

УДК 621.396

## АНАЛИЗ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С ПЕТЛЕЙ ФАП

**Б.И. Шахтарин, А.А. Федотов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: fdotovaa@yandex.ru

*Проанализирована работа системы синтеза дискретного множества частот или сокращенно синтезатора частот на базе косвенного метода построения с использованием системы фазовой автоподстройки частоты. Описаны принципы функционирования синтезатора частот с фазовой автоподстройкой, спроектированной на основе генератора подкачки заряда. Предложено несколько вариантов схемотехнического исполнения фазового детектора, входящего в состав петли системы фазовой автоподстройки, с использованием логических элементов с различными принципами работы. Приведены структурные схемы системы и математическая модель. Представлены результаты имитационного моделирования в системе Simulink программного пакета MATLAB синтезатора частот с фазовым детектором, построенным на основе D-триггеров и логического элемента "или-не". Рассмотрено влияние порядка фильтра нижних частот на время захвата петель фазовой автоподстройки требуемого сигнала.*

**Ключевые слова:** синтезатор частот, фазовая автоподстройка с генератором подкачки, фазовый детектор с генератором подкачки.

## ANALYSIS OF FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PHASE-LOCKED LOOP

**B.I. Shakhtarin, A.A. Fedotov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: fdotovaa@yandex.ru

*The operation of a system for synthesis of discrete frequency set (or a frequency synthesizer) based on the indirect method of construction using a phase-locked loop (PLL) is analyzed. The operating principles of a frequency synthesizer with PLL designed on the basis of a charge pump are described. Several variants of circuitry embodiment of the phase detector (included in the PLL) are offered with the use of gates with different operating principles. The system's skeleton diagrams and mathematical model are given. Results of simulating the frequency synthesizer with a phase detector designed on the basis of D triggers and a NOR gate in the Simulink system of the MATLAB software package are presented. The influence of an order of low-pass filter on the time of the required signal capture by PLL is considered.*

**Keywords:** frequency synthesizer, PLL with charge-pump, phase detector with charge-pump.

Синтезаторы частот являются одними из основных элементов, применяемых повсеместно в сферах телекоммуникации, радиолокации, навигации, радио- и телевидения. Быстрое развитие микропроцессорной и компьютерной техники оказывает сильное влияние на развитие радиопередающей

техники. Постоянное совершенствование функциональных характеристик и эксплуатационных возможностей, а также удешевление стоимостных показателей приводит к тому, что в руках разработчика современной радиоэлектроники оказывается инструмент, позволяющий добиться решения любых поставленных задач.

Методы синтеза частот можно разделить на несколько групп: активный (косвенный) синтез (с использованием петель фазовой автоподстройки (ФАП)), пассивный (прямой) синтез (цифровой или аналоговый), а также комбинированный, являющийся сочетанием нескольких методов синтеза.

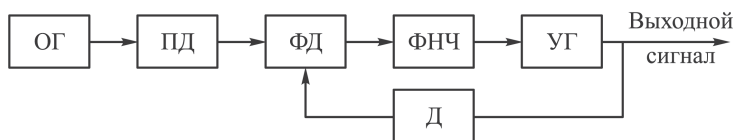
Основными преимуществами для применения в современных мобильных устройствах синтезатора частот косвенного типа по сравнению с синтезаторами частот прямого типа являются: простота цифровой реализации, низкая потребляемая мощность, высокая рабочая частота, высокая степень миниатюризации устройств, низкая стоимость. Данная система способна генерировать сигнал определенной частоты, восстанавливать сигнал из зашумленного канала передачи данных или создавать сигналы синхронизации в логических микросхемах.

В настоящее время синтезаторы на основе ФАП с подкачкой заряда (англ. charge-pump PLL или CP-PLL) широко применяются в различной портативной радиоаппаратуре как специального, так и бытового назначения. Отличные характеристики, простота использования и низкая стоимость интегральных микросхем, а также бурное развитие технологий GSM и GPS привело к тому, что ФАП данного вида можно встретить почти в любом мобильном телефоне, навигаторе, планшетном компьютере и др. Именно поэтому авторы настоящей работы считают, что рассмотрение вопросов, касающихся принципов функционирования ФАП с подкачкой заряда, является крайне необходимым.

### **Принципы функционирования синтезатора частот с петлей ФАП.**

Синтезаторы частот служат источниками опорных колебаний в радиоприемниках, радиопередатчиках и других устройствах, в которых необходимо воспроизвести широкий диапазон различных частот при обеспечении их высокой стабильности.

Достаточно часто синтезаторы частот выполняют по схеме с ФАП [1]. Данный вид синтезатора (рис. 1) представляет собой систему, состоящую из опорного генератора (ОГ), постоянного делителя (ПД), фазового детектора (ФД), фильтра нижних частот (ФНЧ), генератора, управляемого напряжением (УГ), и делителей частоты (ПД и Д).



**Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот с ФАП:**

ОГ — опорный генератор; ПД — постоянный делитель; ФД — фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот или петлевой фильтр; УГ — генератор, управляемый напряжением; Д — делитель переменным коэффициентом деления

Эталонное колебание в такой схеме вырабатывается ОГ и, проходя через ПД (задает ширину канала), поступает на ФД. Фазовый детектор сравнивает фазы подающихся на его входы воздействий и формирует выходной сигнал, пропорциональный их разности. Данный разностный сигнал (сигнал ошибки), проходя через ФНЧ, управляет генератором, частота которого увеличивается или уменьшается. Варьируя коэффициент деления (Д), можно изменять выходную частоту синтезатора.

**Описание работы синтезатора частот с петлей ФАП.** Напряжение на выходе ФД зависит от разности фаз  $\varphi$  сигналов, поступающих на его вход. После прохождения ФНЧ, на котором происходит фильтрация (подавляются высокочастотные составляющие) и при необходимости усиление, сигнал попадает на УГ:

$$V = K_{\text{ФД}} \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right), \quad (1)$$

где  $K_{\text{ФД}}$  — коэффициент преобразования фаза–напряжение в ФД;  $\varphi$  — разность фаз опорного и выходного с УГ сигнала.

Поступающее напряжение управляет частотой выходного сигнала УГ:

$$f = f_0 + K_{\text{УГ}} V, \quad (2)$$

где  $K_{\text{УГ}}$  — коэффициент преобразования напряжение–частота в ФД;  $f_0$  — частота собственных колебаний УГ. Как только УГ захватил опорный сигнал, то

$$f = f_{\text{оп}}. \quad (3)$$

Подставляя уравнения (2) и (1) в равенство (3), получаем значение для разности фаз (сигнал ошибки):

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{f_{\text{оп}} - f_0}{K_{\text{оп}} K_{\text{ФД}}}. \quad (4)$$

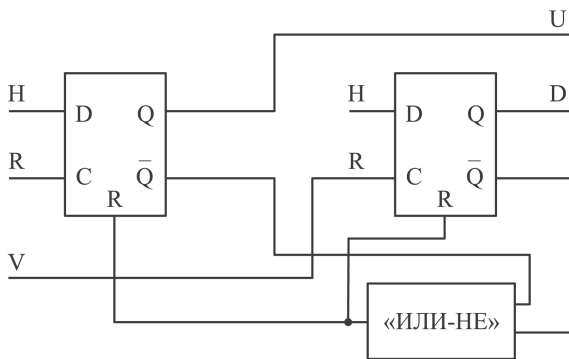
**Принципы функционирования ФАП с подкачкой заряда.** Теоретические принципы функционирования системы ФАП с подкачкой заряда впервые были полно обоснованы Ф. Гарднером в своих работах, датированных 1980-м и 1982-м годами.

Рассматривать принципы работы ФАП с подкачкой заряда начнем с изучения основ функционирования ФД. Существуют несколько основных типов ФД, работающих либо с сигналами прямоугольной формы, либо оперирующих на основе прихода фронтов.

К первому типу ФД можно отнести простой логический элемент “Исключающее ИЛИ” (XOR) [2].

Фазовый детектор данного типа работает следующим образом: при синфазных сигналах на входах логического элемента XOR выходной сигнал представляет собой логический ноль; если же входные сигналы сдвинуты относительно друг друга, то в этом случае на выходе логического элемента образуются импульсы с частотой, равной частоте входных сигналов, длительность которых равна сдвигу фаз входных сигналов.

Фазовые детекторы, построенные на данном логическом элементе, имеют высокую степень линейности.



**Рис. 2. Последовательный фазовый детектор**

Поскольку на выходе ФД данной конфигурации присутствуют остаточные пульсации, результатом которых является паразитная модуляция выходного сигнала, требуется проводить последующую фильтрацию в контуре ФАП.

Второй тип ФД чувствителен к положению фронтов сравниваемого (входного) сигнала и сигнала с УГ относительно друг друга [3, 4]. Фазовый детектор содержит в своем составе некоторые элементы памяти — защелки, регистры и др. Последовательный фазовый детектор (ПФД) (рис. 2) выполнен на основе двух D-триггеров.

На вход  $H$  подается уровень логической единицы, на вход  $R$  поступает сигнал с источника опорной частоты, а на вход  $V$  — сигнал с управляемого генератора. Оба выхода  $U$  и  $D$  могут одновременно находиться в состоянии логического нуля или же один из них может быть в состоянии логической единицы. Основным преимуществом данной схемы является то, что уровни на выходах  $U$  и  $D$  никогда одновременно не будут равны логической единице. В данном случае инверсные выходы триггеров будут иметь уровень логического нуля, что приведет к появлению на выходе логического элемента «ИЛИ-НЕ» высокого уровня, который сбросит оба триггера в состояние низкого уровня. Управление ПФД происходит задними фронтами входных сигналов на входах  $V$  и  $R$ .

Рассмотрим подробнее принципы функционирования генератора подкачки заряда [5].

Основной задачей генератора подкачки заряда является преобразование логических состояний на выходе ФД в аналоговый вид, удобный для дальнейшего управления генератором УГ. Генератор подкачки представляет собой трехпозиционный электронный переключатель с положениями: нижнее, верхнее и нейтральное.

Основными преимуществами использования ФД такого вида по сравнению с обычной реализацией ФД являются высокая степень линейности и низкая стоимость микросхем, а также уникальность нейтрального ( $N$ ) положения. В момент, когда фазовая ошибка будет равна малому значению (петля ФАП «замкнулась»), на выходах ФД будет уровень логического нуля, т.е. генератор подкачки заряда находится в положении  $N$ . Следовательно, фильтр ФНЧ будет подключен к разомкнутой цепи, что препятствует появлению шума.

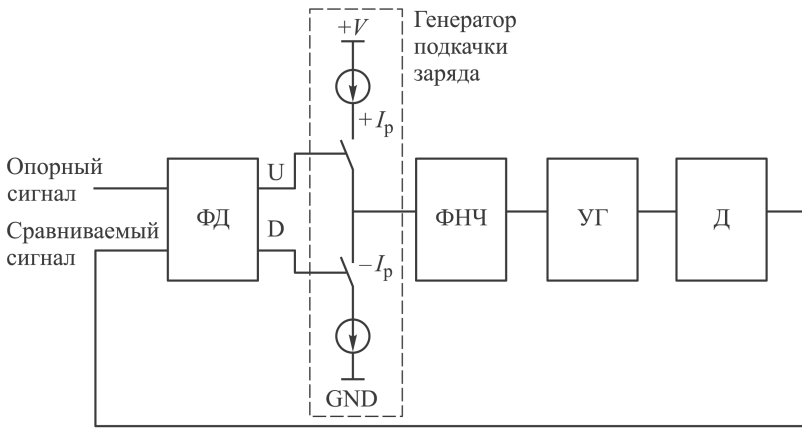


Рис. 3. ФАП с генератором подкачки заряда

Генератор подкачки может быть выполнен в виде источника напряжения или источника тока, возможно использование как пассивного, так и активного ФНЧ.

Наибольшее внимание обычно уделяется конфигурации с токонакачивающим пассивным фильтром. Этот выбор сделан отчасти из-за того, что анализ такого варианта оказывается более простым, также немаловажным фактором является то, что данная конфигурация в большей степени практична во многих реальных применениях [6].

Схема ФАП с генератором подкачки заряда, функционирующего по принципу токового источника, с пассивным фильтром приведена на рис. 3.

Генератор подкачки заряда преобразует выходные импульсы ФД в поток электрических зарядов, которые либо “накачиваются” в ФНЧ, либо “откачиваются” из него. Движение зарядов порождает ток  $I_p$ , направление которого зависит от знака ошибки  $\theta_e$  рассогласования между опорным источником сигнала и колебаниями УГ. Средний ток, поступающий на сопротивление ФНЧ  $z_{\text{ФНЧ}}(s)$ , можно представить выражением:

$$\bar{i}_d = \frac{I_p \theta_e}{2\pi}.$$

Тогда управляющее напряжение  $v_{\text{УГ}}(s)$  УГ будет иметь вид

$$v_{\text{УГ}}(s) = \frac{I_p z_{\text{ФНЧ}}(s) \theta_e(s)}{2\pi}. \quad (5)$$

Передаточную функцию УГ можно записать и преобразовать следующим образом (подставляя выражение (4) в выражение (5)):

$$H_0(s) = \frac{\theta_0(s)}{\theta_i(s)} = v_{\text{УГ}}(s) \frac{K_{\text{УГ}}}{s} = \frac{K_{\text{УГ}} I_p z_{\text{ФНЧ}}(s)}{2\pi s + K_{\text{УГ}} I_p z_{\text{ФНЧ}}(s)}, \quad (6)$$

где  $\theta_0(s)$  — фаза сигнала на выходе УГ;  $\theta_i(s)$  — фаза сигнала на входе УГ;  $K_{\text{УГ}}$  — коэффициент передачи УГ;  $s$  — комплексная переменная (при преобразовании Лапласа).

Рассмотрим передаточную характеристику системы ФАП с пассивным фильтром первого порядка.

Сопrotивление такого фильтра можно представить в виде

$$z_{\text{ФНЧ}}(s) = R_2 + \frac{1}{Cs}. \quad (7)$$

Таким образом, подставляя (6) в выражение (4), получаем

$$H_0(s) = \frac{\frac{K_{\text{УГ}}I_p}{2\pi s}(1 + R_2Cs)}{s^2 + \frac{K_{\text{УГ}}I_p}{2\pi s}(1 + R_2Cs)}. \quad (8)$$

Данное выражение также можно представить в виде, используемом для описания следящих систем:

$$H_0(s) = \frac{2\zeta\omega s + \omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}, \quad (9)$$

где  $\zeta$  — коэффициент затухания (демпфирования);  $\omega$  — собственная частота системы ФАП.

Сравнивая формулы (7) и (8) можно записать выражения для расчета параметров сопротивления и емкости фильтра нижних частот:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{\text{УГ}}I_p}{2\pi C}}; \quad \zeta = \frac{\tau_2}{2} \sqrt{\frac{K_{\text{УГ}}I_p}{2\pi C}}; \quad \tau_2 = RC; \quad C = \frac{K_{\text{УГ}}I_p}{2\pi\omega^2}; \quad R = \frac{\tau_2}{C}.$$

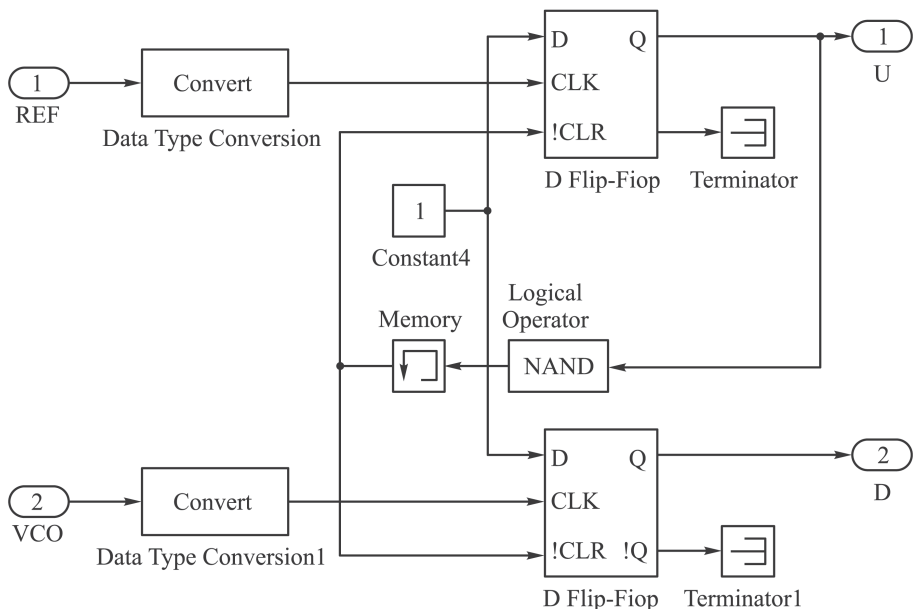
**Имитационное моделирование схемы ФД с генератором подкачки заряда.** Моделирование ФД с генератором подкачки заряда было проведено в программном продукте Simulink, являющемся частью пакета MATLAB. MATLAB является системой математического моделирования, поэтому разработчик оперирует не реальными элементами, а их математическими моделями, при этом выходные сигналы являются некоторыми функциями от входных. Данная среда моделирования представляется достаточно удобной и простой в использовании. Схема ФД в среде Simulink приведена на рис. 4.

Ранее было предложено составить схему ФД на основе двух D-триггеров (D Flip-Flop). Логический элемент “ИЛИ-НЕ”, исключающий одновременное появление на выходах ФД уровня логической единицы, исполнен в виде блока NAND. Блок Memory необходим для предотвращения заикливания среды моделирования, так как подача сигналов с выходов триггеров напрямую на входы невозможна.

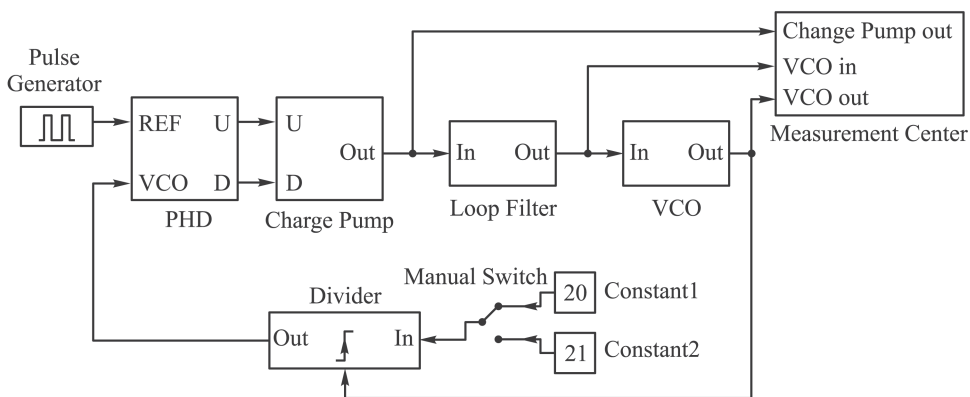
Генератор подкачки заряда состоит из двух ключей Switch, управляемых сигналами с выходов триггеров. Ключ замыкается на верхнее положение при поступлении логической единицы и на нижнее при поступлении логического нуля.

Поскольку среда моделирования не различает физическую сущность тока и напряжения, источники тока представлены в виде констант. Сигналы, генерируемые ключами, складываются и впоследствии передаются на ФНЧ.

**Имитационное моделирование синтезатора частот.** Моделирование синтезатора частот было проведено в программном продукте Simulink [7]. Синтезатор частот приведен на рис. 5, каждый элемент выполнен на основе отдельного функционального блока. Коэффициент деления задается переключением элемента Manual Switch в соответствующее положение.



**Рис. 4. Модель генератора подкачки в программе Simulink**



**Рис. 5. Модель синтезатора частот**

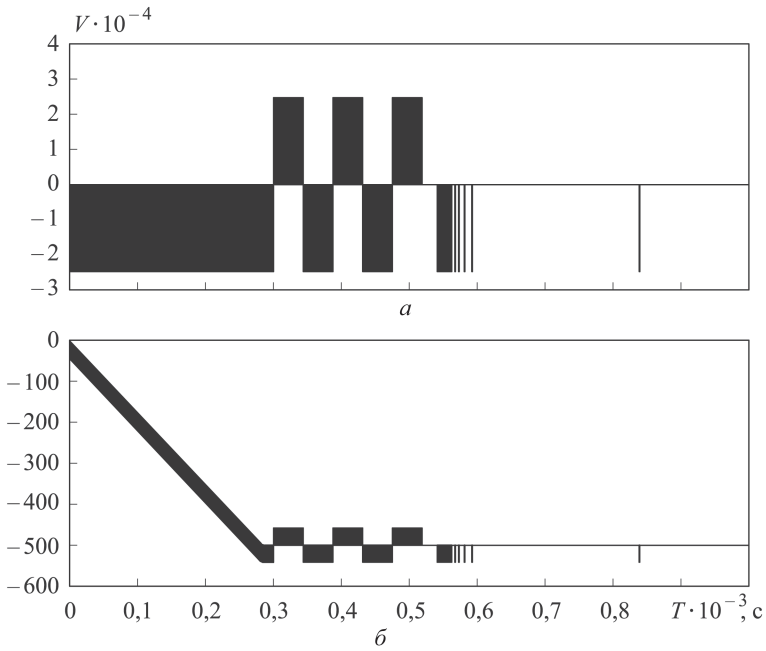
В качестве ФД PFD выступает система с генератором подкачки Charge Pump, работа которой была описана ранее.

Фильтр нижних частот Loop Filter в таком исполнении можно использовать как фильтр ФНЧ первого порядка, так и ФНЧ второго порядка, УГ представлен в виде элемента VCO.

На вход Clock In поступает сигнал с УГ, а на вход “1” значение коэффициента на который следует осуществить деление. Изменение коэффициента деления может быть выполнено непосредственно во время моделирования, поэтому можно наблюдать за перестройкой частоты.

Зададим исходные данные:

$$K_{УГ} = 0,1 \text{ Гц/В}, \quad F_{УГ} = 250 \text{ МГц}, \quad F = 10 \text{ МГц}, \quad N = 20.$$

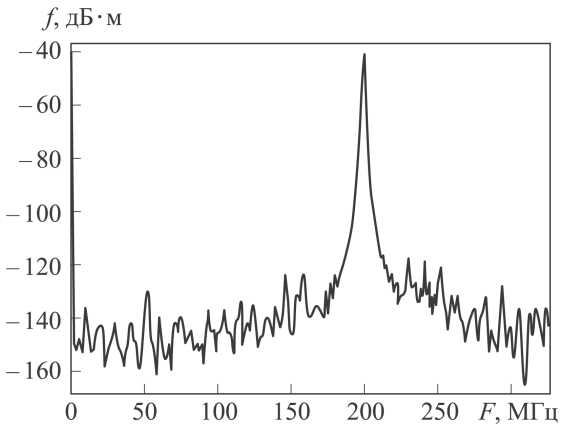


**Рис. 6. Синтезатор частот с ФНЧ первого (а) и второго (б) порядка**

Блок Measurement Center, в который стекаются результаты моделирования, показывает искомую установившуюся (захваченную) частоту, равную 200 МГц. Результаты моделирования СЧ с ФНЧ первого порядка приведены на рис. 6, а. Отметим, что захват частоты петлей ФАП происходит примерно через 0,6 мс.

Очевидно, что сигнал представляет собой ряд всплесков, которые негативно влияют на работу синтезатора частот. Для того чтобы предотвратить негативное воздействие данного эффекта, необходимо изменить (повысить) порядок фильтра ФНЧ, например до второго.

Спектр частот, получаемый с выхода УГ, показан на рис. 7 и на нем хорошо видна установившаяся (захваченная) частота.



**Рис. 7. Спектр сигнала на выходе УГ**



Коэффициент деления можно изменять непосредственно во время проведения имитационного моделирования путем переключения элемента Manual Switch, что дает возможность в реальном масштабе времени оценить скорость переключения синтезатора частот с одной частоты на другую.

Результаты моделирования СЧ с ФНЧ второго порядка приведены на рис. 6, б и согласуются с результатами, полученными в работе [8]. Фильтр второго порядка сглаживает всплески, однако незначительно увеличивает время захвата сигнала.

Применение верно рассчитанного ФНЧ важно еще и потому, что позволяет улучшить качество работы схемы ФАП относительно шумов или джиттера (фазового шума). Главной целью при разработке СЧ с ФАП является правильный выбор полосы частот ФНЧ, так как именно данный параметр является ключевым, позволяет обеспечить требуемый уровень фазового шума. Наличие джиттера на выходе системы ФАП обусловлено шумом опорного источника (REF) и внутренним шумом УГ (VCO) [9].

Чем уже полоса ФНЧ, тем сильнее ослабление шума опорного источника. Иными словами в данном случае меньше входного шума передается на выход. Не стоит также забывать, что чрезмерное сужение полосы может привести к усилению шума от УГ.

По этим причинам необходимость нахождения компромиссного варианта, зависящего от требований, предъявляемых к конкретному устройству, является первоочередной. Так, манипулируя полосой пропускания петли, можно добиться достаточного быстродействия и оптимального уровня шума.

**Заключение.** Приведен принцип функционирования синтезатора частот с петлей ФАП, схема ФД с генератором подкачки заряда и алгоритм его работы. Подробно изучена схема работы генератора с пассивным фильтром, проведено моделирование в программном продукте Simulink. На основе рассмотренного материала было выполнено имитационное моделирование синтезатора частот (как целого устройства), результаты которого представляют интерес для дальнейшего изучения. Предлагается более подробно рассмотреть влияние полосы фильтра ФНЧ на работу СЧ с ФД с генератором подкачки заряда. Провести моделирование работы СЧ с добавлением помех, порождаемых разными источниками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Шахтарин Б.И.* Синтезаторы частот. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 128 с.
2. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники / пер. с англ. М.: Мир, Бином, 2009. 704 с.
3. *Gardner F.M.* Charge-pump phase-lock loops // IEEE Trans. Commun. 1980. Vol. COM-28. P. 1849–1858.
4. *Gardner F.M.* Phase accuracy of charge-pump PLL's // IEEE Trans. Commun. 1982. Vol. COM-30. P. 2362–2363.
5. *Talbot Dan.* Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops / Hoboken NJ: Wiley-IEEE Press, 2012. 224 p.
6. *William F. Egan.* Advanced frequency synthesis by phase lock. WILEY, 2011.

7. Noorfazila K., Said Al-Sarawi, Neil H.E. Weste and Derek Abbot / A phase-Locked Loop Reference Spur Modelling using Simulink // International Conference on Electronic Devices “Systems and Applications”, 2010.
8. Mark Van Paemel. Analysis of charge-pump PLL: “New Model” // IEEE Transactions on communications. 1994. Vol. 42. P. 2490–2498.
9. James Wilson. Optimal Jitter Attenuation Starts With The Proper PLL Bandwidth. URL: <http://electronicdesign.com/analog/optimal-jitter-attenuation-starts-proper-pll-bandwidth> (дата обращения: 18.12.2013).

## REFERENCES

- [1] Shakhhtarina B. I. Sintezatory chastot [Frequency synthesizers]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007. 128 p.
- [2] Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 2nd Ed. CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, Un. Press, 1989. (Russ. ed.: Khorovitz P., Khill U. Iskusstvo skhемatekhnik. Moscow, Mir, Binom Publ., 2009. 704 p.)
- [3] Gardner F.M. Charge-pump phase-lock loops. *IEEE Trans. Commun.*, 1980, vol. COM-28, pp. 1849–1858.
- [4] Gardner F.M. Phase accuracy of charge-pump PLL’s. *IEEE Trans. Commun.*, 1982, vol. COM-30, pp. 2362–2363.
- [5] Talbot Daniel B. Frequency acquisition techniques for phase locked loops. Hoboken NJ, Wiley-IEEE Press, 2012. 224 p.
- [6] William F. Egan. Advanced frequency synthesis by phase lock. WILEY, 2011.
- [7] Kamal N., Al-Sarawi S. , Weste N.H.E. , Abbott D. A phase-locked loop reference spur modelling using Simulink. *Proc. Int. Conf. on Electr. Devices “Systems and Applications”* (ICEDSA), Un. Kebangsaan, Malaysia, 2010.
- [8] Van Paemel Mark. Analysis of charge-pump PLL: “New Model”. *IEEE Transactions on communications*, 1994, vol. 42, pp. 2490–2498.
- [9] Wilson James. Optimal jitter attenuation starts with the proper pll bandwidth. Available at: <http://electronicdesign.com/analog/optimal-jitter-attenuation-starts-proper-pll-bandwidth> (accessed 20.12.2011).

Статья поступила в редакцию 06.06.2013

Борис Ильич Шахтарин — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии. Автор более 200 научных работ в области анализа и синтеза систем обработки сигналов, фазовых систем синхронизации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

B.I. Shakhhtarina — Dr. Sci. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the State Prize. Author of more than 200 publications in the field of analysis and synthesis of signal processing systems, phase-locked loops.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Александрович Федотов — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области систем синхронизации и радиолокации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

A.A. Fedotov — post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Author of two publications in the field of synchronization systems and radars.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.