

# Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396

## ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ С АВТОКОМПЕНСАЦИЕЙ ФАЗОВЫХ ПОМЕХ

**Васильев Глеб Сергеевич**

аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

**Суржик Дмитрий Игоревич**

аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

**Харчук Светлана Михайловна**

старший преподаватель кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

**Курилов Игорь Александрович**

кандидат технических наук, доцент, профессор Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* kh@mivlg.ru.

*Адрес:* 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

**Аннотация:** Рассмотрена структурная схема формирователя сигналов на основе цифрового вычислительного синтезатора с автокомпенсацией фазовых помех. Подавление помех формирователя осуществляется путем противофазного управления задержкой тактового сигнала синтезатора. На основе модели устройства для флуктуаций фазы получены общие соотношения и построены графики спектральной плотности фазовых помех отдельных блоков формирователя и устройства в целом при различных коэффициентах регулирования автокомпенсатора.

**Ключевые слова:** цифровой вычислительный синтезатор, ЦВС, автокомпенсатор фазовых помех, спектральная плотность.

Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), реализующие метод прямого цифрового синтеза частот, и формирователи сигналов на основе ЦВС получили широкое распространение благодаря удобству цифрового интерфейса, высокому разрешению по частоте и фазе, быстрой перестройке по частоте без разрыва фазы. Однако фазовые помехи негативно влияют на качество выходного сигнала ЦВС и формирователя (влияние амплитудных помех проявляется менее существенно). К появлению фазовых помех приводят переходные процессы

ЦАП, джиттер звеньев синтезатора и интерфейсов между блоками и другие факторы [1]. Для ослабления помех применяется фильтрация выходного сигнала синтезатора, а также компенсация данных помех.

Принцип действия автоматического компенсатора помех (АК) основан на выделении закона паразитного отклонения фазы выходного сигнала ЦАП ЦВС и последующем противофазном управлении временным сдвигом (фазой) сигнала в устройстве управляемой задержки (УУЗ) под действием выделенного

сигнала [2-4]. Метод не требует индивидуальной калибровки отдельных блоков синтезатора, обеспечивает компенсацию помех с частотой, близкой к основной частоте сигнала, и может применяться вместе с фильтрацией.

Структурная схема формирователя (рис. 1) включает в себя: ОГ - опорный генератор, УЧ1 и УЧ2 – умножители частоты, реализованные, соответственно, на системе ФАПЧ и на биполярном транзисторе, ФНЧ1,2 и ФД1,2 - фильтры нижних частот и фазовые детекторы, ДЦ1,2 - дифференцирующие цепи, ДВ - двухполупериодный выпрямитель, Тр1,2 - триггеры, УПТ – усилитель постоянного тока. Также в состав ФАПЧ входят генератор, управляемый напряжением (ГУН), и делитель с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД). Управляющий сигнал УУЗ формируется при помощи дифференцирования выходных сигналов ЦАП и УЧ1 в ДЦ1 и ДЦ2. Далее после формирования сигнала в Тр1, ДВ и Тр2 сигналы поступают на ФД2, где сравниваются по фазе (временному отклонению). После ФНЧ2 сигнал, пропорциональный фазовому отклонению выходного сигнала ЦАП, усиливается в УПТ. В качестве УУЗ может использоваться импульсно-фазовый модулятор.

Целью работы является исследование фазовых шумов формирователя сигналов на основе ЦВС с автокомпенсацией фазовых помех при различных параметрах устройства.

Функциональная модель формирователя для флуктуаций фазы  $\Phi$  представлена на рис. 2. На модели обозначено:  $\varphi_{ог}$  – фаза опорного генератора ( $\varphi_{ог}=0$ ),  $K$  с нижним индексом - коэффициент передачи соответствующего бло-

ка,  $N_{УЧ1}$ ,  $N_{УЧ2}$ ,  $N_{ДФКД}$  и  $n_{УПТ}$  - коэффициенты умножения, деления, УЧ1, УЧ2, ДФКД и передачи УПТ;  $M_1(p)$ ,  $M_2(p)$  – коэффициенты передачи ФНЧ1, ФНЧ2,  $p$  - оператор.

Заменим  $p \rightarrow j2\pi F$ , где  $F$  – частота отстройки от несущего колебания. Тогда спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций на выходе формирователя (рис.2) при воздействии некоррелированных помех

$$S_{ВЫХ}(F) = \left\{ S_{ОГ}(F) N_{УЧ1}^2 H_{31}^2(F) + S_{УЧ1}(F) + \left[ S_{УУЗ}(F) K_{ЦВС}^2 + S_{УПТ}(F) K_{УУЗ}^2 K_{ЦВС}^2 + S_{ФД2}(F) n_{УПТ}^2 K_{УУЗ}^2 K_{ЦВС}^2 |M_2(F)|^2 + 2S_{ТР1}^*(F) + S_{ЦВС}(F) \right] \times |H_{АК}(F)|^2 \right\} \left( N_{УЧ2}^2 + S_{УЧ2}(F) \right), \quad (1)$$

где символами  $S$  обозначены СПМ фазовых флуктуаций соответствующих блоков,

$$S_{ТР1}^* = S_{ТР1}(F) K_{ФД2}^2 n_{УПТ}^2 K_{УУЗ}^2 K_{ЦВС}^2 |M_2(F)|^2,$$

$H_{АК}(F)$  – передаточная функция АК,  $H_{31\phi}(p) = H_{\phi}(p)/(1 + H_{\phi}(p))$  - передаточная функция ФАПЧ по внешним шумам,  $H_{\phi}(p) = M_1(p) \cdot K_{ФД1} K_{ГУН} / (p N_{ДФКД})$  - передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ. Для нахождения передаточной функции АК воспользуемся аппаратом непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [5-8]. Применение НКЛФ позволяет кусочно линеаризовать в общем случае нелинейные характеристики звеньев АК и получить их выражения в виде непрерывных функций соответствующего аргумента. Характеристики УУЗ, ФД и ЦАП аппроксимируем при помощи НКЛФ [9 - 11] и обозначим их соответственно  $K_Y(u)$ ,  $F_D(\tau_{вых})$

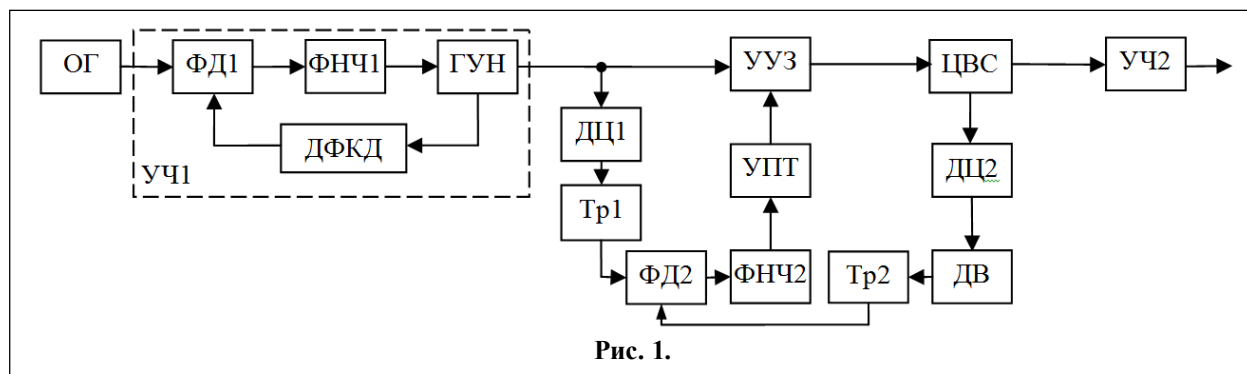


Рис. 1.

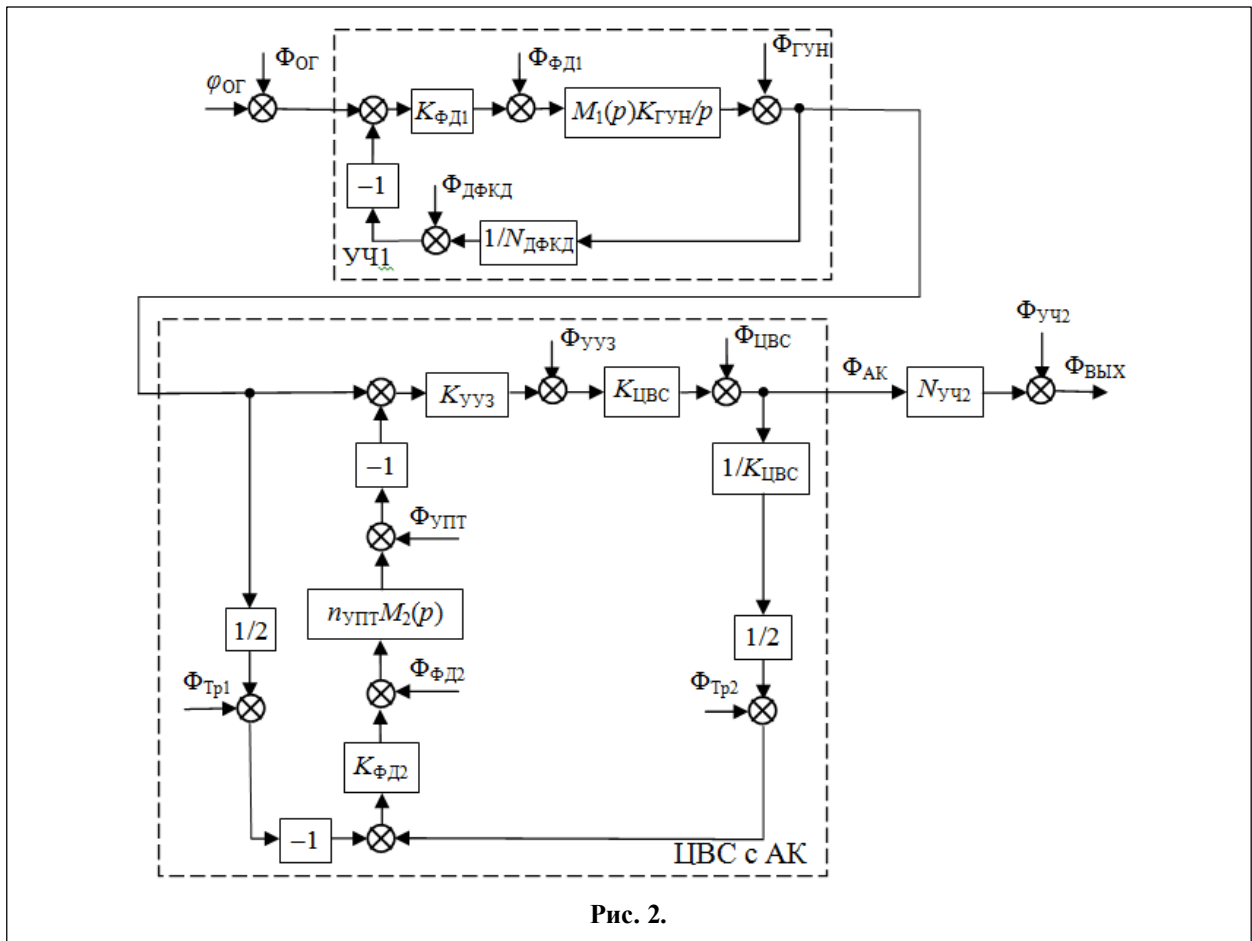


Рис. 2.

и  $F_{\Pi}(\varepsilon_{\Pi})$ , где  $u, \tau_{\text{вых}}$  и  $\varepsilon_{\Pi}$  - отклонения управляющего сигнала, задержки (фазы) и дестабилизирующего фактора.

Кроме того, представление схемы синтезатора с АК схемой амплитудно фазового преобразователя сигналов [12-15] позволяет при анализе конкретного варианта схемы использовать аналитические выражения характеристик обобщенного преобразователя [16, 17]. Представим схему АК схемой амплитудно фазового преобразователя сигналов и воспользуемся выражениями передаточных функций преобразователя по внутренним шумам [3, 18-21]

$$H_{AK}(p) = \frac{N_{\Pi s}}{1 + M(p)N_{mn}},$$

где  $N_{mn}$  и  $N_{\Pi s}$  - коэффициент регулирования автокомпенсатора и коэффициент передачи ЦАП;  $m, n$  и  $s$  - номера узлов аппроксимации характеристик

$$N_{mn} = n_y \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_{y_m} K_{D_n} Q_{y_m} Q_{D_n},$$

$$N_{\Pi s} = \sum_{s=0}^{S-1} K_{\Pi s} Q_{\Pi s},$$

где  $n_y$  - коэффициент передачи УПТ преобразователя,  $n_y = n_{УПТ}$ ,  $K_{y_m}$ ,  $K_{D_n}$ ,  $K_{\Pi s}$  - коэффициенты прямых, аппроксимирующих характеристики УУЗ, ФД и ЦАП в узлах  $m, n$  и  $s$ ;  $Q_{y_m} = Q_{y_m}(u)$ ,  $Q_{D_n} = Q_{D_n}(\tau_{\text{вых}})$ ,  $Q_{\Pi s} = Q_{\Pi s}(\varepsilon_{\Pi})$  - функции включения отрезков аппроксимирующих прямых.  $M, N, S$  - максимальные номера узлов аппроксимации.

Пусть максимальные отклонения параметров находятся в пределах участков аппроксимации с одним номером. Обозначим  $K_{y_m} = K_{УУЗ}$ ,  $K_{D_n} = K_{ФД2}$ ,  $K_{\Pi s} = K_{\Pi} = 1$ ,

$$N_p = N_{mn} = K_{УУЗ} n_{УПТ} K_{ФД2} / (2K_{ЦВС}).$$

$$H_{AK}(F) = 1 / [1 + N_p M_2(F)].$$

Установлено [10], что при ФНЧ первого порядка и девиациях фазы до  $30^{\circ}$  преобразова-

тель сигналов и, соответственно, автокомпенсатор являются абсолютно устойчивыми. При исследовании из-за влияния паразитных параметров ограничимся  $N_p=1000$ .

Шумовой вклад УЧ1 на основе ФАПЧ [22, 23]

$$S_{\text{УЧ1}}(F) = S_{\text{ФАПЧ}}(F) = [S_{\text{ДФКД}}(F) + S_{\text{ФД1}}(F)] \times \\ \times N_{\text{ДФКД}}^2 |H_{31\Phi}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) |H_{32\Phi}(F)|^2, \quad (2)$$

где  $H_{32\Phi}(p) = 1/(1 + H_{\Phi}(p))$  - передаточная функция ФАПЧ по внутренним шумам.

Экспериментальные СПМ фазовых шумов различных источников удобно представить [24] суммой степенных функций.

Так, соотношение для расчета СПМ собственных фазовых шумов ОГ [25, 26]:

$$S_{\text{ОГ}}(F) = \frac{10^{-7.82}}{F^3} + \frac{10^{-9.86}}{F^2} + \frac{10^{-12.7}}{F} + 10^{-15.8}. \quad (3)$$

Согласно [24], фазовые шумы цифровых ФД и ДФКД примерно одинаковы и равны

$$S_{\text{ФД}}(F) = S_{\text{ДФКД}}(F) = \frac{10^{-14.7}}{F} + 10^{-16.5}. \quad (4)$$

Применительно к схеме формирователя (рис. 1) модель (4) корректно использовать для звеньев ФД1, ФД2, ДФКД и Тр1, Тр2.

СПМ фазовых шумов высокочастотных усилителей определена в [24]

$$S_{\text{УС}}(F) = \frac{10^{-11.2}}{F} + 10^{-17}. \quad (5)$$

Фазовый шум УПТ рассчитать затруднительно даже при использовании апробированной структурной схемы [24], поэтому для расчета СПМ фазовой помехи УПТ используем (5).

Для расчета СПМ фазового шума ГУН при произвольной отстройке от несущей используем степенную аппроксимацию табличных шумовых параметров ГУН модели ROS-244+ [27, 28]

$$S_{\text{ГУН}}(F) = \frac{10^{-13.3}}{F^3} \cdot \frac{f_0^2}{q^2} + \frac{10^{-16.7}}{F^2} \cdot \frac{f_0^2}{q^2} + \frac{10^{-13}}{F} + 10^{-16.2}, \quad (6)$$

где  $f_0 = f_{\text{ОГ}} N_{\text{УЧ1}}$  - частота генератора при отсутствии модулирующего напряжения,  $q$  - добротность нагруженного резонатора (для кварцевого резонатора  $q=100$ ).

Величины фазовой помехи УУЗ на основе импульсно-фазового модулятора с учетом его структуры и УЧ2 на биполярном транзисторе [24]

$$S_{\text{УУЗ}}(F) = 5 \cdot [2N_{\text{УЧ1}}^2 S_{\text{ОГ}} + S_{\text{УС}}(F)], \quad (7)$$

$$S_{\text{УЧ2}}(F) = N_{\text{УЧ2}}^2 \cdot \frac{4kT}{P_c} \left[ 1 + \frac{f_{\alpha}}{F} \right], \quad (8)$$

где  $k = 1,23 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана,  $T = 293\text{К}$  - абсолютная температура,  $P_c = 1\text{мВт}$  - мощность входного сигнала,  $f_{\alpha} = 100$  Гц - граничная частота области преобладания фликкер-шума в спектре шума транзистора.

СПМ фазового шума ЦВС [23]

$$S_{\text{ЦВС}}(F) = K_{\text{ЦВС}}^2 \left( \frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{\text{кв}}, \quad (9)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  - коэффициенты,

$S_{\text{кв}} = 2^{-2N_{\text{Ц}} - 0.59} \left( \frac{f_{\text{ЦВС}}}{f_T^2} \right)$  - СПМ фазового шума

квантования ЦАП,  $f_{\text{ЦВС}}$  и  $f_T$  - основная выходная и тактовая частоты ЦВС,  $N_{\text{Ц}}$  - число разрядов ЦАП.

Расчет характеристик конкретного формирователя проведем для следующих значений параметров его блоков:  $f_{\text{ОГ}} = 100$  МГц,  $K_{\text{ЦВС}} = 0,31$ ,  $N = 12$ ,  $N_{\text{УЧ1}} = 2$ ,  $N_{\text{УЧ2}} = 5$ ,  $k_1 = -9,2$ ,  $k_2 = -8,4$ ,  $k_3 = -16,8$ ,  $k_4 = -14,5$ ,  $f_0 = 200$  МГц, частоты среза фильтров первого порядка ФНЧ1 и ФНЧ2:  $f_{\text{ср1}} = 10$  кГц и  $f_{\text{ср2}} = 1$  кГц,  $K_{\text{ФД1}} = K_{\text{ФД2}} = K_{\text{УУЗ}} = 1$ ,  $K_{\text{ГУН}} = 4$  МГц/В.

Шумовые вклады отдельных блоков формирователя, определенные соответствующими слагаемыми выражений (1) и (2), приведены на рис. 3. Вклад УЧ1 в общий уровень шумов формирователя сравнительно невелик, т.к. фазовая помеха подавляется петлей ФАПЧ.

Из рис. 3 следует, что вклад фазовой помехи ОГ сравним с вкладом ЦВС, преобладает при малых отстройках ( $F < 10$  Гц) и ограничивает возможности роста степени компенсации. Рост СПМ фазовых шумов ОГ приводит к сужению области возможного уменьшения фазовых шумов на выходе формирователя (область заштрихована) и обуславливает необходимость использования малошумящих опорных генераторов.

Зависимости фазовых шумов формирователя от частоты отстройки для различных коэффициентов регулирования, рассчитанные по (1), приведены на рис. 4. Также на рис. 5 пред-

ставлены зависимости степени подавления фазовых помех  $B_\varphi(F) = 10 \log(S_{\text{вых}}^*(F)) - 10 \log(S_{\text{вых}}(F))$ , где  $S_{\text{вых}}^*(F)$  – зависимость СПМ фазовых шумов формирователя от  $F$  в режиме «без компенсации» (при непосредственном тактировании ЦВС с выхода УЧ1).

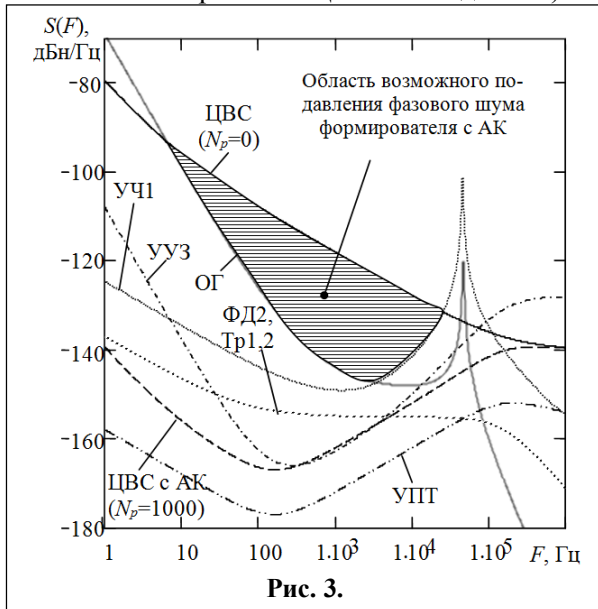


Рис. 3.

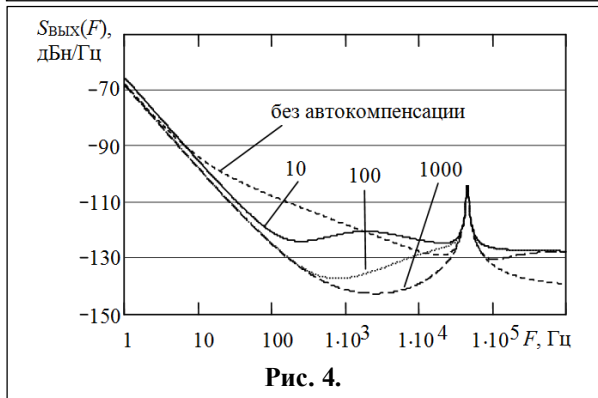


Рис. 4.

Графики на рис. 4 и 5 показывают, что положительное значение компенсации в широком диапазоне отстроек достигается при значении коэффициента регулирования  $N_p \geq 10$  (до 23,2 дБ/Гц при отстройке  $F = 1000$  Гц и максимальном  $N_p = 1000$ ). При меньших значениях  $N_p \leq 1$  наблюдается привнесение дополнительного шума автокомпенсатором, что связано с недостаточным подавлением собственного фазового шума УУЗ.

Получены общие соотношения, позволяющие исследовать шумовые характеристики формирователя сигналов на основе ЦВС с автокомпенсацией фазовых помех. Соотношения справедливы при произвольной вариации параметров схем АК и формирователя в целом.

Моделирование шумовых свойств показало эффективность исследуемой схемы.

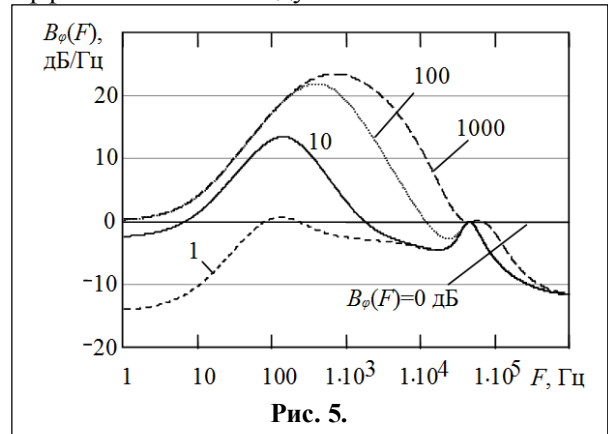


Рис. 5.

### Литература

1. Смекалов А. Метод прямого цифрового синтеза гармонического сигнала. Анализ и математическое моделирование. – Радиотехника, 2011, №1, С. 16-29.
2. Курилов И.А., Рудаков А.М., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2013. – С. 19-25.
3. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.
4. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University, Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
5. Курилов И.А., Романов Д.Н., Харчук С.М. Аппроксимация характеристик и сигналов на основе включающих непрерывных кусочно-линейных функций // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2007. № 8. С. 7-11.
6. Курилов И.А., Ромашов В.В., Жиганова Е.А., Романов Д.Н., Васильев Г.С., Харчук С.М., Суржик Д.И. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1. - С. 35-49.
7. Курилов И.А. Анализ устройств амплитудно-фазового преобразования сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций // Радиотехника. 2006. № 11. - С. 55-60.



8. Курилов И.А., Ромашов В.В., Васильев Г.С. Статические характеристики гистерезисных амплитудно-фазовых преобразователей сигналов // Радиотехника. 2009. № 11. - С. 86-88.
9. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Исследование переходных процессов амплитудно-фазовых преобразователей спектральным методом на основе НКЛФ. //Методы и устройства передачи и обработки информации. 2009. № 11. - С. 72-78.
10. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М., Суржик Д.И. Исследование устойчивости преобразователя сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 1. - С. 4-7.
11. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических характеристик преобразователей сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций // Научно-технический вестник Поволжья. 2010. № 1. - С. 100-104.
12. Курилов И.А., Ромашов В.В. Переходные режимы амплитудно-фазового преобразователя четвертого порядка // Радиотехника. 2008. № 9. - С. 94-98.
13. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Исследование статических режимов преобразователей сигналов при внутренних возмущениях // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. - С. 75-79.
14. Курилов И.А., Ромашов В.В., Васильев Г.С. Статические характеристики гистерезисных амплитудно-фазовых преобразователей сигналов // Радиотехника. 2009. № 11. - С. 86-88.
15. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Research of static characteristics of converters of signals with a nonlinear control device // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. – P. 93 – 96
16. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M. Analysis of parametrical stability of the amplitude-phase converter with various filters // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.
17. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.
18. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Статические режимы амплитудно-фазовых преобразователей при воздействии дестабилизирующего фактора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. - С. 15-19.
19. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических режимов амплитудно-фазовых преобразователей при различных входных воздействиях // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. – P. 293–296.
20. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Передаточные характеристики нелинейного преобразователя сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. - С. 80-84.
21. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Моделирование преобразователя сигналов с комбинированным регулированием на основе передаточных характеристик // Проектирование и технология электронных средств. 2011. № 1. - С. 34-37.
22. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №1, 2014. – С. 5-20.
23. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Коровин А.Н. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1 (9). С. 10-15.
24. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
25. Drucker E. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance. – Microwaves & RF, 2000. – № 2.
26. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Моделирование шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 4. - С. 20-23.
27. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Моделирование шумовых характеристик новых интегральных цифровых вычислительных синтезаторов компании ANALOG DEVICES // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 2 (10). - С. 26-32.
28. Сайт фирмы Mini-Circuits [Электронный ресурс] – <http://www.minicircuits.com/pdfs/ROS-244+.pdf/pdfs/>.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542.*

**Поступила 24 августа 2015 г.**

**Noise properties of signal shaper with phase noise automatic compensation**

**Gleb Sergeyevich Vasilyev** - post-graduate student Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

**Dmitry Igorevich Surzhik** - post-graduate student Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

**Svetlana Mikhailovna Kharchuk** - Senior Lecturer Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

**Igor Aleksandrovich Kurilov** - Candidate of Engineering, Associate Professor Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

*E-mail:* kh@mivlgu.ru.

*Address:* Orlovskaya st., 23, Murom, 602264.

*Abstract:* Signal shaper structural diagram is examined here consisting of the first frequency multiplier based on phase-lock loop, digital direct synthesizer with phase noise automatic compensation and the second frequency multiplier with bipolar transistor. Shaper's noise suppression is done by antiphase control of clock pulse signal delay of digital synthesizer. Control signal generation in automatic compensation circuit is executed via phase detection with subsequent filtration and enhancement. Advantage of automatic compensation method is that there is no need for individual calibration of synthesizer's separate units and possibility of noise compensation with frequency similar to effective oscillation basic frequency. Shaper's functional model for phase fluctuations was developed and general correlations for its noise performances analysis were obtained. Nonlinear characteristics of control device for clock pulse generator signal delay, phase detector and digital-to-analog converter are approximated by continuous piecewise - linear functions for this purpose. Power spectral densities of inherent phase noises in shaper's separate units are represented by exponential functions total. Spectral density diagrams of reference generator phase noises of the first and second frequency multipliers, delay control device, digital synthesizer were developed as well as for voltage-controlled generator and shaper as a whole with various automatic compensator control factors. It is established that reference generator and digital direct synthesizer contribute mostly to general phase noise at shaper's output. Noise proportion of voltage-controlled generator as a part of the first frequency multiplier at shaper's output is defined. In addition to that phase noises suppression level via phase-lock loop is taken into account. Analysis of shaper's phase noise suppression level with various automatic compensator control factors is made. Operational efficiency of automatic compensation principle to reduce phase noise level of signal shapers is demonstrated.

*Key words:* digital computing synthesizer, DCS, phase noise automatic compensator, spectral density.

**References**

1. Smekalov A. Direct digital synthesis method for harmonic signal. Analysis and mathematical modeling. - Radiotekhnika, 2011, No. 1, p. 16-29.
2. Kurilov I.A., Rudakov A.M., Harchuk S.M., Romanov D. N. Mathematical modeling of phase noise automatic compensation at DAC output of direct digital frequency synthesizer. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 2 (10), 2013. - P. 19-25.
3. Vasilyev G. S., Kurilov I.A., Harchuk S. M. Modeling of nonlinear phase noise automatic compensator of DAC direct digital frequency synthesizer. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 2, 2014. - P. 30-38.
4. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS. - 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Proceedings. - Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
5. Kurilov I.A., Romanov D. N., Harchuk S. M. Characteristics and signals approximation based on switching in continuous piecewise linear functions. - Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii. 2007. No. 8. P. 7-11.
6. Kurilov I.A., Romashov V. V., Zhiganova E.A., Romanov D. N., Vasilyev G. S., Harchuk S.M., Surzhik D. I. Analysis methods of functional approximation-based radio devices. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2014. No. 1 (13). P. 35-49.
7. Kurilov I.A. Analysis of amplitude-phase signal conversion devices based on continuous piecewise linear functions. - Radiotekhnika. 2006. No. 11. P. 55-60.

8. Kurilov I.A., Romashov V.V., Vasilyev G.S. Static characteristics of the hysteresis amplitude-phase signal converters. - Radiotekhnika. 2009. № 11. - Pp. 86-88.
9. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Harchuk S. M. Research of amplitude - phase converters transient processes via CPLF-based spectral method. - Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii. 2009. No. 11. P. 72-78.
10. Vasilyev G. S., Kurilov I.A., Harchuk S.M., Surzhik D. I. Research of signal converter stability based on continuous piecewise linear functions. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2012. No. 1. P. 4-7.
11. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Analysis of signal converter dynamic characteristics of transformers based on continuous piecewise linear functions. - Nauchno-tekhnichesky vestnik Povolzhya. 2010. No. 1. P. 100-104.
12. Kurilov I.A., Romashov V.V. Transitional modes of fourth-order amplitude-phase converter. - Radiotekhnika. 2008. No. 9. P. 94-98.
13. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Research of static conditions of signal converters under internal perturbations. - Voprosy radioelektroniki. 2010. T. 1. No. 1. P. 75-79.
14. Kurilov I.A., Romashov V. V., Vasilyev G. S. Static characteristics of hysteresis amplitude-phase signal converters. - Radiotekhnika. 2009. No. 11. P. 86-88.
15. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Research of static characteristics of converters of signals with a nonlinear control device. - 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). - Proceedings. - Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. - p. 93 - 96
16. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M. Analysis of parametrical stability of the amplitude-phase converter with various filters. - 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.
17. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence. - 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.
18. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Static modes of amplitude-phase converters under destabilizing factor impact. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2011. No. 2. P. 15-19.
19. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Analysis of amplitude-phase converters dynamic modes under various input effects. - 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). - Proceedings. - Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. - p. 293 - 296
20. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Signal nonlinear converter transfer characteristics. - Voprosy radioelektroniki. 2010. T. 1. No. 1. P. 80-84.
21. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Modeling of signal converter with transfer characteristics-based combination control. - Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv. 2011. No. 1. P. 34-37.
22. Romashov V.V., Romashova L.V., K.K. Khramov, Doktorov A.N., Yakimenko K.A. Noise characteristics modeling of hybrid frequency synthesizers. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 1, 2014. - P. 5-20.
23. Romashov V.V., Romashova L.V., Yakimenko K.A., Korovin A.N. Modeling of noise performances of hybrid frequency synthesizers on integral chips. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2013. № 1 (9). P. 10-15.
24. Ryzhkov A.V., Popov V. N. Frequency synthesizers in radio communication technology - M.: Radio i svyaz 1991. - 264 p.
25. Drucker E. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance. - Microwaves & RF, 2000. - No. 2.
26. Romashov V.V., Romashova L.V. Modelling of noise performances of integral direct digital synthesizers. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2011. № 4. - P. 20-23.
27. Romashov V.V., Romashova L.V., K.K. Khramov, Doktorov A.N. Simulation of the noise curves of the new integrated direct digital synthesizers from Analog Devices. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2013. № 2 (10). - P. 26-32.
28. Mini-Circuits Co. website [digital resource] - <http://www.minicircuits.com/pdfs/ROS-244+.pdf/pdfs/>.