

Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Часть 1. Фильтрация помех структурой ФАП

(продолжение)

Юрий Никитин (Санкт-Петербург)

Одним из наиболее важных свойств кольца ФАП является фильтрация помех. Рассмотрению этого вопроса посвящена данная часть статьи.

Анализ фильтрации помех кольцом ФАП

На рис. 1 приведена линеаризованная структурная схема синтезаторного квазиэлектронного кольца ИФАП, предназначенная для анализа его фильтрующих свойств.

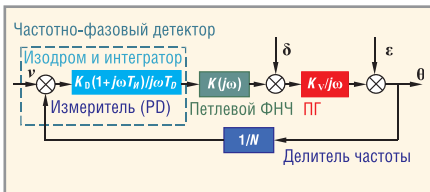


Рис. 1. Структурная схема кольца ФАП с ЧФД для анализа фильтрации помех

v – малые помехи, приходящие с опорным колебанием $\omega_{\text{ОП}} = 2\pi F_{\text{REF}}$; δ – малые помехи, воздействующие на вход управления ГУН; ϵ – малые помехи, воздействующие на выходное колебание ГУН; измеритель (Error Detector) включает в себя собственно фазовый детектор PD (Phase Detector) и, может быть, источник тока поддержания заряда CP (Charge Pump) с изодромным звеном (изодром + интегратор); T_D – постоянная времени ЧФД; T_I – постоянная времени изодромного звена; K_D – крутизна статической характеристики ЧФД [рад/А] в точке устойчивого равновесия; $K(j\omega)$ или $K(s)$ – коэффициент передачи петлевого фильтра (Loop Filter) или фильтра нижних частот (ФНЧ) – запись в частотной или в операторной форме; K_V – крутизна управляющей характеристики ГУН [Гц/В]; Θ – малые помехи в выходном колебании кольца; $1/N$ – коэффициент передачи делителя (частоты) с переменным или дробно-переменным коэффициентом деления (ДПКД или ДДПКД) в тракте приведения частоты ПГ

Запишем для коэффициента передачи разомкнутого кольца в операторной форме:

$$G_N(s) = K_D K_V K(s) \frac{1 + sT_I}{s^2 NT_D} = \frac{G_1(s)}{N}, \quad (1)$$

где $G_1(s)$ – операторный коэффициент передачи разомкнутого кольца с единичной обратной связью ($N=1$). Для качественного (предварительного) анализа фильтрующих свойств кольца ФАП удобно считать, что петлевой ФНЧ отсутствует и $K(s) = 1$. Характеристики непрерывного (не импульсного) бесфильтрового кольца с единичной обратной связью наиболее просты в построении и наглядны при анализе; с ними удобно сравнивать характеристики более сложных колец ФАП [1–5]. Коэффициент передачи на выход системы

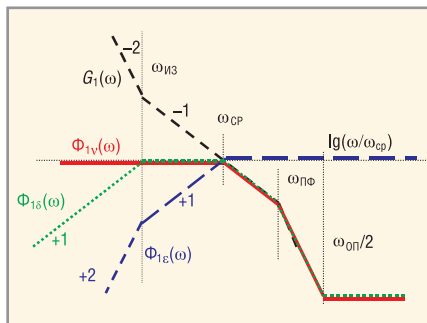


Рис. 2. ЛАХ бесфильтрового кольца ИФАП с единичной обратной связью для анализа фильтрации помех

Цифрами обозначены нормированные крутизны ЛАХ: $\pm 1 \Leftrightarrow \pm 20$ дБ/дек $\equiv \pm 6$ дБ/окт; $\pm 2 \Leftrightarrow \pm 40$ дБ/дек $\equiv \pm 12$ дБ/окт.

ФАП фазовых шумов v опорного сигнала, фазовых возмущений δ и ϵ , вызванных помехами, воздействующими на цепь управления ПГ и на собственно ПГ, можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{1v}(s) = \frac{\Theta}{v} = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)}, \quad \text{где } \delta \text{ и } \epsilon = 0, \quad (2)$$

$$\Phi_{1\epsilon}(s) = \frac{\Theta}{\epsilon} = \frac{1}{1 + G_1(s)}, \quad \text{где } \delta \text{ и } v = 0, \quad (3)$$

$$\Phi_{1\delta}(s) = \frac{\Theta}{\delta} = \frac{1}{1 + G_1(s)} \frac{K_V}{s} = \Phi_{1\epsilon}(s) \frac{K_V}{s}, \quad \text{где } \epsilon \text{ и } v = 0. \quad (4)$$

ЛАХ $G_1(s)$, $\Phi_{1v}(s)$, $\Phi_{1\epsilon}(s)$ бесфильтрового кольца ФАП с единичной обратной связью приведены на рис. 2. Из рис. 2 и формул (2) – (4) следует, что для помех, приходящих с опорным колебанием, кольцо ФАП является фильтром нижних частот с частотой среза (единичного усиления) $\omega_{\text{СР}}$, в то время как для помех, воздействующих на ПГ (ГУН), кольцо ФАП является фильтром верхних частот. Частоты среза (излома) у обоих фильтров равны. Сказанное означает, что в области фазовых возмущений слева от частоты среза кольца ФАП (рис. 2) кольцо компенсирует дестабилизирующие воздействия на ПГ и делает это тем эффективнее, чем шире полоса прозрачности кольца (выше его частота среза $\omega_{\text{СР}}$) и ниже частота возмущения.

Например, кольцо эффективно отслеживает изменения параметров элементов вследствие старения, тем-

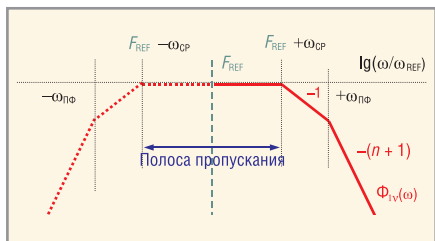


Рис. 3. ЛАХ следящего фильтра аналогового кольца ФАП с единичной обратной связью

пературные уходы ПГ; несколько хуже – воздействия механических вибраций, ещё хуже, но ещё эффективно, – воздействие помех по цепям питания. А ВЧ-наводки на ПГ кольцо пропускает на выход без ослабления – в этом случае помогает рациональная топология и экранирование. Зато низкочастотные вариации частоты опорного колебания кольцо беспрепятственно пропускает на выход. Для помех, воздействующих на вход управления ПГ (варикапы ГУН), кольцо ФАП является низкодобротным полосовым фильтром, подчёркивающим приходящие помехи в области частот от излома изодромного звена $\omega_{ИЗ} = 1/T_{ИЗ}$ до частоты среза кольца $\omega_{СР}$. Правый от частоты $\omega_{СР}$ «положительный» излом на ЛАХ рис. 2 вызван наличием петлевого фильтра с коэффициентом передачи $K(s)$ и частотой излома $\omega_{ПФ}$. «Отрицательный» излом ЛАХ на частоте $\omega_{ОН}/2$ есть следствие импульсности системы ИФАП.

Отметим ещё одно важное обстоятельство. Из анализа ЛАХ коэффициента передачи $\Phi_{1V}(\omega)$ (рис. 2) можно сделать вывод, что непрерывное кольцо ФАП с единичной обратной связью является высокоэффективным следящим фильтром частоты $\omega_{ОН} = 2\pi F_{REF}$. Характеристика избирательности этого фильтра тем выше, чем круче спад ЛАХ кольца за частотой сравнения $\omega_{СР}$, т.е. чем больше звеньев содержит петлевой ФНЧ (рис. 3).

Следует добавить, что у аналогового кольца ФАП, которое используют в качестве следящего фильтра частоты F_{REF} , нет ограничений на протяжённость зоны фильтрации $\pm 0,5F_{REF}$, как у цифровых (импульсных) колец ИФАП. При проектировании такого кольца необходимо лишь соблюсти условия сохранения устойчивости вследствие набега фазы на частоту среза кольца $\omega_{СР}$ от звеньев петлевого ФНЧ.

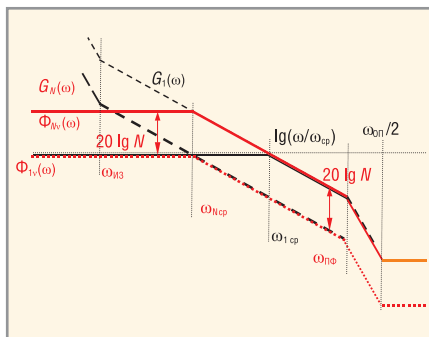


Рис. 4. ЛАХ синтезаторного кольца ИФАП для анализа фильтрации помех ν

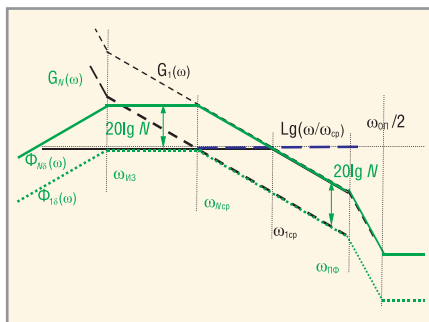


Рис. 6. ЛАХ синтезаторного кольца ИФАП для анализа фильтрации помех δ

Для синтезаторного кольца формулы (2) – (4) изменяются:

$$\Phi_{N\nu}(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)} N = \Phi_{1\nu} N, \quad (5)$$

$$\Phi_{Ne}(s) = \frac{1}{[1 + G_1(s)]} \frac{1}{N} = \frac{\Phi_{1e}(s)}{N}, \quad (6)$$

$$\Phi_{N\delta}(s) = \Phi_{Ne}(s) \frac{K_V}{s}. \quad (7)$$

Соответствующие формулам (5) – (7) графики показаны на рис. 4 – 6. Там же для сравнения пунктиром приведён график $G_1(\omega)$ для кольца с единичной обратной связью.

Формулы (5) – (7) и рис. 4 – 6 показывают, как изменяются фильтрующие свойства кольца при введении делителя на N в цепь обратной связи. Важный для практики вывод заключается в том, что зона эффективной компенсации помех, воздействующих на ПГ, существенно сужается. Так же существенно (в N раз) кольцо подчёркивает низкочастотные флуктуации опорного колебания и помехи, воздействующие на вход управления ПГ [6].

Анализ ЛАХ коэффициента передачи $\Phi_{N\nu}(\omega)$ (рис. 4) показывает, что импульсное кольцо ИФАП (АФАП) с неединичной обратной связью про-

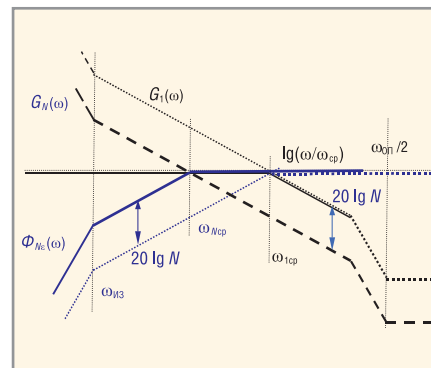


Рис. 5. ЛАХ синтезаторного кольца ИФАП для анализа фильтрации помех ϵ

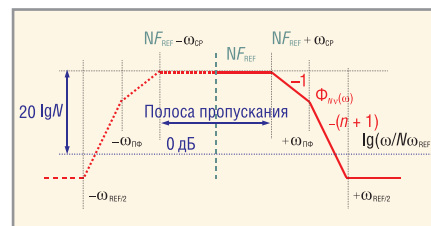


Рис. 7. ЛАХ коэффициента передачи помех, приходящих с опорным сигналом на выход импульсного кольца ФАП с ДПКД на N в цепи обратной связи

должен оставаться эффективным фильтром частоты NF_{REF} . Характеристика избирательности этого фильтра тем выше, чем круче спад ЛАХ кольца за частотой сравнения $\omega_{СР}$, т.е. чем больше звеньев содержит петлевой ФНЧ (рис. 7).

Ухудшение фильтрующих свойств синтезаторного (цифрового) кольца ИФАП по сравнению с обычным аналоговым кольцом ФАП – следящим фильтром – есть плата за переход в новое качество – возможность синтеза сетки частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шати́ро Д.Н., Паин А.А. Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981.
2. Манасевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование). М.: Связь, 1979.
3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991.
4. Зарецкий М.М., Мовинович М.Е. Синтезаторы частоты с кольцом фазовой автоподстройки. Л.: Энергия, 1974.
5. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1977.
6. Карпов Л.В., Никитин Ю.А. Инженерная методика расчета астатической синтезаторной системы ФАПЧ. Известия ВУЗов. Приборостроение. 1990. № 11. С. 50–56.

