

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИНТЕГРАЛЬНОГО ПЕТЛЕВОГО ФИЛЬТРА КОНТУРА ФАПЧ
С УМНОЖЕНИЕМ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА**

© 2016 г. А.А. ЗАЙЦЕВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград

Введение

Одной из характеристик сложных функциональных блоков синтезаторов сетки частот (ССЧ) на базе контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) является площадь, занимаемая ССЧ на кристалле микросхемы. Уменьшение площади блока ССЧ создает предпосылки для размещения на кристалле большего количества функциональных блоков. В докладе рассмотрен метод эквивалентного умножения емкости конденсатора изодромного звена блока петлевого фильтра (ПФ) контура ФАПЧ, обеспечивающий многократное уменьшение значения емкости конденсатора при полном сохранении ПФ заданных корректирующих свойств. Метод основан на использовании усилителя напряжения и дополнительного источника тока в составе блока накачки заряда, вырабатывающего ток меньшей амплитуды и аналогичного основному току направления. Представлены выражения для расчета значений элементов эквивалентного ПФ и исследовано влияние на его характеристики нарушения требуемого отношения токов основного и дополнительного источников тока блока накачки заряда, вызванного технологическим разбросом при производстве кристалла микросхемы.

Проблема большой емкости конденсатора изодромного звена блока ПФ

Проектирование ССЧ на базе контура ФАПЧ подробно рассмотрено в [1]. Устойчивость замкнутого контура ФАПЧ обеспечивается соответствующим запасом по фазе на частоте единичного усиления контура в разомкнутом состоянии. Формирование необходимого запаса по фазе осуществляется соответствующей АФЧХ блока ПФ. В свою очередь АФЧХ блока ПФ характеризуется и частотами нуля ω_Z и полюса ω_P , частотой ω_{0LF} , на которой ПФ имеет минимальное фазовое запаздывание (т.е. максимальный запас по фазе до значения -90°) и собственно величиной запаса по фазе φ_{0LF} .

Введем параметр W_{LF} , характеризующий ширину интервала между частотами

ω_Z и ω_P как: $W_{LF} = \frac{\omega_P}{\omega_Z}$. При этом запас по фазе φ_{0LF} равен:

$$\varphi_{0LF} = \arcsin \frac{W_{LF} - 1}{W_{LF} + 1}.$$

Частоты ω_Z и ω_P могут быть найдены через ω_{0LF} и W_{LF} как:

$$\omega_Z = \frac{\omega_{0LF}}{\sqrt{W_{LF}}} \quad \text{и} \quad \omega_P = \omega_{0LF} \sqrt{W_{LF}}.$$

На рис. 1 представлена зависимость ширины интервала W_{LF} от запаса по фазе φ_{0LF} .

Типовая структурная схема блока пассивного ПФ 2-го порядка представлена на рис. 2, а [1]. Заряд, вносимый током I_0 , накапливается на конденсаторах C_P и C_Z , формируя управляющее напряжение V_{VCO} . Импеданс $Z(s)$ блока ПФ равен:

$$Z(s) = \frac{s\tau_z + 1}{s(C_z + C_p)(s\tau_p + 1)}, \text{ где } \tau_z = R_z C_z = \frac{1}{\omega_z}, \tau_p = \tau_z \frac{C_p}{C_z + C_p} = \frac{1}{\omega_p}.$$

Отношение значений емкостей конденсаторов C_z и C_p связано с шириной интервала W_{LF} как:

$$\frac{C_z}{C_p} = W_{LF} - 1.$$

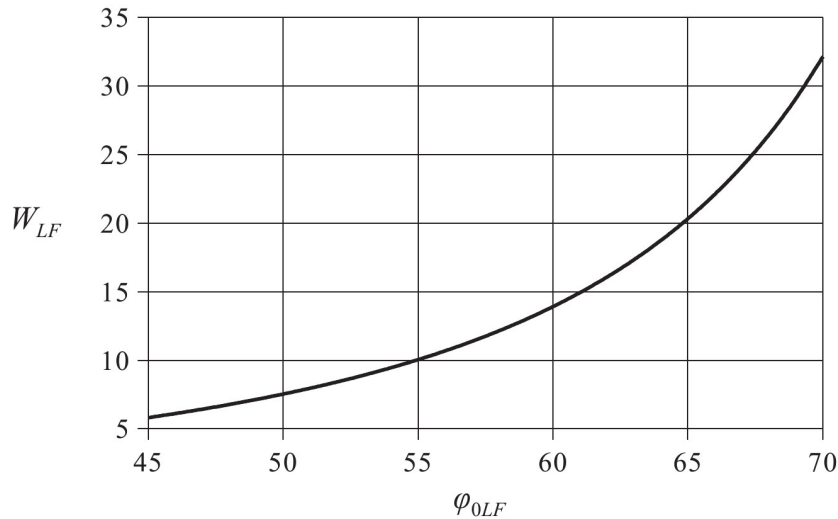


Рис. 1. Зависимость ширины интервала W_{LF} от запаса по фазе φ_{0LF} .

В практике широко используется отношение C_z к C_p равное 10, что соответствует запасу по фазе $\varphi_{0LF} \approx 56,5^\circ$. При этом емкость конденсатора C_z может составлять 100 пФ и более, что, даже при использовании интегральных конденсаторов с удельной емкостью 2 фФ/мкм², требует большой площади на кристалле микросхемы. Для уменьшения значения C_z используют методы эквивалентного умножения емкости.

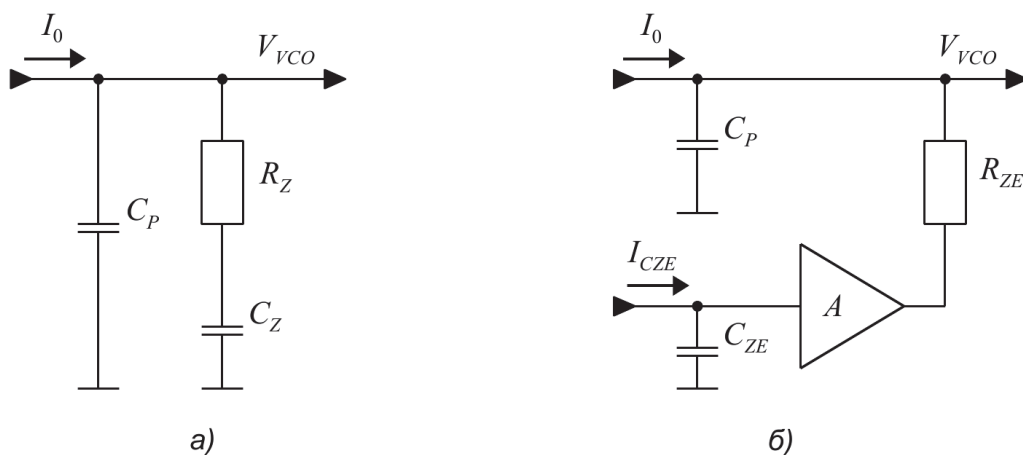


Рис. 2. Структурные схемы блока ПФ 2-го порядка: а) – типовая; б) – с умножением емкости конденсатора C_{ZE} с использованием усилителя напряжения и дополнительного источника тока I_{CZE} .

Определение значений элементов эквивалентного ПФ

На рис. 2, б представлена схема блока ПФ 2-го порядка с эквивалентным умножением емкости C_{ZE} с использованием дополнительного источника тока I_{CZE} подключенного к конденсатору C_{ZE} и синхронно с основным источником тока I_0 вырабатываю-

щего импульсы тока меньшей амплитуды [1-3]. Для разделения токов I_0 и I_{CZE} использован усилитель напряжения с коэффициентом передачи A . Импеданс $Z_E(s)$ равен:

$$Z_E(s) = \frac{sR_{ZE}C_{ZE} + A \frac{I_{CZE}}{I_0}}{sC_{ZE}(sR_{ZE}C_P + 1)}.$$

Обозначим M - коэффициент эквивалентного умножения емкости C_{ZE} так, что:

$$M = \frac{C_Z}{C_{ZE}}.$$

Найдем выражения для расчета значений I_{CZE} и R_{ZE} эквивалентного ПФ [4]. Так как импедансы блоков ПФ рис. 2, а и б равны, соответственно, равны их постоянные времени нуля и полюса. Представим $Z_E(s)$ в виде:

$$Z_E(s) = \frac{s\tau_{ZE} + 1}{sC_{ZE} \frac{I_0}{AI_{CZE}} (s\tau_{PE} + 1)}, \text{ где } \tau_{ZE} = R_{ZE}C_{ZE} \frac{I_0}{AI_{CZE}} = \frac{1}{\omega_{ZE}}, \tau_{PE} = R_{ZE}C_P = \frac{1}{\omega_{PE}}.$$

Приравняв τ_P и τ_{PE} , получим:

$$\frac{R_Z C_Z C_P}{C_Z + C_P} = R_{ZE} C_P.$$

Отсюда, с учетом $C_Z = MC_{ZE}$, резистор R_{ZE} эквивалентного ПФ равен:

$$R_{ZE} = R_Z \frac{MC_{ZE}}{MC_{ZE} + C_P}.$$

Приравняв τ_Z и τ_{ZE} , получим:

$$R_Z C_Z = R_{ZE} C_{ZE} \frac{I_0}{AI_{CZE}}.$$

Отсюда ток I_{CZE} равен:

$$I_{CZE} = \frac{I_0}{A} \times \frac{C_{ZE}}{MC_{ZE} + C_P}.$$

Выражения для I_{CZE} и R_{ZE} также можно найти, приравняв непосредственно импедансы $Z(s)$ и $Z_E(s)$, но решение при этом является более громоздким.

Исследование влияния технологического разброса на характеристики эквивалентного ПФ

Технологический разброс при производстве кристалла микросхемы приводит к отклонению токов I_{CZE} и I_0 от требуемых значений на соответствующие коэффициенты δ_{ICZE} и δ_{I0} . Отношение результирующих токов $I_{CZE\delta}$ и $I_{0\delta}$ может быть выражено через отношение исходных токов I_{CZE} и I_0 как:

$$\frac{I_{CZE\delta}}{I_{0\delta}} = \frac{I_{CZE}}{I_0} (1 + \delta_I), \text{ где } \delta_I = \frac{\delta_{ICZE} - \delta_{I0}}{\delta_{I0}}.$$

При этом $S_{M\delta_I}$ - коэффициент изменения значения эквивалентного умножения M под воздействием δ_I равен:

$$S_{M\delta_I} = \frac{M(\delta_I)}{M} = \frac{1}{1 + \delta_I} \left(1 - \delta_I \frac{C_P}{MC_{ZE}} \right).$$

Из данного выражения следует важное свойство схемы ПФ рис. 2, б – коэффициент $S_{M\delta_I}$ не зависит от коэффициента M (т.к. $MC_{ZE} = C_Z$) и зависит только от отношения емкостей конденсаторов C_Z и C_P исходного ПФ рис. 2, а. Причем, чем больше

отношение C_Z к C_P , тем ближе $S_{M\delta_I}$ к единице, т.е. меньше чувствительность M к воздействию δ_I .

Отклонение токов I_0 и I_{CZE} от требуемых значений нарушает эквивалентность АФЧХ блока ПФ рис. 2, б по отношению к исходному ПФ рис. 2, а. С учетом δ_I АФЧХ ПФ рис. 2, а формируются в соответствии с значениями $I_{0(\delta_I)}$, $R_{Z(\delta_I)}$ и $C_{Z(\delta_I)}$ равными:

$$I_{0(\delta_I)} = I_{0\delta}, \quad R_{Z(\delta_I)} = R_{ZE} \frac{S_{M\delta_I} MC_{ZE} + C_P}{S_{M\delta_I} MC_{ZE}}, \quad C_{Z(\delta_I)} = S_{M\delta_I} MC_{ZE}.$$

Для заданных M и $S_{M\delta_I}$ значение δ_I равно:
$$\delta_I = \frac{1 - S_{M\delta_I}}{S_{M\delta_I} + \frac{C_P}{MC_{ZE}}}.$$

Для заданных $S_{M\delta_I}$ и δ_I значение M равно:
$$M = \frac{C_P}{C_{ZE}} \times \frac{\delta_I}{1 - S_{M\delta_I}(1 + \delta_I)}.$$

В случае использования усилителя напряжения с коэффициентом передачи A равным единице, ток I_{CZE} уменьшается более чем в M раз по сравнению с током I_0 . В результате импульсы тока I_{CZE} могут быть искажены действующими на кристалле микросхемы помехами. Кроме того, необходимо, чтобы ток I_{CZE} не менее чем на 3 – 4 порядка превышал токи утечки. Также необходимо обеспечить сохранение заданного отношения емкостей конденсаторов C_{ZE} и C_P с учетом технологических разбросов. Все это накладывает ограничение на увеличение коэффициента M .

Нарушение синхронности переключений при условии сохранения требуемого соотношения амплитуд и равенства длительностей импульсов токов I_0 и I_{CZE} может привести к увеличению пульсаций напряжения V_{VCO} (зависит от знака рассинхронизации). Входное напряжение смещения усилителя напряжения не оказывает влияния на АФЧХ эквивалентного ПФ.

Заключение

На основе равенства импедансов типового ПФ рис. 2, а и ПФ рис. 2, б с эквивалентным умножением емкости конденсатора C_{ZE} получены выражения для расчета значений элементов эквивалентного ПФ. Также представлены выражения для расчета отклонения характеристик ПФ от заданных из-за нарушения требуемого отношения токов основного I_0 и дополнительного I_{CZE} источников тока блока накачки заряда вследствие технологического разброса. Установлено, что степень изменения значения коэффициента M эквивалентного умножения емкости C_{ZE} из-за нарушения отношения I_0 и I_{CZE} не зависит от значения M и зависит только от отношения емкостей конденсаторов C_Z и C_P исходного типового ПФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keliu Shu, Edgar Sanchez-Sinencio*. CMOS PLL Synthesizers: Analysis and Design. – Boston: Springer Science, 2005. – 216 p.
2. *Yido Koo, [et al.]*. A Fully Integrated CMOS Frequency Synthesizer With Charge-Averaging Charge Pump and Dual-Path Loop Filter for PCS- and Cellular-CDMA Wireless Systems // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2002. – Vol. 37. – N. 5. – P. 536 – 542.
3. *Tse-Hsiang Hsu*. Charge Pump Structure for Reducing Capacitance in Loop Filter of a Phase Locked Loop // Pat. US № 7271633. Int. Cl H03L 7/06. – Date of Patent 18.09.2007.
4. *Зайцев А.А.* Развитие методов построения фильтра контура управления интегральных быстродействующих синтезаторов частот на базе ФАПЧ // Теоретические и практические аспекты технических наук: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (29 декабря 2014 г., Уфа). – Уфа: Аэтерна, 2014. – С. 23–31.