

---

---

## Формирование и усиление сигналов

---

---

УДК 621.396

### Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот

**Васильев Глеб Сергеевич** – аспирант 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».

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

E-mail: kh@mivlgu.ru.

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

*Аннотация:* Рассмотрена структурная схема автокомпенсатора фазовых помех цифро-аналогового преобразователя синтезатора частот. Предложена структурная модель автокомпенсатора для анализа временных отклонений сигналов на выходах основных составляющих звеньев и выходного сигнала устройства в целом. Составлено дифференциальное уравнение нелинейного автокомпенсатора. На основе непрерывных кусочно-линейных функций выполнена аппроксимация нелинейных характеристик тактового генератора, устройства управления задержкой сигнала и цифро-аналогового преобразователя. Проведена кусочная линеаризация и получено непрерывное кусочно-линейное дифференциальное уравнение нелинейного автокомпенсатора при одновременном воздействии независимых дестабилизирующих возмущений на тактовый генератор, на устройство управления задержкой и на цифроаналоговый преобразователь. Уравнение справедливо при произвольных значениях и видах дестабилизирующих возмущений, а также при произвольных характеристиках звеньев автокомпенсатора. Построена модель, иллюстрирующая роль коэффициентов уравнения в формировании временного отклонения выходного сигнала.

Получены обобщенные выражения передаточных характеристик нелинейного автокомпенсатора. Передаточные характеристики автокомпенсатора для каждого вида дестабилизирующего фактора, справедливы не только в окрестности рабочей точки устройства, но и при любых изменениях воздействия и отклика, при произвольных характеристиках, составляющих автокомпенсатор звеньев, и произвольных законах изменения дестабилизирующих факторов, воздействующих на тактовый генератор, устройство управления задержкой сигнала и цифро-аналоговый преобразователь. Для автокомпенсаторов с интегрирующим и пропорционально-интегрирующим фильтрами получены выражения передаточных характеристик стационарного режима и построены графики статических характеристик нелинейного автокомпенсатора для воздействия дестабилизирующего фактора на цифро-аналоговый преобразователь, позволяющие установить степень компенсации помех цифро-аналогового преобразователя, в стационарном режиме.

*Ключевые слова:* автокомпенсатор фазовых помех, кусочно-линейная функция, передаточная характеристика, стационарный режим, статические характеристики.

---

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) является активным источником фазовых помех в прямых цифровых синтезаторах частот [1,2]. Сигнал на выходе ЦАП содержит паразитные

отклонения амплитуды и фазы. Амплитудные искажения в меньшей степени влияют на качество выходного сигнала синтезатора частот. Исследования показали, что перспективным

методом борьбы с фазовыми помехами ЦАП является их автоматическая компенсация [1]. Принцип действия автокомпенсаторов основан на выделении закона паразитного отклонения фазы (паразитного временного отклонения) выходного сигнала устройства и последующем противофазном отклонении фазы (временной задержки) в управляющем устройстве под действием выделенного сигнала. Фазовое отклонение выходного сигнала ЦАП эквивалентно его временному сдвигу. Поэтому данный временной сдвиг и соответственно паразитное фазовое отклонение могут быть скомпенсированы противофазным изменением задержки сигнала тактового генератора ЦАП в устройстве управления задержкой (УУЗ).

Структурная схема автокомпенсатора фазовых помех ЦАП представлена на рис. 1.

На схеме обозначено: ТГ - тактовый генератор, ДЦ - дифференцирующая цепь, Тр - триггер, ДВ - двухполупериодный выпрямитель, ФД - фазовый детектор, ФНЧ - фильтр нижних частот, УПТ - усилитель постоянного тока,  $\varepsilon_{Г}$ ,  $\varepsilon_{У}$  и  $\varepsilon_{П}$  - дестабилизирующие факторы, воздействующие на ТГ, УУЗ и ЦАП соответственно,  $C_{П}$  - код выходного сигнала ЦАП. Опорный

тракт включает в себя ДЦ1 и Тр1. Информационный тракт состоит из ДЦ2, ДВ и Тр2. В качестве дестабилизирующих факторов могут выступать изменения температуры, напряжений, механические вибрации и др. Кроме того, приняты следующие обозначения сигналов:  $U_{ТГ}$  - на выходе ТГ,  $U_{О}$  и  $U_{И}$  - на выходах опорного и информационного трактов,  $u$  - управляющий сигнал УУЗ,  $U_{ВЫХ}$  - выходной сигнал ЦАП. Обработка сигналов на выходах ТГ и ЦАП в информационном тракте позволяет выровнять их формы и амплитуды. При этом фазовые (временные) сдвиги сигналов сохраняются.

В [1] построены диаграммы сигналов на выходах различных блоков схемы на основе аппроксимации непрерывными кусочно-линейными функциями (НКЛФ) [3-5]. Сигналы представлены в виде непрерывных аналитических выражений, справедливых во всем диапазоне изменения аргумента.

Применение аппарата НКЛФ дает возможность провести также кусочно-линейную аппроксимацию нелинейных характеристик основных блоков автокомпенсатора и получить общие операторные выражения устройства,

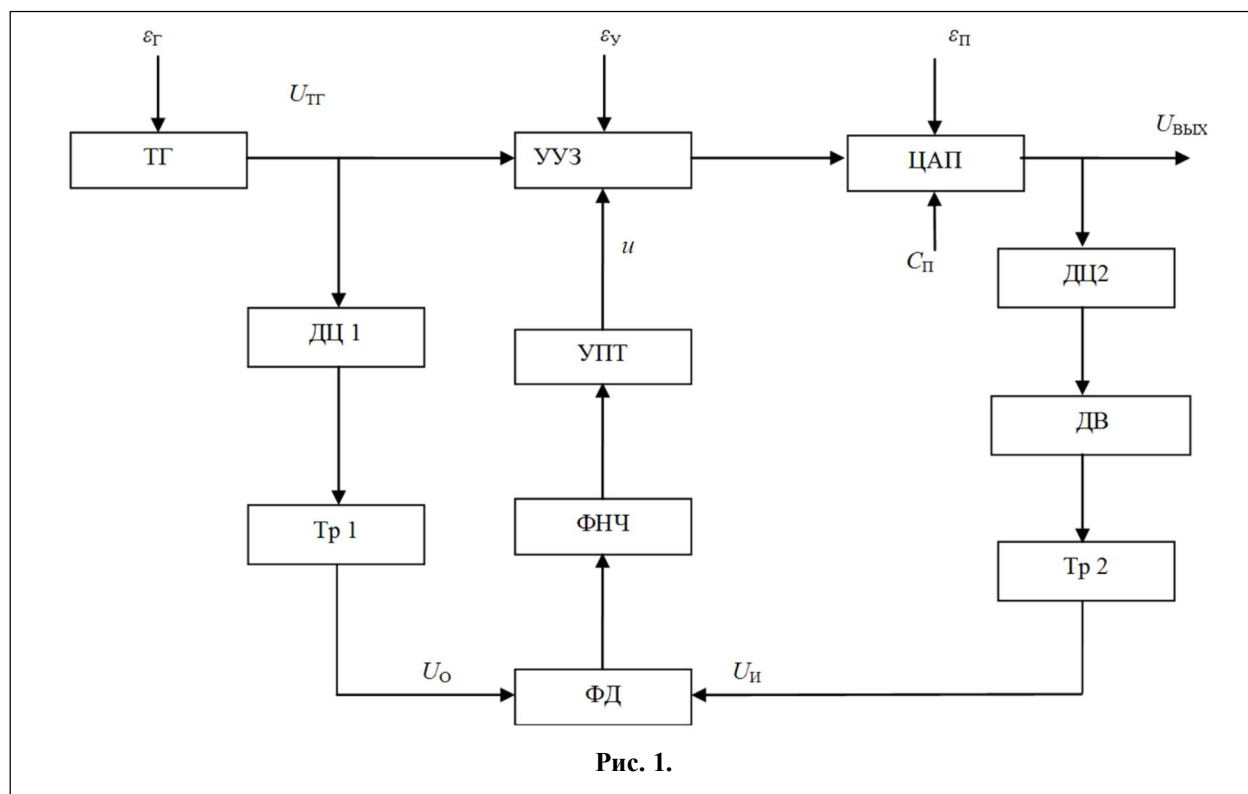


Рис. 1.

справедливые при произвольных значениях величин дестабилизирующих факторов. Это позволит осуществлять анализ статических и динамических режимов работы автокомпенсатора с различными и произвольными характеристиками составляющих звеньев по конечным обобщенным аналитическим выражениям устройства [6-15]. При этом не требуется разбиения диапазонов изменений параметров сигналов и автокомпенсатора на отдельные ограниченные участки исследования.

Целью работы является моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот на основе аппарата непрерывных кусочно-линейных передаточных характеристик.

На данном этапе исследований полагаем, что амплитудные и временные (фазовые) неустойчивости дифференцирующих цепей, выпрямителя и триггеров в опорном и информационном трактах близки по своим значениям и малы. Тогда коэффициенты передачи опорного и информационного трактов для временных отклонений примем равными 1. Обозначим  $\tau_{\Gamma} = \tau_{\Gamma}[\varepsilon_{\Gamma}(t)]$  и  $\tau_{\Pi} = \tau_{\Pi}[\varepsilon_{\Pi}(t)]$  - временные отклонения сигналов, вызванные воздействием дестабилизирующих факторов на ТГ, и ЦАП, где  $t$  - время, а  $\tau_{\Upsilon} = \tau_{\Upsilon}[u(t) + \varepsilon_{\Upsilon}(t)]$  - временное отклонения сигнала, вызванное воздействием управляющего сигнала и дестабилизирующих факторов на УУЗ,  $\tau_{\text{вых}} = \tau_{\text{вых}}(t)$  - временные отклонения выходного сигнала автокомпенсатора, где  $t$  - время. В дальнейших преобразованиях параметр  $t$  опустим. Структурная модель автокомпенсатора для временных отклонений сигналов на выходах соответствующих блоков схемы представлена на рис. 2.

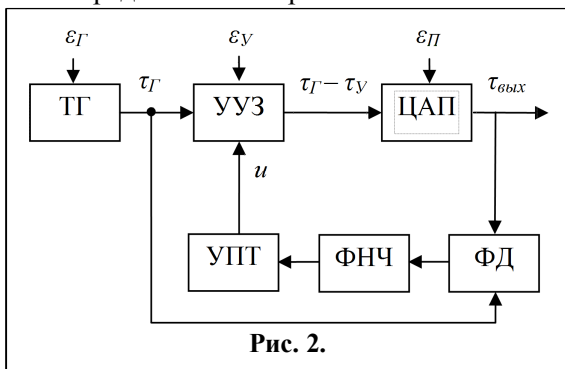


Рис. 2.

Сигнал на выходе ФД является функцией разности задержек (фазовых сдвигов) информационного и опорного сигналов  $d_{\varepsilon} = \tau_{\text{вых}} - \tau_{\Gamma}$ . Обозначим характеристику ФД как  $\tilde{F}_{\text{Д}}(d_{\varepsilon}) = \tilde{F}_{\text{Д}}(\tau_{\text{вых}} - \tau_{\Gamma})$ .

Уравнение управляющего сигнала автокомпенсатора (рис. 2) при отклонении  $\tau_{\Gamma}$

$$u = n_{\Upsilon} M(p) \tilde{F}_{\text{Д}}(\tau_{\text{вых}} - \tau_{\Gamma}),$$

где  $n_{\Upsilon}$  и  $M(p)$  - коэффициенты передачи УПТ и ФНЧ,  $p = d/dt$  - оператор.

Обозначим:  $\tau_{\Gamma} = K_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma}$ , где  $K_{\Gamma}$  - коэффициент преобразования дестабилизирующего фактора во временное отклонение выходного сигнала ТГ;  $\tau_{\Upsilon} = \tilde{K}(u + \varepsilon_{\Upsilon})$  - характеристику УУЗ с учетом воздействия дестабилизирующего фактора, пересчитанного в отклонение управляющего сигнала УУЗ;  $\tau_{\Pi} = \tilde{F}_{\Pi}(\varepsilon_{\Pi})$  - характеристику преобразования дестабилизирующего фактора во временное отклонение выходного сигнала ЦАП. Тогда уравнение автокомпенсатора для задержки выходного сигнала примет вид

$$\tau_{\text{вых}} = K_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma} - \tilde{K} [n_{\Upsilon} M(p) \tilde{F}_{\text{Д}}(\tau_{\text{вых}} - K_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma}) - K_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma}] + \tilde{F}_{\Pi}(\varepsilon_{\Pi}) \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение (1) полностью описывает работу устройства. Во многих реальных случаях дестабилизирующие факторы не являются монохроматическими. В общем случае уравнение (1), описывающее поведение устройства в динамическом режиме, является нелинейным и имеет произвольный порядок, его общее решение отсутствует. Если провести непрерывную кусочную линеаризацию на основе НКЛФ, то можно получить для преобразователя с произвольными характеристиками составляющих звеньев выражения передаточных характеристик [13], количественно и качественно исследовать устойчивость [14-16], частотные и динамические свойства автокомпенсатора [17,18].

Характеристики УУЗ, ФД и ЦАП аппроксимируем при помощи НКЛФ. Обозначим их соответственно  $K_{\Upsilon}(u + \varepsilon_{\Upsilon})$ ,  $F_{\text{Д}}(\tau_{\text{вых}} - K_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma})$  и  $F_{\Pi}(\varepsilon_{\Pi})$

$$K_Y(u + \varepsilon_Y) = \sum_{m=0}^{M-1} [K_{Y_m}(u + \varepsilon_Y) + B_{Y_m}] Q_{Y_m},$$

$$F_D(\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G) = \sum_{n=0}^{N-1} [K_{D_n}(\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G) + B_{D_n}] Q_{D_n},$$

$$F_{\Pi}(\varepsilon_{\Pi}) = \sum_{s=0}^{S-1} [K_{\Pi_s} \varepsilon_{\Pi} + B_{\Pi_s}] Q_{\Pi_s}, \quad (2)$$

где 
$$K_{Y_m} = \frac{\tilde{K}(U_{p_{m+1}}) - \tilde{K}(U_{p_m})}{\Delta_u},$$

$$K_{D_n} = \frac{\tilde{F}(D_{n+1}) - \tilde{F}(D_n)}{\Delta_d}, \quad K_{\Pi_s} = \frac{\tilde{F}_{\Pi}(V_{s+1}) - \tilde{F}_{\Pi}(V_s)}{\Delta_{\Pi}}$$

и  $B_{Y_m} = \tilde{K}(U_{p_m}) - K_{Y_m} U_{p_m}$ ,  $B_{D_n} = \tilde{F}(D_n) - K_{D_n} D_n$  и  $B_{\Pi_s} = \tilde{F}_{\Pi}(V_s) - K_{\Pi_s} V_s$  – коэффициенты отрезков прямых, аппроксимирующих характеристики УУЗ, ФД и ЦАП в узлах аппроксимации  $m$ ,  $n$  и  $s$ ;  $M$ ,  $N$ ,  $S$  – максимальные номера узлов аппроксимации;  $U_{p_m}$ ,  $D_n$  и  $V_s$  – значения  $u_p$ ,  $d_e$  и  $\varepsilon_{\Pi}$  в узлах  $m$ ,  $n$  и  $s$  соответственно;  $\Delta_u$ ,  $\Delta_d$  и  $\Delta_{\Pi}$  – шаг аппроксимации  $u_p$ ,  $d_e$  и  $\varepsilon_{\Pi}$ ;  $Q_{Y_m} = Q_{Y_m}(u + \varepsilon_Y)$ ,  $Q_{D_n} = Q_{D_n}(\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G)$ ,  $Q_{\Pi_s} = Q_{\Pi_s}(\varepsilon_{\Pi})$  – функции включения отрезков аппроксимирующих прямых.

Каждая функция включения  $Q_{Y_m}$ ,  $Q_{D_n}$  и  $Q_{\Pi_s}$  отлична от нуля и равна единице только на интервале между узлами соответственно  $(m; m+1)$ ,  $(n; n+1)$  и  $(s; s+1)$

$$Q_{Y_m}(u + \varepsilon_Y) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 ((-1)^{\lambda+\gamma} \times$$

$$\times |u + \varepsilon_Y - U_{p_m} - \gamma\Delta_u + \Delta(1-\lambda)|),$$

$$Q_{D_n}(\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 ((-1)^{\lambda+\gamma} \times$$

$$\times |\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G - D_n - \gamma\Delta_d + \Delta(1-\lambda)|),$$

$$Q_{\Pi_s}(\varepsilon_{\Pi}) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 ((-1)^{\lambda+\gamma} \times$$

$$\times |\varepsilon_{\Pi} - V_s - \gamma\Delta_{\Pi} + \Delta(1-\lambda)|), \quad (3)$$

где  $\Delta$  – произвольно малая величина ( $\Delta \rightarrow 0$ ),  $\lambda$  и  $\gamma$  – целые числа. Управляющий сигнал

$$u = n_y M(p) \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{N-1} [K_{D_n}(\tau_{\text{вых}} - K_G \varepsilon_G) + B_{D_n}] Q_{D_n}. \quad (4)$$

Тогда уравнение преобразователя с учетом и дестабилизирующих воздействий

$$\tau_{\text{вых}} = K_G \varepsilon_G -$$

$$- \sum_{m=0}^{M-1} [K_{Y_m}(u + \varepsilon_Y) + B_{Y_m}] Q_{Y_m} +$$

$$+ \sum_{s=0}^{S-1} [K_{\Pi_s}(\varepsilon_{\Pi}) + B_{\Pi_s}] Q_{\Pi_s}. \quad (5)$$

Подставим (4) в (5), введем обозначения

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

$$N_{Y_m} = \sum_{m=0}^{M-1} K_{Y_m} Q_{Y_m},$$

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

$$R_{mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_{Y_m} B_{D_n} Q_{Y_m} Q_{D_n},$$

$$E_{Y_m} = \sum_{m=0}^{M-1} B_{Y_m} Q_{Y_m},$$

$$R_{\Pi_s} = \sum_{s=0}^{S-1} B_{\Pi_s} Q_{\Pi_s}$$

и после преобразования получим

$$\tau_{\text{вых}} = \left\{ [1 - n_y M(p) N_{mn}] K_G \varepsilon_G -$$

$$- N_{Y_m} \varepsilon_Y + N_{\Pi_s} \varepsilon_{\Pi} -$$

$$- n_y M(p) R_{mn} - E_{Y_m} + R_{\Pi_s} \right\} \div$$

$$\div [1 + n_y M(p) N_{mn}] \quad (6)$$

Модель, построенная по (6) представлена на рис. 3. Она иллюстрирует роль коэффициентов уравнения в формировании временного отклонения выходного сигнала.

Уравнение (6) полностью описывают поведение непрерывной кусочно-линеаризованной модели автокомпенсатора при изменениях дестабилизирующих факторов. Оно позволяет непосредственно получить выражения для передаточных характеристик устройства при произвольных характеристиках составляющих звеньев и найти законы изменения временного сдвига выходного сигнала. Преобразуем (6)

$$\tau_{\text{вых}} = \frac{1 - n_y M(p) N_{mn}}{1 + n_y M(p) N_{mn}} K_G \varepsilon_G -$$

$$- \frac{N_{Y_m}}{1 + n_y M(p) N_{mn}} \varepsilon_Y +$$

$$+ \frac{N_{\Pi_s}}{1 + n_y M(p) N_{mn}} \varepsilon_{\Pi} -$$

$$- \frac{n_y M(p) R_{mn} + E_m + R_{\Pi_s}}{1 + n_y M(p) N_{mn}}. \quad (7)$$

Передаточные характеристики (ПдХ) нелинейного автокомпенсатора по соответствующему воздействию  $X$  имеют вид  $H_X = \tau_{\text{вых}} / X$ .

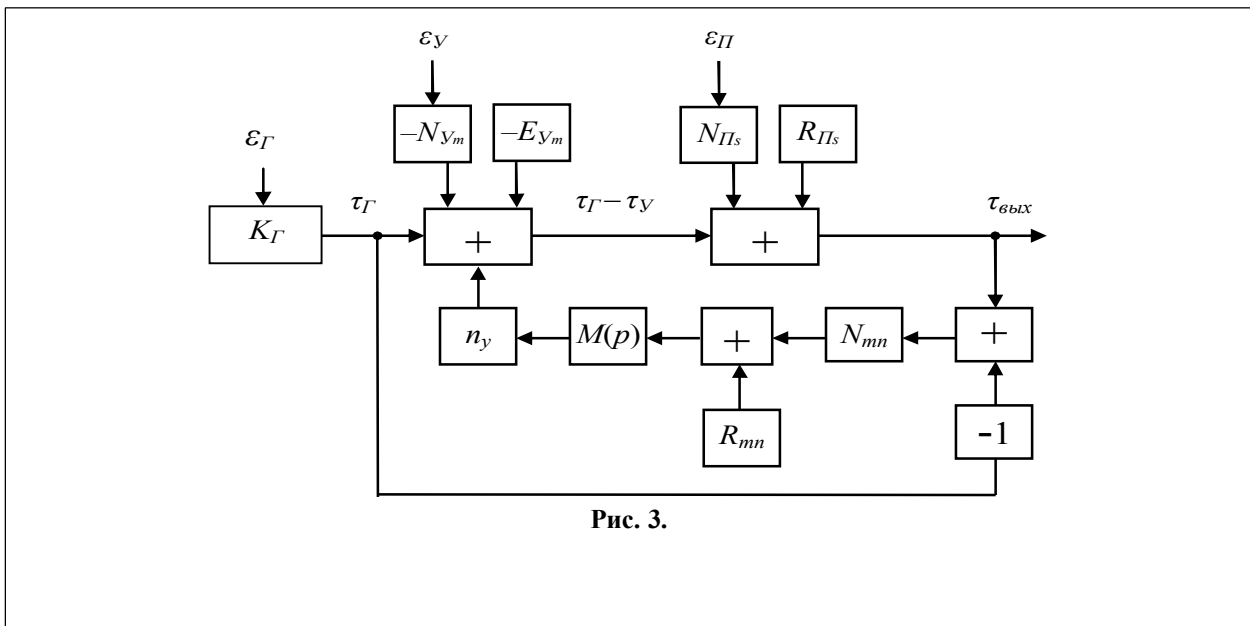


Рис. 3.

В отличие от передаточной функции линеаризованной системы, ПдХ справедливы не только в окрестности точки стационарного режима или рабочей точки устройства, но и при любых изменениях воздействия и отклика [19].

Так как в (7) участвуют три независимых возмущения, которые могут привести к временному сдвигу выходного сигнала, то в общем случае, получаем три ПдХ автокомпенсатора

$$H_{\varepsilon_{\Gamma}} = \frac{1 - n_y M(p) N_{mn}}{1 + n_y M(p) N_{mn}} K_{\Gamma}, \quad H_{\varepsilon_y} = \frac{-N_{y_m}}{1 + n_y M(p) N_{mn}},$$

$$H_{\varepsilon_{\Pi}} = \frac{N_{\Pi s}}{1 + n_y M(p) N_{mn}}. \quad (8)$$

Обозначим символом  $G$  – отклонение  $\tau_{\text{вых}}$  вследствие воздействия постоянных составляющих характеристик звеньев устройства

$$G = \frac{n_y M(p) R_{mn} + E_m + R_{\Pi s}}{1 + n_y M(p) N_{mn}}. \quad (9)$$

Преобразуем (7)

$$\tau_{\text{вых}} = H_{\varepsilon_{\Gamma}} \varepsilon_{\Gamma} + H_{\varepsilon_y} \varepsilon_y + H_{\varepsilon_{\Pi}} \varepsilon_{\Pi} - G. \quad (10)$$

Выражение (10) полностью описывает статический и динамический режимы нелинейного автокомпенсатора. Это кусочно-линейное дифференциальное уравнение, справедливое при произвольных значениях и видах дестабилизирующих факторов, а также при произвольных характеристиках звеньев автокомпенсатора. В случае воздействия на устройство не

всех рассматриваемых факторов, отсутствующее воздействие в уравнении приравнивается к нулю.

Для вывода аналитических выражений конкретного устройства достаточно подставить значения действующих возмущений, коэффициенты конкретных характеристик автокомпенсатора и передаточную функцию ФНЧ в (8), (9) и преобразовать выражения.

Полученные ПдХ справедливы при произвольных характеристиках, составляющих автокомпенсатор звеньев, и произвольных законах изменения дестабилизирующих факторов, воздействующих на ТГ, УУЗ и ЦАП. С их помощью можно установить степень компенсации помех ЦАП, исследовать устойчивость и частотные характеристики, статические и динамические режимы устройства.

Нелинейный режим работы устройства возможен в условиях реальной эксплуатации вследствие выхода отклонений фаз сигналов за пределы линейного участка характеристик ФД, из-за возрастания управляющего напряжения до величин, когда начинают проявляться нелинейные свойства УУЗ и других факторов. Анализ нелинейных режимов позволяет определить ряд важных статических характеристик (выбор рабочих точек, режимы схватывания, удержания и др.), а так же динамических характеристик автокомпенсаторов. Для примера рассмотрим стационарный режим нелинейного

автокомпенсатора при воздействии дестабилизирующего фактора на ЦАП. Стационарный режим соответствует окончанию всех переходных процессов в системе ( $p \rightarrow 0$ ).

Полагаем, что изменения дестабилизирующего фактора квазистатические, а дестабилизирующие воздействия на ТГ и УУЗ отсутствуют:  $\varepsilon_I = \varepsilon_V = 0$ . Обозначим статические значения параметров автокомпенсатора и его характеристик верхними индексами «ноль». Коэффициент передачи фильтра в стационарном режиме  $M(0) = \alpha_0 / \beta_0$ , где  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции фильтра.

После преобразования (10) с учетом (8) и (9) получим аналитическое выражение для статических регулировочных характеристик

$$\tau_{вых}^0(\varepsilon_{II}^0) = \left( \beta_0 \sum_{s=0}^{S-1} (K_{\Pi s} \varepsilon_{II}^0 + B_{\Pi s}) * Q_{\Pi s} \right) - \sum_{m=0}^{M-1} \left( K_{Ym} n_y \alpha_0 * \sum_{n=0}^{N-1} B_{Dn} Q_{Dn} + B_{Vm} \beta_0 \right) Q_{Vm} / \left( \beta_0 + n_y \alpha_0 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_{Ym} K_{Dn} Q_{Vm} Q_{Dn} \right)$$

Пусть нелинейности характеристик УУЗ и ЦАП малы по сравнению с характеристикой ФД. Для линейных характеристик примем коэффициенты аппроксимации равными  $K_{Ym} = K_{\Pi s} = 1$ ,  $B_{Vm} = B_{\Pi s} = 0$ , в качестве фильтра используем интегрирующий или пропорционально-интегрирующий фильтр  $\alpha_0 = \beta_0 = 1$ ,  $M(0) = 1$ . Тогда уравнение стационарного режима автокомпенсатора примет вид

$$\tau_{вых}^0(\varepsilon_{II}^0) = \frac{\varepsilon_{II}^0 - \sum_{n=0}^{N-1} B_{Dn} Q_{Dn}}{1 + n_y \sum_{n=0}^{N-1} B_{Dn} Q_{Dn}}$$

При треугольной характеристике детектора для её аппроксимации с постоянным шагом на участке аргумента  $0 \div 2\pi$  достаточно четырех отрезков прямых ( $N=4$ ).

Графики статических характеристик автокомпенсатора с треугольной характеристикой ФД для различных значений  $n_y$  представлены на рис. 4. Значения  $\tau_{вых}^0$  нормированы к  $T_\Gamma$  - периоду ТГ.

Пунктирной линией показано отклонение выходного параметра преобразователя при разомкнутой цепи регулирования ( $n_y = 0$ ). При

$n_y = 1$  на начальном участке характеристики наблюдается компенсация действия дестабилизирующего фактора. Степень компенсации на начальном участке возрастает пропорционально увеличению значения  $n_y$ . Однако при увеличении воздействия отклонение попадает на участок ФД с отрицательной крутизной, регулирующее действие уменьшается до нуля и наблюдается перекомпенсация.

При  $n_y > 1$  на характеристиках появляются неоднозначные участки и график приобретает гистерезисный характер, возникают режимы «схватывания-удержания». С увеличением коэффициента передачи УПТ происходит увеличение полосы удержания и уменьшение полосы схватывания устройства.

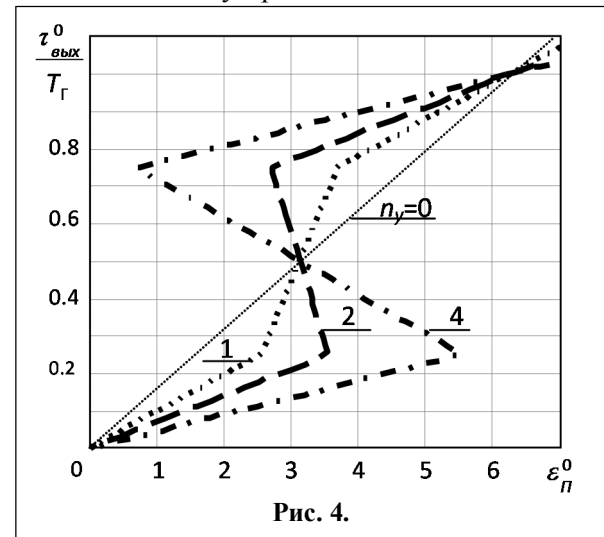


Рис. 4.

Если характеристика ФД – синусоидальная функция, аппроксимируем ее при помощи 8 отрезков прямых ( $N=8$ ). Графики статических характеристик автокомпенсатора с такой характеристикой ФД для различных значений  $n_y$  представлены на рис. 5. Характер зависимости аналогичен рассмотренному выше.

Проведенный анализ подтверждает эффективность предложенного подхода исследования режимов нелинейного автокомпенсатора на основе использования аппарата передаточных характеристик и эффективность применения автокомпенсатора для подавления фазовых помех ЦАП.

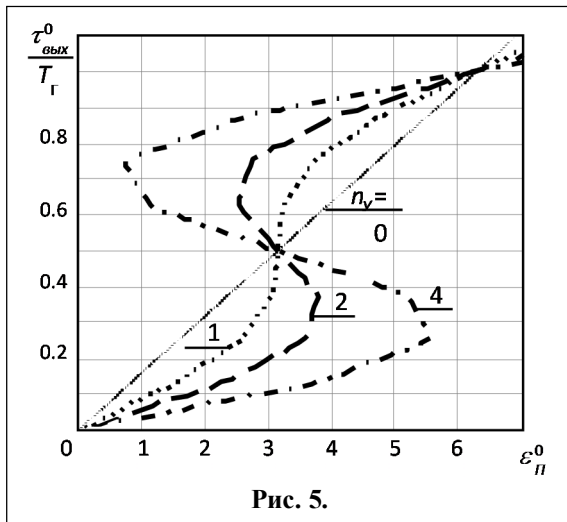


Рис. 5.

### Литература

1. Рудаков А.М., Курилов И.А., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. – Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.
2. Смекалов А. И. Метод прямого цифрового синтеза гармонического сигнала. Анализ и математическое моделирование. – Радиотехника, 2011, №1.- С. 27-38.
3. Курилов И.А., Романов Д.Н. Цифровая реализация преобразования Фурье на основе непрерывных кусочно-линейных функций. – Методы и устройства передачи и обработки информации. 2010. № 12. С. 12-14.
4. Курилов И.А. Анализ устройств амплитудно-фазового преобразования сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций. – Радиотехника. 2006. № 11. С. 55-60.
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., Васильев Г.С., Харчук С.М. Исследование статических режимов преобразователей сигналов при внутренних возмущениях. – Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 75-79.
7. 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.
8. Курилов И.А., Ромашов В.В., Васильев Г.С. Статические характеристики гистерезисных амплитудно-фазовых преобразователей сигналов. – Радиотехника. 2009. № 11. С. 86-88.

Поступила 08 февраля 2014 г.

9. 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.

10. Курилов И.А. Динамические характеристики линейного амплитудно-фазового преобразователя произвольного порядка. – Радиотехника. 2007. № 6. С. 31-35.

11. Курилов И.А., Васильев Г.С. Динамические характеристики нелинейного амплитудно-фазового преобразователя с регулированием по отклонению. – Радиотехника. 2009. № 11. С. 81-85.

12. Курилов И.А. Динамические характеристики линейного амплитудно-фазового преобразователя произвольного порядка. – Радиотехника. 2009. № 6. С. 31-35.

13. 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.

14. 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)/ Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2013.

15. Курилов И.А., Суржик Д.И., Васильев Г.С., Харчук С.М. Исследование параметрической устойчивости системы ФАПЧ на основе непрерывных кусочно-линейных функций – 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2013.

16. 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.

17. 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.

18. Курилов И.А., Ромашов В.В. Переходные режимы амплитудно-фазового преобразователя четвертого порядка. – Радиотехника. 2008. № 9. С. 94-98.

19. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Передаточные характеристики нелинейного преобразователя сигналов. – Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 80-84.

**Simulation of a non-linear self-balancing potentiometer of phase interferences of a digital-analog converter of a direct digital frequency synthesizer**

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

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

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

Address: Orlovskaya st., 23. Vladimir region, Murom, 602264, Russia.

*Abstract:* The paper considers the block diagram of linear self-balancing potentiometer of phase interferences of a digital-analog converter of a direct digital frequency synthesizer. The structural model of a self-balancing potentiometer for analysis of temporary signals deviation in the outputs of the main component links and the output signal of the device as a whole has been suggested. The differential equation of the non-linear self-balancing potentiometer has been composed. Approximation of nonlinear characteristics of a clock generator, a signal delay control device and a digital/analog transformer is performed on the basis of continuous piecewise linear functions. Piecewise linearization is done and a continuous piecewise linear differential equation of a non-linear self-balancing potentiometer is received for the cases of simultaneous action of independent destabilizing perturbations on a clock generator, on the delay control device and on a digital/analog transformer. The equation is valid at arbitrary values and types of destabilizing perturbations as well as at arbitrary performances of links of a self-balancing potentiometer. The model illustrating the role of equation coefficients in generating temporary deviation of an output signal has been created. The generalized expressions of transmitting performances of a non-linear self-balancing potentiometer have been received. Transmitting performances of a self-balancing potentiometer for each type of a destabilizing factor are valid not only in the environment of a device operation point but also at any changes of the action and the response, at arbitrary performances constituting a self-balancing potentiometer of links, and arbitrary laws of change of destabilizing factors attacking a clock generator, a signal delay control device and a digital/analog transformer. Expressions of transmitting performances of a stationary mode have been received and graphics of static characteristics of a non-linear self-balancing potentiometer for a destabilizing factor action on a digital/analog transformer, allowing to determine a level of interference compensation of a digital/analog transformer in stationary conditions have been plotted for self-balancing potentiometers with integrated and proportionally integrated filters.

*Key words:* self-balancing potentiometer of phase interferences, piecewise linear function, transmitting performance, stationary mode, static characteristics.

**References**

1. Rudakov A.M., Kurilov I.A., Harchuk S.M., Romanov D.N. Mathematical Simulation Phase Interference Autoequalization of Digital-to-Analog Converter in DDS. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. № 2, 2013. p. 19-25.
2. Smekalov A.I. Method of Direct Digital Synthesis of a Harmonic Signal. Radiotekhnika, 2011, № 1. P. 27-38.
3. Kurilov I.A., Romanov D.N. Digital Implementation of Fourier Transform on the Basis of the Continuous Piecewise Linear Functions. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. 2010, №12. P. 12-15.
4. Kurilov I.A. The Analysis of Devices of Amplitude-Phase Signal Conversion on the basis of the Continuous Piecewise Linear Functions. Radiotekhnika. 2006, №11. P. 55-60.
5. Kurilov I.A., Romanov D.N., Kharchuk S.M. Approximation of Performances and Signals on the Basis of Comprising Continuous Piecewise Linear Functions. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii: Mezhd. sb. nauch. tr. / Ed. by V.V. Romashova. M: Radiotekhnika, 2007, Issue 8. P. 7-11.
6. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. The Investigation of Static Modes of Signal Converters in case of Internal Disturbance. Voprosy radioelektroniki, 2010, Issue 1., P. 75-79.
7. Kurilov I.A., Vasilev G.S., Harchuk S.M. Static Modes of Amplitude-Phase Transformation in under the Conditions of Destabilizing Action. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2011. № 2. P. 15-19.
8. Kurilov I.A., Romashov V.V., Vasilyev G.S. The Static Performances of Hysteresis Amplitude-Phase Signal Converters. Radiotekhnika. 2009, №11. P. 86-8



9. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. The analysis of Dynamic Performances of Signal Converters on the Basis of Continuous Piecewise Linear Functions. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzhja. 2010, №1. P. 100-104.
10. Kurilov I.A. Dynamic Performances of a Linear Amplitude-Phase Converter with Arbitrary Order. Radiotekhnika. 2007. № 6. P. 31-35.
11. Kurilov I.A., Vasilyev G.S. Dynamic performances of Non-linear Amplitude-phase Converter with Error-Closing Control. Radiotekhnika. 2009, №11. P. 81-85.
12. Kurilov I.A. Dynamic Performances of a Linear Amplitude-Phase Converter with Arbitrary Order. Radiotekhnika. 2009. № 6. P. 31-35.
13. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. The Simulation of Signal Converter with Combined Adjustment on the basis of Transmission Performances. Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv. Vladimir, 2011, №1. P. 34-38.
14. 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)/ Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2013.
15. Kurilov I.A., Surzhik D.I., Vasil'ev G.S., Harchuk S.M. Research of the Phase-Locked Loop System Parametric Stability on the Basis of Continuous Piecewise Linear Functions. 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2013.
16. Vasil'ev G.S., Kurilov I.A., Harchuk S.M., Surzhik D.I. Research into Signal Converter Stability on the Basis of Continuous Piecewise Linear Functions. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2012. 1. P. 4-7.
17. Kurilov I.A., Vasilev G.S., Harchuk S.M. Research into Transmission Processes of Amplitude-Phase Converter by Spectral Method on the Basis of Continuous Piecewise Linear Functions. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. 2009. № 11. P. 72-78.
18. Kurilov I.A., Romashov V.V. Transient Modes of the Amplitude-Phase Converter of the Fourth Order. Radiotekhnika. 2008, №9. P. 94-98.
19. Kurilov I.A., Vasilev G.S., Harchuk S.M. Transmission Performances of a Non-linear Signal Converter. Voprosy radioelektroniki. 2010. Vol. 1. № 1. P. 80-84.