие синтезатора частот с модифицированным ФД при заданных отклонениях частоты в режиме больших возмущений. Результаты данной работы справедливы для синтезаторов частот на основе ФАПЧ UHF, L, S и C-диапазонов (от 300 МГц до 8 ГГц), используемых в беспроводных системах связи четвертого поколения (4G) и пятого поколения (5G).*

*Синтезатор частот; фазовая автоподстройка частоты; ФАПЧ; модель; переходный процесс; быстродействие.*

**A.M. Pilipenko, A.A. Koltsov**

### **ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN PLL FREQUENCY SYNTHESIZERS WITH VARIOUS CHARACTERISTICS OF NONLINEAR LINK**

*Phase-locked loop (PLL) frequency synthesizers that use phase detectors (PD) with various nonlinear transfer characteristics have been considered. The goal of this work is comparative analysis of the frequency synthesizers operation speed depending on the type of the PD nonlinearity and mathematical description of the PD nonlinear characteristic which ensure the maximum operation speed of the frequency synthesizer. In accordance with the present goal, the following problems are solved in this work: the generalized model of the PLL frequency synthesizer is developed; mathematical models of static characteristics of the PLL system nonlinear link are described when using various types of known PDs and a modified PD with aperiodic characteristic; the analysis of the PLL system dynamics when changing the static characteristic of the nonlinear link is carried out. The modified PD provides relay control of transient processes when a large phase difference occurs. Numerical evaluation of the PLL synthesizers operation speed depending on the initial frequency deviation have been obtained when using known PDs and the modified PD. It is shown that the use of the modified PD allows to reduce frequency settling time about 1.5 times in comparison with the best in operation speed conventional PD. Optimal values of the control signal ensuring the maximum operation speed of the PLL synthesizer with the modified PD have been obtained for the specified frequency deviations in the large disturbance mode. The results of this work are valid for PLL frequency synthesizers of the UHF, L, S and C-bands (from 300 MHz to 8 GHz) which are used in wireless communication systems of the fourth generation (4G) and the fifth generation (5G).*

*Frequency synthesizer; phase-locked loop; PLL; model; transient process; operation speed.*

**Введение.** Синтезаторы частот на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) широко используются в беспроводных системах связи различных диапазонов частот, включая системы связи четвертого поколения (4G) и пятого поколения (5G) [1]. Основное достоинство синтезаторов с ФАПЧ – это широкий диапазон рабочих частот (максимальная частота выходного сигнала может достигать 32 ГГц) [2].

Высокое быстродействие синтезатора частот необходимо для обеспечения перестройки системы связи на новую несущую частоту за минимальный интервал времени. Быстрая перестройка несущей частоты обеспечивает возможность задействовать максимальное число элементов частотно-временной матрицы (ресурсных блоков), выделенных системе связи и, соответственно, повысить скорость передачи данных. Кроме того, высокое быстродействие синтезатора частот позволяет реализовать скачкообразную перестройку рабочей частоты, которая повышает безопасность передачи информации и помехоустойчивость системы связи [3].

Повышение быстродействия синтезатора частот возможно за счет расширения полосы пропускания системы ФАПЧ, но при этом возрастает уровень паразитных составляющих спектра и высокочастотных шумов в выходном сигнале. В этой связи для уменьшения времени перестройки частоты широко применяются методы нелинейной коррекции статической характеристики фазового детектора (нелинейного звена) в контуре ФАПЧ [4].

**Целью данной работы** является оценка быстродействия синтезаторов частот в зависимости от вида характеристики детектирования и математическое описание нелинейной характеристики детектирования, обеспечивающей максимальное быстродействие синтезатора частот.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- ◆ описание математических моделей статических характеристик нелинейного звена системы ФАПЧ при использовании различных видов фазовых детекторов (ФД);
- ◆ разработка обобщенной модели синтезатора частот с ФАПЧ;
- ◆ анализ динамики системы ФАПЧ при изменении статической характеристики нелинейного звена.

**1. Структура синтезатора частот с ФАПЧ.** Синтезатор частот с ФАПЧ состоит из следующих функциональных узлов (рис. 1) [5]: опорный генератор (ОГ); делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД); фазовый детектор (ФД); фильтр нижних частот (ФНЧ); генератор управляемый напряжением (ГУН); делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД).

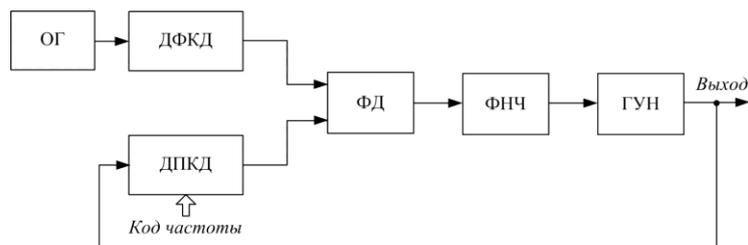


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот с ФАПЧ

Опорный генератор формирует сигнал с фиксированной частотой  $f_0$ , который поступает на опорный делитель частоты. Фазовый детектор формирует управляющий сигнал пропорциональный разности фаз сигналов на его входах. Управляющий сигнал проходит через петлевой фильтр, который подавляет паразитные составляющие спектра и обеспечивает формирование напряжения для автоматической подстройки выходной частоты ГУН.

Выходная частота ГУН  $f_{VCO}$  изменяется пропорционально уровню напряжения на его входе и определяется через опорную частоту  $f_0$  с помощью следующего выражения:

$$f_{VCO} = \frac{N}{R} f_0 \cdot \quad (1)$$

**2. Математические модели фазовых детекторов.** В настоящее время известны четыре основных типа ФД, применяющихся в синтезаторах частот с ФАПЧ [5–8]:

- ◆ фазовый детектор на основе аналогового перемножителя (АФД);
- ◆ импульсный фазовый детектор на основе элемента «Исключающее ИЛИ – XOR» (ИФД-XOR);
- ◆ импульсный фазовый детектор на основе JK-триггера (ИФД-JK);

♦ частотно-фазовый детектор (ЧФД), состоящий из двух D-триггеров и элемента «И».

Статическая характеристика детектирования ФД представляет собой зависимость уровня сигнала на выходе ФД от разности фаз сигналов на его входах. В случае малого фазового рассогласования сигналов на входах ФД  $\varphi \ll \pi/2$  для всех рассмотренных выше видов ФД можно полагать, что характеристика детектирования является линейной и описывается следующей функцией:

$$F_0(\varphi) = K_D \varphi, \quad (2)$$

где  $K_D$  – крутизна характеристики детектирования.

Следует отметить, что для аналогового фазового детектора и импульсных фазовых детекторов выходным сигналом является напряжение. В современных частотно-фазовых детекторах на выходе включается зарядно-разрядное устройство (пара переключаемых источников тока с общей нагрузкой) выходным сигналом которого является ток  $I_{cp}$ . Однако, для разработки обобщенной модели синтезатора частот с ФАПЧ в качестве выходного сигнала ЧФД удобнее рассматривать вспомогательное напряжение [9]:

$$U_D = I_{cp} R_D,$$

где  $R_D$  – эквивалентное сопротивление зарядно-разрядного устройства (от 1,5 до 15 кОм).

На рис. 2 приведены характеристики детектирования перечисленных выше ФД, имеющие крутизну  $K_D$  [5].

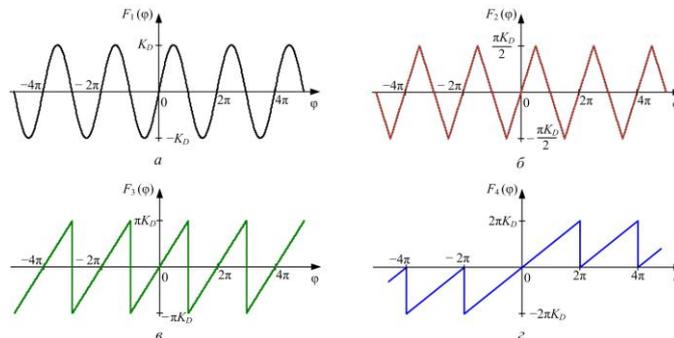


Рис. 2. Статические характеристики фазовых детекторов (а – АФД, б – ИФД-ХОР, в – ИФД-ЖК, г – ЧФД)

Аналитическое выражение для характеристики детектирования АФД известно, и имеет вид функции синуса [5]. Аналитические выражения для характеристик детектирования ИФД-ХОР, ИФД-ЖК и ЧФД можно записать на основе комбинаций тригонометрических и обратных тригонометрических функций, позволяющих моделировать треугольные и пилообразные колебания [10]. Ниже представлены аналитические выражения для характеристик детектирования АФД, ИФД-ХОР, ИФД-ЖК и ЧФД соответственно:

$$F_1(\varphi) = K_D \sin \varphi; \quad (3)$$

$$F_2(\varphi) = K_D \arcsin(\sin \varphi); \quad (4)$$

$$F_3(\varphi) = 2K_D \arctg\left(\tg \frac{\varphi}{2}\right); \quad (5)$$

$$F_4(\varphi) = \begin{cases} 2K_D \left\{ \arctg \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi - \pi}{2} \right) \right] - \frac{\pi}{2} \right\}, & \varphi < 0; \\ 2K_D \left\{ \arctg \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi - \pi}{2} \right) \right] + \frac{\pi}{2} \right\}, & \varphi \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из рис. 2 видно, что характеристики детектирования известных ФД являются периодическими функциями с периодом равным  $2\pi$ . Для АФД, ИФД-ХОР и ИФД-ЖК периодичность характеристик детектирования имеет место на всем интервале изменения разности фаз  $\varphi$ . Характеристика детектирования ЧФД при  $\varphi < 0$  и  $\varphi \geq 0$  описывается разными периодическими функциями, которые смещены друг относительно друга вдоль оси ординат на величину  $\pi$ , но при этом имеют одинаковую форму.

Периодичность характеристик известных ФД приводит к биениям в управляющем сигнале, и, соответственно, к увеличению времени установления заданной частоты при большом рассогласовании между частотами сигналов на входах ФД. Большое рассогласование частот сравниваемых сигналов может быть вызвано как необходимостью перестройки частоты ГУН в широких пределах, так и аномальными внешними возмущениями, такими как

- ◆ резкие изменения напряжения питания синтезатора частот;
- ◆ воздействие на синтезатор частот высокочастотных помех.

В настоящей работе предлагается использовать модифицированный ЧФД с апериодической характеристикой, которая показана на рис. 3.

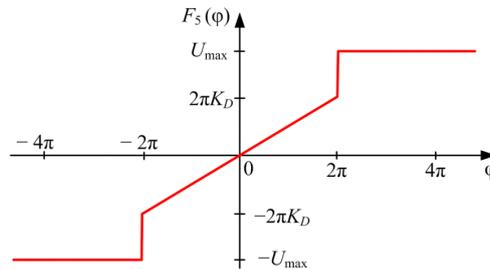


Рис. 3. Статическая характеристика модифицированного ЧФД

Скачкообразное изменение тока модифицированного ЧФД при большом фазовом рассогласовании может быть реализовано с помощью специализированного ЧФД «непрерывного времени» с дополнительным зарядно-разрядным устройством [11].

Статическая характеристика модифицированного ЧФД описывается следующим выражением:

$$F_5(\varphi) = \begin{cases} -U_{\max}, & \varphi < -2\pi; \\ K_D \varphi, & -2\pi \leq \varphi \leq 2\pi; \\ U_{\max}, & \varphi > 2\pi. \end{cases} \quad (7)$$

Модифицированный ЧФД работает в линейном режиме при  $|\varphi| \leq 2\pi$  и переходит в релейную область при наличии большого фазового рассогласования  $|\varphi| > 2\pi$ . Данный принцип управления позволяет устранить биения управляющего сигнала и повысить быстродействие синтезатора частот [12, 13].

Дополнительное зарядно-разрядное устройство модифицированного ЧФД в релейной области вырабатывает постоянный выходной ток  $I_d = U_{\max}/R_D$ , который больше, чем максимальный ток в линейной области  $I_{cp} = U_D/R_D$ . Значение  $I_d$  определяется только знаком фазового рассогласования и не зависит от величины фазового рассогласования, поэтому система ФАПЧ может быстро вернуться в линейную область.

**3. Обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ.** На рис. 4 показана обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ, полностью соответствующая структурной схеме данного синтезатора, приведенной на рис. 1.

В обобщенной модели приняты следующие обозначения:  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – частота ОГ;  $\omega_{VCO} = 2\pi f_{VCO}$  – частота ГУН, равная выходной частоте синтезатора;  $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$  – отклонение частоты синтезатора от заданного значения (начальная расстройка по частоте);  $1/R$  – коэффициент деления ДФКД;  $1/N$  – коэффициент деления ДПКД;  $1/s$  – передаточная характеристика интегрирующего звена ( $s = j\omega$  – оператор Лапласа);  $\omega$  и  $\varphi$  – разность частот и разность фаз сигналов на входах ФД;  $F(\varphi)$  – характеристика детектирования ФД;  $U_D$  – напряжение на выходе ФД;  $H_F(s)$  – передаточная характеристика петлевого фильтра;  $U_F$  – управляющее напряжение ГУН;  $K_V$  – крутизна характеристики ГУН.

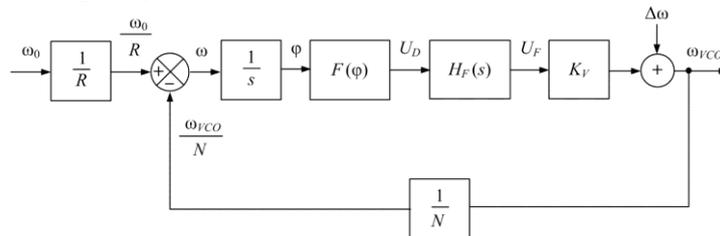


Рис. 4. Обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ

Следует отметить, что в системе ФАПЧ обязательно содержится интегрирующее звено, так как фазовый детектор обеспечивает равенство частот сигналов на его входах путем сравнения фаз данных сигналов. Выражение для характеристики детектирования  $F(\varphi)$  зависит от типа используемого в синтезаторе частот фазового детектора (см. формулы (3)–(7)).

Для обеспечения астатизма второго порядка в системе ФАПЧ, при наличии которого обеспечивается равенство нулю как ошибки по частоте, так и ошибки по фазе, в качестве петлевого ФНЧ используются различные виды пропорционально-интегрирующих фильтров (ПИФ) [14]. Передаточная характеристика ПИФ имеет полюс при  $j\omega = 0$ , т.е. фактически ПИФ содержит интегрирующее звено. Для обеспечения максимального запаса устойчивости системы ФАПЧ и достаточного уровня подавления паразитных составляющих спектра на выходе ФД рекомендуется использовать ПИФ второго порядка [12, 13]. Необходимо отметить, что в петлевой фильтр, как правило, включают операционный усилитель для достижения требуемого уровня напряжения на входе ГУН [15].

Передаточная характеристика ФНЧ, учитывающая описанные выше требования к петлевому фильтру синтезатора частот, имеет следующий вид:

$$H_F(s) = \frac{U_F}{U_D} = K_g \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_0(1 + s\tau_1)}, \quad (8)$$

где  $K_g$  – коэффициент усиления ФНЧ;  $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – постоянные времени ФНЧ.

Значения постоянных времени петлевого фильтра, позволяющие обеспечить максимальный запас устойчивости системы ФАПЧ, определяются с помощью следующих соотношений [16]:

$$\tau_0 = \frac{K_D K_g K_V}{N \omega_b^2}; \quad \tau_1 = \frac{1}{\omega_b} \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1}; \quad \tau_2 = \frac{1}{\omega_b} \sqrt{\frac{M}{M-1}}, \quad (9)$$

где  $M$  – показатель колебательности системы ФАПЧ;  $\omega_b = 2\pi f_b$  – базовая частота системы ФАПЧ.

Для обеспечения максимального быстродействия системы ФАПЧ выбираются следующие значения показателя колебательности и базовой частоты системы [13]:

$$M = 1,41; f_b = 0,1 f_{ref}$$

где  $f_{ref} = f_0/R$ .

**4. Численный анализ синтезатора частот во временной области.** Наиболее популярным и достаточно эффективным средством моделирования систем управления во временной области является пакет MATLAB-Simulink [17].

MATLAB-Simulink имеет следующие преимущества в сравнении с другими пакетами схемотехнического проектирования и программами компьютерной математики:

- ◆ возможность построения Simulink-модели непосредственно на основании структурной схемы системы;
- ◆ наибольшее количество методов численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с адаптивным (переменным) размером временного шага;
- ◆ опции выбора максимального, минимального и начального временного шага;
- ◆ контроль точности численного анализа.

Моделирование во временной области выполнялось в MATLAB-Simulink с помощью метода Modified Rosenbrock, который обеспечивает наибольшую точность численного анализа ФАПЧ-синтезаторов частот как в линейном, так и в нелинейном режиме работы [18].

Быстродействие синтезатора частот определяется временем  $t_{set}$ , за которое заданная частота  $f_{set}$  устанавливается с требуемой точностью. Для систем связи 4G/5G предельно допустимое относительное отклонение несущей частоты составляет  $\delta_f = 10^{-7}$  [19]. Таким образом, при  $t \geq t_{set}$  частота синтезатора должна лежать в пределах

$$f_{VCO} = f_{set} \pm \Delta f_{set},$$

где  $\Delta f_{set} = \delta_f f_{set}$  – предельно допустимое абсолютное отклонение выходной частоты ФАПЧ синтезатора.

Далее будем полагать  $f_{set} = 2500$  МГц, следовательно,  $\Delta f_{set} = 250$  Гц и  $f_{VCO} = 2500 \cdot 10^6 \pm 250$  Гц. Остальные параметры ФАПЧ синтезатора для данного диапазона частот были выбраны следующим образом:  $f_0 = 20$  МГц;  $R = 10$ ;  $K_D = 5/2\pi$  В/рад;  $K_g = 5$ ;  $K_V = 40$  МГц/В.

Моделирование во временной области показывает, что в режиме малых возмущений ( $\Delta f \leq 0,1 f_{set}$ ) разность фаз сигналов на входе ФД лежит в пределах линейного участка передаточной характеристики детектирования для всех рассматриваемых в работе типов ФД и переходные процессы в ФАПЧ синтезаторах частот не зависят от типа ФД.

В режиме больших возмущений ( $0,1 f_{set} < \Delta f < f_{set}$ ) вид характеристики детектирования оказывает существенное влияние на характер переходных процессов и время установления частоты синтезатора. На рис. 5 показаны процессы установле-

ния заданной частоты в синтезаторах частот с различными типами ФД при  $\Delta f = 0,6f_{set}$ . На рис. 6 представлены зависимости нормированного времени установления частоты  $\bar{t}_{set} = t_{set}f_b$  от относительного отклонения частоты от заданного значения  $\Delta\bar{f} = \Delta f / f_{set}$  в синтезаторах с различными типами ФД при  $0,1f_{set} < \Delta f < f_{set}$ . Следует отметить, что при  $\Delta f < f_{set}$  переходные процессы и зависимости  $\bar{t}_{set}$  от  $\Delta\bar{f}$  в синтезаторах частот со стандартным и модифицированным ЧФД практически совпадают и не зависят нормированного тока модифицированного ЧФД в релейной области  $\bar{I}_d = I_d / I_{cp}$ .

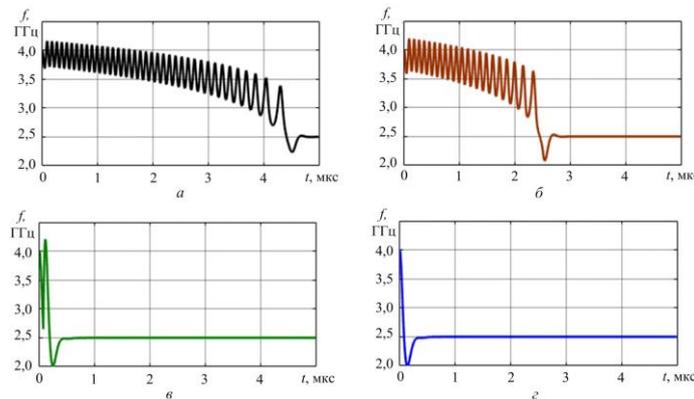


Рис. 5. Переходные процессы в синтезаторах с различными типами ФД при  $\Delta f = 0,6f_{set}$  (а – АФД, б – ИФД-ХОР, в – ИФД-JK, г – ЧФД)

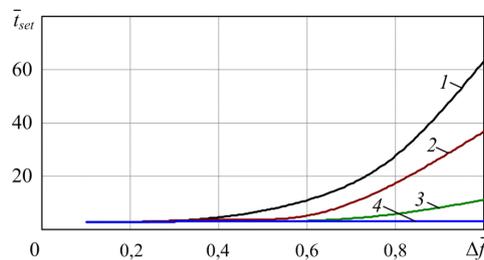


Рис. 6. Зависимости нормированного времени установления частоты от начальной расстройки по частоте в синтезаторах с различными типами ФД при  $\Delta f \leq f_{set}$  (1 – АФД, 2 – ИФД-ХОР, 3 – ИФД-JK, 4 – ЧФД)

Из рис. 5 видно, что при больших возмущениях время установления заданной частоты уменьшается при увеличении ширины линейного участка характеристики детектирования. В частности, наибольшее время установления заданной частоты имеет АФД, наименьшее – стандартный и модифицированный ЧФД. Из рис. 6 следует, что время установления частоты в синтезаторах с АФД и ИФД обоих видов резко возрастает с увеличением отклонения частоты, причем функции роста для АФД и ИФД близки к экспоненциальным функциям с различными показателями степени. Данное свойство АФД и ИФД делает неэффективным их применение в синтезаторах частот при наличии аномальных возмущений ( $\Delta\bar{f} > 1$ ), поэтому далее при  $\Delta\bar{f} > 1$  рассматриваются возможности ЧФД.

На рис. 7 показаны процессы установления заданной частоты в синтезаторах частот со стандартным и модифицированным ЧФД при  $\Delta\bar{f} = 2$  и нормированном токе модифицированного ЧФД в релейной области  $\bar{I}_d = 2$ . Из рис. 7 видно, что применение модифицированного ЧФД с апериодической характеристикой позволяет устранить биения в переходном процессе и уменьшить время установления заданной частоты. Следует отметить, что релейное управление в системе ФАПЧ с модифицированным ЧФД приводит к росту перерегулирования.

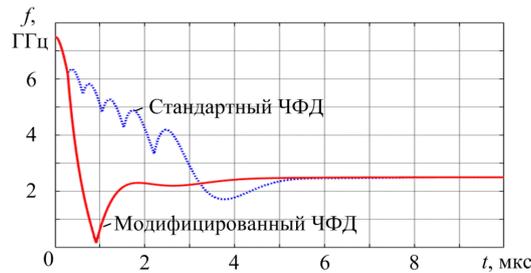


Рис. 7. Переходные процессы в синтезаторах со стандартным и модифицированным ЧФД при  $\Delta f = 2f_{set}$

На рис. 8 показаны зависимости нормированного времени установления частоты от относительного отклонения частоты в синтезаторах со стандартным и модифицированным ЧФД при различных значениях  $\bar{I}_d$ .

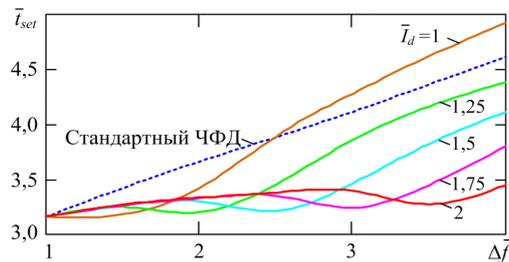


Рис. 8. Зависимости нормированного времени установления частоты от начальной расстройки по частоте в синтезаторах со стандартным ЧФД и модифицированным ЧФД при различных значениях  $\bar{I}_d$

Из рис. 8 видно, что применение модифицированного ЧФД в режиме аномальных возмущений позволяет уменьшить время установления заданной частоты примерно 1,5 раза по сравнению со стандартным ЧФД. Следует отметить, что существует оптимальное значение нормированного тока модифицированного ЧФД  $\bar{I}_{d\ opt}$  в релейной области, которое соответствует минимальному времени установления частоты при заданной начальной расстройке по частоте. Зависимость оптимального тока  $\bar{I}_{d\ opt}$  от начальной расстройки по частоте в синтезаторе с модифицированным ЧФД представлена в работе [20].

**Заключение.** В данной работе были представлены результаты моделирования во временной области синтезаторов частот с различными типами фазовых детекторов. Полученные результаты позволяют оценить быстродействие синтезатора частот в зависимости от вида характеристики детектирования.

В работе показано, что модифицированный ЧФД с аperiodической характеристикой обеспечивает минимальное время установления заданной частоты в режиме аномальных возмущений. Применение модифицированного ЧФД позволяет повысить быстродействие синтезатора частот примерно 1,5 раза по сравнению со стандартным ЧФД.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. Phase Locked Loop (PLL) Synthesizer & Translation Loop. Analog Devices, Inc. Retrieved 17:50, March 22, 2021. – URL: <http://www.analog.com/en/parametricsearch/11322>.
3. *Fang D., Qian Y., Hu R. Q.* Security for 5G Mobile Wireless Networks // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 4850-4874.
4. *Зайцев А.А.* Нелинейное комбинированное управление в системе импульсной фазовой автоподстройки частоты // Тр. Московского физико-технического института. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 48-53.
5. *Best R.E.* Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2007 – 490 p.
6. *Chenakin A.* Frequency Synthesizers: Concept to Product. – Norwood, MA: Artech House, 2011. – 214 p.
7. *Голуб В.* Система ФАПЧ и ее применения // ChipNews. – 2000. – Vol 4. – P. 3-12.
8. *Jansen K., Kennedy M.P.* Comparison of Mathematical and Physical Phase Noise Performance in Fractional-N Synthesizers // 2020 31st Irish Signals and Systems Conference (ISSC). – Letterkenny, Ireland, 2020. – P. 1-6.
9. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. – Rev. 9. – Nexperia B.V. 2020.
10. *Дьяконов В.П.* Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 832 с.
11. *Pan J., Yoshihara T.* A Fast Lock Phase-Locked Loop Using a Continuous-Time Phase Frequency Detector // 2007 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. – Tainan, Taiwan, 2007. – P. 393-396.
12. *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.
13. *Пилипенко А.М.* Исследование быстродействия гибридных синтезаторов частот // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 15-30.
14. *Vaucher C.S.* Architectures for RF Frequency Synthesizers. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 250 p.
15. *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.
16. *Бесекерский В.Л., Понов Е.П.* Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
17. *Дьяконов В.П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 975 с.
18. *Pilipenko A.M.* Testing of Numerical Simulation Methods for Hybrid Frequency Synthesizers // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russia, 2019. – P. 384-387.
19. *Пилипенко А.М.* Выбор оптимальных параметров синтезаторов частот для систем связи стандарта LTE Advanced // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2017): Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2017. – С. 115-119.
20. *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.

## REFERENCES

1. 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.
2. Phase Locked Loop (PLL) Synthesizer & Translation Loop. Analog Devices, Inc. Retrieved 17:50, March 22, 2021. Available at: <http://www.analog.com/en/parametricsearch/11322>.
3. Fang D., Qian Y., Hu R. Q. Security for 5G Mobile Wireless Networks, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 4850-4874.
4. Zaitsev A.A. Nelineynoe kombinirovannoe upravlenie v sisteme impul'snoy fazovoy avtopodstroyki chastoty [The compound nonlinear mode of operation of the pulse phase-locked-loop frequency control system], *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta* [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology], 2009, Vol. 1, No. 2, pp. 48-53.
5. Best R.E. Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. 6th ed., New York: McGraw-Hill, 2007, 490 p.
6. Chenakin A. Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood, MA: Artech House, 2011, 214 p.
7. Golub V. Sistema FAPCh i ee primeneniya [PLL system and its applications], *ChipNews*, 2000, No. 4, pp. 3-12.
8. Jansen K., Kennedy M.P. Comparison of Mathematical and Physical Phase Noise Performance in Fractional-N Synthesizers, *2020 31st Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. Letterkenny, Ireland, 2020, pp. 1-6.
9. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. Rev. 9. Nexperia B.V. 2020.
10. D'yakonov V.P. Ehntsiklopediya Mathcad 2001i i Mathcad 11 [Encyclopedia Mathcad 2001i and Mathcad 11]. Moscow: SOLON-Press, 2004, 832 p.
11. Pan J., Yoshihara T. A Fast Lock Phase-Locked Loop Using a Continuous-Time Phase Frequency Detector, *2007 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*. Tainan, Taiwan, 2007, pp. 393-396.
12. 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.
13. 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, pp. 15-30.
14. Vaucher C.S. Architectures for RF Frequency Synthesizers. New York, Kluwer Academic Publishers, 2002, 250 p.
15. 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.
16. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg: Professiya, 2004, 752 p.
17. D'yakonov V.P. MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov [MATLAB and SIMULINK for radio engineers]. Moscow: DMK Press, 2013, 975 p.
18. Pilipenko A.M. Testing of Numerical Simulation Methods for Hybrid Frequency Synthesizers, *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 384-387.
19. Pilipenko A.M. Vybór optimal'nykh parametrov sintezatorov chastot dlya sistem svyazi standarta LTE Advanced [Choice of optimal parameters of frequency synthesizers for communications systems of LTE Advanced standard], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2017): Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer and information technologies in science, engineering and management (ComTech-2017): Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation], 2017, pp. 115-119.
20. 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.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Демьяненко.

**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.; зав. кафедрой.

**Кольцов Алексей Анатольевич** – e-mail: [aleksey.kolcov.97@mail.ru](mailto:aleksey.kolcov.97@mail.ru); кафедра теоретических основ радиотехники; студент.

**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.; head of the department.

**Koltsov Alexey Anatolyevich** – e-mail: [aleksey.kolcov.97@mail.ru](mailto:aleksey.kolcov.97@mail.ru); the department of fundamentals of radio engineering; student.