

УДК 621.373.52

ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ С ФАПЧ НА ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Лин Наинг, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Титович Н.А. – к.т.н., доцент

Аннотация. В работе рассматривается влияние элементов интегрального синтезатора сетки частот (ССЧ) на уровень фазового шума выходного сигнала и пути его снижения.

Ключевые слова. Синтезатор частоты. Фазовый шум.

Основными задачами в области проектирования интегральных ССЧ являются: расширение рабочего диапазона синтезируемых частот; повышение скорости перестройки; уменьшение шага перестройки; уменьшение фазового шума в сигнале выходной частоты; повышение устойчивости к помехам по цепям питания; минимизация площади, занимаемой на кристалле микросхемы; минимизация энергопотребления.

Приоритет перечисленных выше характеристик СЧ зависит от выбора схемного решения для выполнения поставленной задачи. Одним из условий достижения максимальной производительности микропроцессоров, аналого-цифровых преобразователей, радиочастотных модулей и многих других устройств является минимизация фазового шума в сигнале выходной частоты СЧ. Для проведения исследований по оптимизации данного параметра целесообразно провести оценку вклада в шумовые характеристики всех элементов СЧ на базе приведенной на рисунке 1 схемы с ФАПЧ [1, 2].

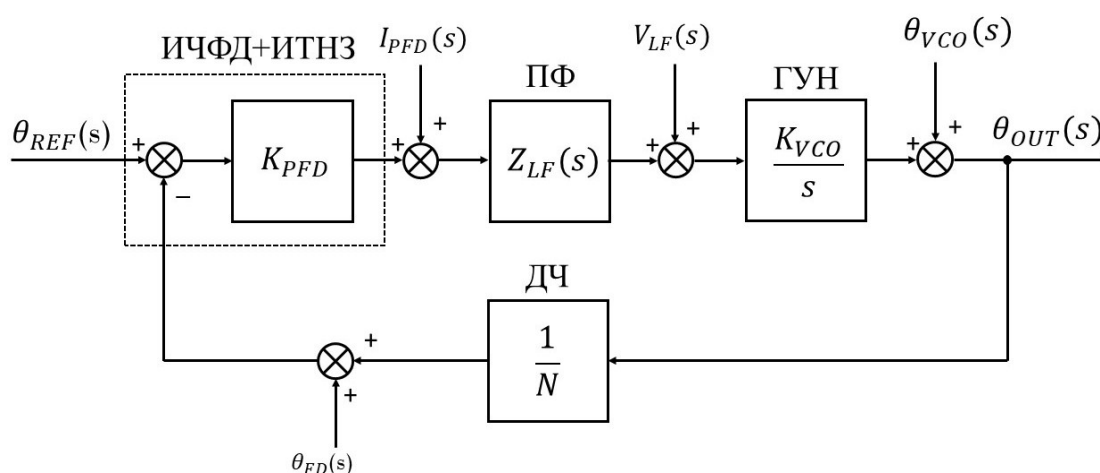


Рисунок 1 – Аналитическая модель СЧ с ФАПЧ с источниками шума.

Обозначения блоков на схеме и их параметров следующие: K_{PFD} - передаточная функция, совместно формируемая блоками импульсного частотного фазового детектора (ИЧФД) и источника тока накачки заряда (ИТНЗ); $Z_{LF}(s)$ - импеданс блока полосовых фильтров (ПФ); K_{VCO} - крутизна передаточной характеристики генератора управляемого напряжением (ГУН); $1/N$ - коэффициент передачи блока делителя частоты (ДЧ); $I_{PFD}(s)$ - результирующий ток шума блоков ИЧФД и ИТНЗ; $V_{LF}(s)$ - напряжение шума элементов ПФ; $\theta_{VCO}(s)$ - фазовый шум выходного сигнала ГУН; $\theta_{FD}(s)$ - фазовый шум ДЧ; $\theta_{REF}(s)$ - фазовый шум сигнала опорной частоты F_{REF} .

Фазовый шум проявляется в изменении спектра плотности мощности выходного сигнала. Для идеального СЧ, когда сигнал имеет синусоидальную форму, мощность выходного сигнала концентрируется на одной частоте. Если сигнал имеет форму меандра, то она распределяется между нечетными гармониками. В реальном ССЧ спектр плотности мощности выходного сигнала распространяется в соседние частоты в окрестности основной частоты. Это свидетельствует о наличии в контуре ФАПЧ регулярных помех, сдвинутых относительно основной частоты F_{VCO} .

Типовой вид спектрограммы выходного сигнала F_{VCO} блока ССЧ представлен на рис. 2. Фазовый шум $L_{\Delta F}$ определяется как отношение мощности шума в полосе шириной 1 Гц при определенном смещении ΔF от основной частоты к мощности сигнала основной частоты, т. е. имеет нормированное значение с размерностью (дБс/Гц). Из спектрограммы видно, что в контуре ФАПЧ имеются регулярные помехи, действующих, в данном случае, с частотой F_{REF} .

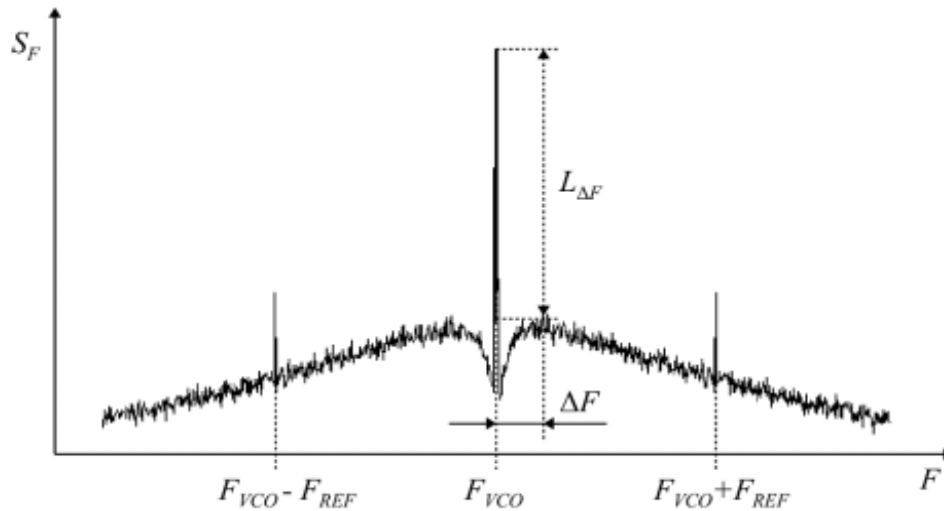


Рисунок 2 – Типовой вид характеристик фазового шума выходного сигнала СЧ.

В ходе анализа схемы (рис.1) будем пренебрегать помехами по цепям питания, а также предположим, что фазовый шум каждого источника мал по сравнению с полезным сигналом.

На входы ИЧФД поступают сигналы опорного генератора с частотой F_{REF} и сигнал обратной связи с частотой F_{CNT} , полученный делением выходного сигнала ГУН на коэффициент N в блоке ДЧ. Выходные сигналы блока ИЧФД управляют блоком ИТНЗ, формируя на его выходе импульсы тока I_0 , длительность и полярность которых пропорциональны фазовой разности сигналов опорной частоты F_{REF} и частоты обратной связи F_{CNT} с выхода ДЧ. Импульсы тока I_0 поступают на ПФ, где преобразуются в управляющее напряжение V_{VCO} для автоматической подстройки частоты и фазы ГУН. Изменение напряжения V_{VCO} осуществляется таким образом, чтобы устранить рассогласование между фазами сигналов F_{REF} и F_{CNT} , и, тем самым, ввести контур ФАПЧ в синхронизм. При этом выходная частота F_{VCO} равна: $F_{VCO} = N F_{REF}$.

Фазовый шум сигнала опорной частоты $\theta_{REF}(s)$ состоит из шума собственно кварцевого резонатора и шума кварцевой ячейки. Обычно шум $\theta_{REF}(s)$ мал по сравнению с шумами остальных элементов контура ФАПЧ [2]. Даже с учетом того, что контур умножает шум кварцевого резонатора на N , этот шум не является основной проблемой при проектировании малошумящих интегральных СЧ с ФАПЧ. Основными проблемами являются шумы блоков контура ФАПЧ. Однако при проектировании комбинированных СЧ, использующих основные достоинства схем PLL и DDS , снижение шума ОГ имеет существенное значение [3].

Величина тока шума $I_{PFD}(s)$ блоков ИЧФД и ИТНЗ в основном обусловлена следующими факторами [2, 4]: зоной нечувствительности при малой расфазировке входных сигналов; изменением задержки переключения элементов; токами утечки через выход ИТНЗ, элементы ПФ и вход ГУН; термодинамическим шумом источников тока. Зона нечувствительности (“мертвая зона”) возникает, когда величина фазовой ошибки соизмерима с задержками элементов, составляющих блоки ИЧФД и ИТНЗ. В результате не происходит выработки корректирующих импульсов тока I_0 , т. е. передаточная функция K_{PFD} становится равна нулю, что означает размыкание управления в контуре ФАПЧ. Это приводит к тому, что выходная частота ГУН дрейфует, пока фазовая разность сигналов F_{REF} и F_{CNT} не достигнет значения, достаточного для выработки импульсов тока I_0 . Величина этого дрейфа обусловлена неравными временами подключений втекающего и вытекающего токов блока ИТНЗ.

Фазовый шум $\theta_{VCO}(s)$ выходного сигнала ГУН состоит из внутренних шумов элементов, составляющих ГУН, и шумов из-за помех по цепям питания. Внутренний шум элементов ГУН включает термодинамический шум и фликкер-шум [1, 5].

Шум $\theta_{FD}(s)$ блока ДЧ в основном вызывается изменением задержки переключения элементов ДЧ из-за помех по цепям питания. В приведенной выше схеме ДЧ характеризуется коэффициентом деления N . Выходная частота F_{VCO} может быть изменена только сменой коэффициента деления N ,

являющегося целым числом. Таким образом, шаг перестройки (дискретность) сетки синтезируемых частот равен значению опорной частоты. Требование уменьшения дискретности сетки частот влечет соответствующее уменьшение значения опорной частоты и увеличение коэффициента деления N . Уменьшение опорной частоты требует уменьшения полосы пропускания контура ПФ ω_0 , что приводит к уменьшению возможности ослабления контуром низкочастотных шумов блоков ПФ и ГУН. Для устранения этого противоречия при формировании сигнала F_{CNT} используют блоки ДЧ с дробно-переменным коэффициентом деления. Они могут привести к появлению «помех дробности», влияние которых сказывается, как правило, в диапазоне частот, превышающим частоту среза ПФ, что накладывает определенные требования к построению ПФ [5].

При проектировании интегральных СЧ элементы ФНЧ часто не удается поместить в корпус микросхемы и они выполняются внешними. Проектируя внешние ПФ разработчик ССЧ имеет возможность изменять их ФЧХ, но и влиять на шумовые характеристики. При построении СЧ с ФАПЧ редко применяются простейшие схемы ФНЧ первого порядка (рис. 3а). Как правило, применяют пассивные фильтры второго порядка (рис. 3б) и активные фильтры второго (рис. 3в) и третьего (рис. 3г) порядков, имеющие более сложную АЧХ, характеризующиеся полосой синхронизации, расположенной между частотами ω_Z и ω_0 фильтра.

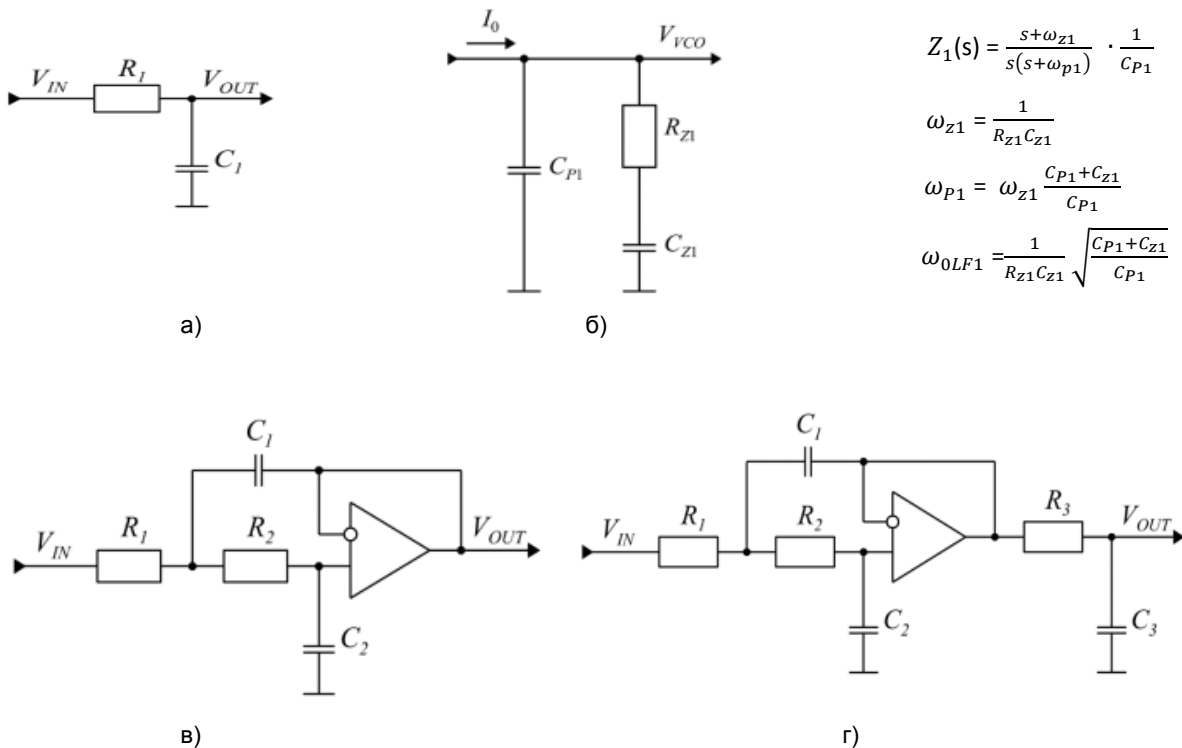


Рисунок 3 - Схемы ФНЧ, применяемые в составе блока ПФ: а) пассивный 1-го порядка; б) пассивный 2-го порядка; в) активный 2-го порядка; г) активный 3-го порядка.

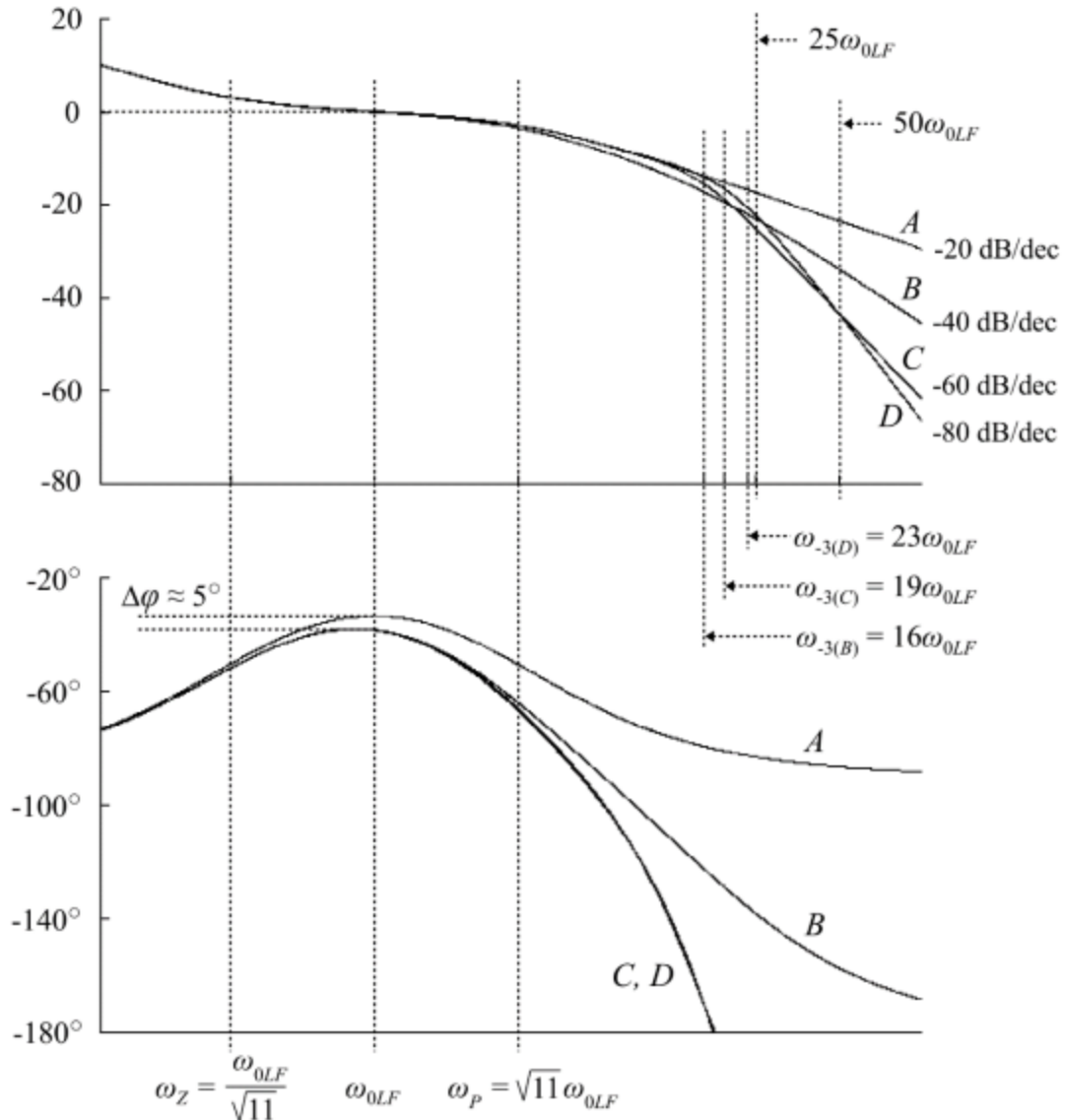
Частота ω_{0LF} на которой ПФ (рис. 3б) имеет максимальный запас по фазе φ_{0LF} до значения -90° является геометрическим средним частоты нуля ω_Z и частоты полюса ω_P : $\omega_{0LF} = (\omega_Z \omega_P)^{1/2}$. Значение максимального запаса по фазе φ_{0LF} зависит только от отношения емкостей конденсаторов C_Z и C_P и равно:

$$\varphi_{0LF} = \arcsin \frac{\omega_P - \omega_Z}{\omega_P + \omega_Z} = \arcsin \frac{C_Z}{C_Z + 2C_P} \quad (1)$$

При заданных ω_Z и ω_P блока ПФ для обеспечения максимально возможного запаса по фазе замкнутого контура ФАПЧ необходимо, чтобы частота ω_0 единичного усиления разомкнутого контура была равна частоте ω_{0LF} блока ПФ. На практике широко используется отношение $\omega_P = 11\omega_Z$, при котором блок ПФ имеет запас по фазе $\varphi_{0LF} \approx 56^\circ$ [1].

Активные ПФ применяются для компенсации помех «дробности», возникающих в СЧ с дробным N . Для их подавления применяют алгоритмическую компенсацию, что приводит расширить спектра помех в высокочастотной области. Таким образом, все меры по компенсации таких помех приводят к появлению помех в высокочастотной части спектра [5]. Это следует учитывать при проектировании блока ПФ. Для усиления фильтрации в высокочастотной области сигнала V_{VCO} в состав блока ПФ

дополнительно включают пассивный ФНЧ 1-го порядка или активные ФНЧ 2-го и 3-го порядков. На рисунке 4 показаны результаты расчетов эффективности различных ПФ для ослабления помех превышающих граничную рабочую частоту ФНЧ. До частоты ω_P наличие ФНЧ практически не сказывается на результирующих амплитудных характеристиках. На частоте ω_{0LF} дополнительное фазовое запаздывание, вносимое ФНЧ, составляет около 5° . На частоте $25\omega_{0LF}$ ослабление составляет не менее 5 дБ по сравнению с ПФ без ФНЧ (диаграмма А), причем в диапазоне частот ω_P и $25\omega_{0LF}$ разница между ослаблениями, вносимыми ФНЧ (диаграммы В, С и D), не превышает 3,3 дБ. До частоты $50\omega_{0LF}$ ослабления ФНЧ 2-го и 3-го порядка (диаграммы С и D) практически равны и на этой частоте превышают ослабление ФНЧ 1-го порядка (диаграмма В) на 9,4 дБ. Начиная с частоты $50\omega_{0LF}$ ослабление ФНЧ 3-го порядка превышает ослабление ФНЧ 2-го порядка. Из рисунка 4 следует, что использование дополнительных ФНЧ в составе блока ПФ является эффективным при подавлении фазовых шумов сигнала опорной частоты, блоков ИЧФД, ИТНЗ и ДЧ на частотах в 25 и более раз



превышающих частоту ω_{0LF} , а значит и частоту ω_0 полосы пропускания контура ФАПЧ.

Рисунок 4 - Амплитудные характеристики блока ПФ: А – без ФНЧ; В – с ФНЧ 1-го порядка; С – с ФНЧ 2-го порядка; D – с ФНЧ 3-го порядка.

Передаточная функция разомкнутого контура ФАПЧ $G_{OL}(s)$ для схемы, изображенной на рис.3.3, может быть записана как [15]

$$G_{OL}(s) = \frac{K_{PFD}Z(s)KVCO}{sN} \quad (2)$$

Тогда передаточные функции от источников шума к выходному шуму СЧ $\theta_{OUT}(s)$ можно представить в виде таблицы 1 [1, 2] и изобразить на АЧХ в виде рис. 5 [1, 5].

Таблица 1 – Передаточные функции источников шума СЧ с ФАПЧ

Источник шума	Передаточная Функция		АЧХ Передаточной Функции
Источник опорной частоты	$\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{REF}(s)}$	$N \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$	ФНЧ
ИЧФД+ИТНЗ	$\frac{\theta_{OUT}(s)}{I_{PDF}(s)}$	$\frac{N}{K_{PDF}} \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$	ФНЧ
ПФ	$\frac{\theta_{OUT}(s)}{V_{LF}(s)}$	$\frac{K_{VCO}}{s} \cdot \frac{1}{1 + G_{OL}(s)}$	Полосовой Фильтр
ГУН	$\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{VCO}(s)}$	$\frac{1}{1 + G_{OL}(s)}$	ФВЧ
ДЧ	$\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{FD}(s)}$	$-N \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$	ФНЧ

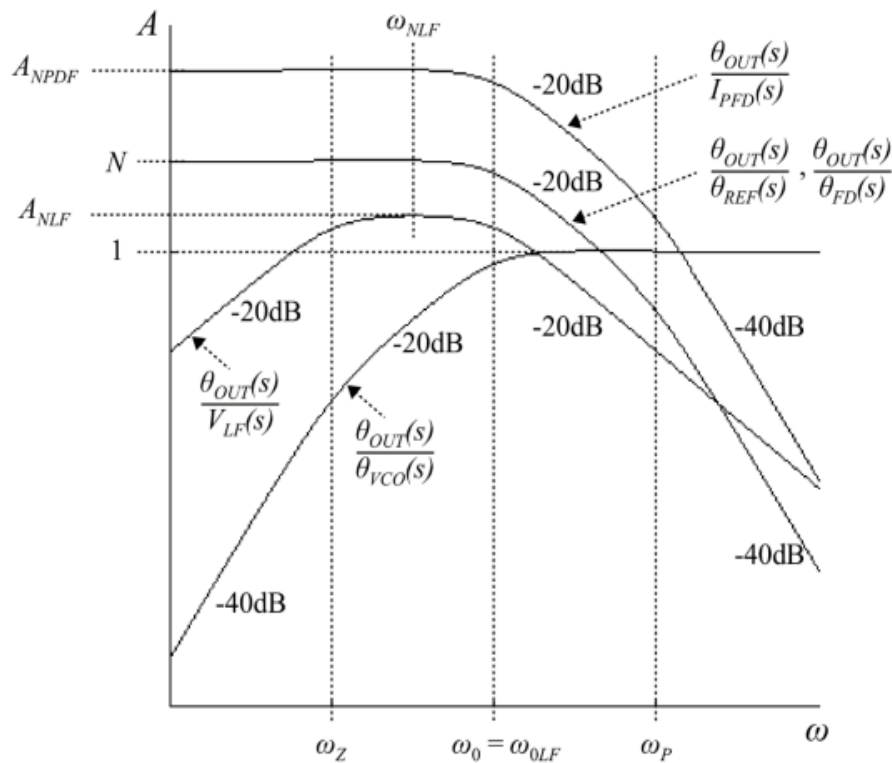


Рисунок 5 - АЧХ передаточных функций источников шума СЧ с ФАПЧ.

На фазовый шум источника опорной частоты, блоков ИЧФД, ИТНЗ и ДЧ контур ФАПЧ действует как ФНЧ 2-го порядка [15]. Причем между частотами ω_0 и ω_p АЧХ имеют наклон -20дБ/дек и только выше частоты ω_p шум подавляется с наклоном -40дБ/дек . На частотах ниже ω_0 шум источника опорной частоты и блока ДЧ передается на выход схемы с усилением N . Шум блоков ИЧФД и ИТНЗ передается с усилением $A_{NPFD} = N / K_{PDF}$. Передаточные функции шумов данных блоков прямо пропорциональны коэффициенту N блока ДЧ, поэтому значение N выбирают минимально возможным. Контур ФАПЧ является полосовым фильтром 2-го порядка с подавлением шума на -20дБ/дек для всех элементов блока ПФ. Амплитуда A_{NLF} максимума передаточной функции прямо пропорциональна K_{VCO} блока ГУН и обратно пропорциональна частоте ω_0 и ширине интервала между частотами ω_z и ω_p [15]. Частота

ω_{NLF} максимума амплитуды передаточной функции, находящаяся между частотами ω_z и ω_0 , также зависит от ширины интервала ω_z и ω_P .

Таким образом, результирующий фазовый шум выходного сигнала ССЧ зависит от шума отдельных элементов контура ФАПЧ с учетом их передаточных функций и может быть оптимизирован выбором полосы пропускания ω_0 контура и АЧХ блока ПФ. Минимальное значение полосы пропускания ограничивается увеличением шума элементов ПФ и резким увеличением шума ГУН в окрестности выходной частоты F_{OUT} . Максимальное значение полосы пропускания ограничивается требованиями фильтрации помех, вызванных импульсным характером управления в контуре.

Список использованных источников

- 1.Зайцев А. А. Исследование и минимизация фазового шума в ФАПЧ синтезаторах частот // Научно-исследовательские публикации. 2017. № 1 (39). С. 5-29.
- 2.Kong W. Low Phase Noise Design Techniques for Phase Locked Loop Based Integrated RF Frequency Synthesizers // Diss. of Ph.D. degree / The University of Maryland Graduate School, College Park, MD, USA. – 2005. – 115 p.
- 3.Лин Наинг. Повышение стабильности опорного генератора гибридного PLL/DDS синтезатора сетки частот / Лин Наинг, Н. А. Титович // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024 : материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции, Минск, 21–22 ноября 2024 г. / БГУИР.: В. А. Бозуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 69–71.
- 4.Jonsson F. Design and Calibration of Integrated PLL Frequency Synthesizers // Diss. of Ph.D. degree / KTH - Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. – 2008. – 141 p.
- 5.Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design. 4-th Edition. – Dog Ear Publishing, 2006. – 344 p .

UDC 621.373.52

INFLUENCE OF ELEMENTS OF FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PLL ON NOISE CHARACTERISTICS

Lin Naing, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Титович Н.А. – к.т.н., доцент

Annotation. The paper considers the influence of the elements of the integrated synthesizer of the frequency grid on the level of phase noise of the output signal and ways to reduce it.

Keywords. Frequency synthesizer. Phase noise.