

УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА ПОСРЕДСТВОМ ПОВЫШЕНИЯ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Крайцер И.И.¹, Никонова Г.В.¹, Ермоленко А.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия, (644050, Омск, пр. Мира, 11), e-mail: ngvld@mail.ru

Рассматриваются различные способы, позволяющие значительно уменьшить фазовые шумы выходного сигнала за счет улучшения фильтрующей способности системы фазовой автоподстройки частоты. Проведённый анализ показал: ФАПЧ с изменяемой полосой пропускания может использоваться для повышения фильтрующей способности без снижения относительной полосы захвата и обладает хорошей помехоустойчивостью только при небольшой интенсивности шума. Система с дополнительным каналом авторегулирования фазы выходного сигнала позволяет значительно улучшить фильтрацию помех на выходе устройства. Данный метод применим для сигналов с большими помехами и позволяет устранить паразитную девиацию фазы выходного сигнала, обусловленную дискретными и флуктуационными помехами без уменьшения полосы захвата системы ФАПЧ. В работе проведён сравнительный анализ наиболее важных и перспективных систем ФАПЧ на данный момент.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты, фильтрация, полоса захвата, фазовая синхронизация.

PHASE NOISE REDUCTION THROUGH INCREASING THE FILTERING ABILITY OF THE PLL

Kraytser I.I.¹, Nikonova G.V.¹, Ermolenko A.V.¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia, (644050, Omsk, Mira, 11), E-mail: ngvld@mail.ru

Different ways of significant phase noise reduction of the output signal through improving filtering ability of phase-locked loop. Analysis showed: PLL bandwidth variable can be used to increase filter capacity without reducing relative locking band, and has good noise immunity only with small noise intensity. System with additional channel of output phase autoregulation can significantly improve noise filtering on the device output. This method is applicable for signals with large noise and eliminates the output signal parasitic phase deviation that is generated due to discrete and fluctuating noise without locking band of the PLL. The comparative analysis of the most important and promising PLL at the moment.

Keywords: phase-locked frequency, filtering, locking band, phase synchronization.

Введение

Системы фазовой синхронизации нашли широкое применение при разработке разноплановых устройств и систем, выполняя функции стабилизации частоты ВЧ–СВЧ генераторов, синхронизации процессов преобразования, приёма и обработки информации, калиброванного задания фазовых сдвигов, синтеза сложных сигналов [1, 2] и т. д.

Системы ФАПЧ широко используются в технике связи из-за их возможностей по обеспечению битовой синхронизации и демодуляции сигналов с ЧМ и ФМ [3].

В УВЧ диапазоне инерционность элементов приводит к изменению длительности переходных процессов и ограничению полосы удержания и захвата кольца. Так в системе ФАПЧ с гетеродинным преобразованием частоты наличие ФПЧ, обеспечивающего фильтрацию комбинационных помех, не вносит ограничений на полосу удержания (ПУ), но величина нормированной полосы захвата (ПЗ) зависит от постоянной времени ФПЧ. В системе ФАПЧ с ПИФ в качестве ФНЧ и гетеродинным преобразователем с ростом

постоянной времени ПИФ значение ПЗ уменьшается. В ряде прикладных задач необходим учёт переходных процессов в колебательном контуре ПГ [4].

Цель исследования

Произвести обзор способов уменьшения фазового шума и повышения фильтрующей способности. Проанализировать и выявить наиболее лучший способ уменьшения фазового шума для систем ФАПЧ. Рассмотреть возможности применения данных способов в системах ФАПЧ.

Материалы и методы исследования

Ширина полосы захвата и возможность подавления дрожания фазы являются взаимоисключающими характеристиками. Возможность подавления дрожания фазы быстро уменьшается с ростом отклонения частоты входного сигнала от частоты несинхронизированной системы ФАПЧ. Для улучшения этих характеристик в системе ФАПЧ используют различные варианты последовательных фильтров [5].

Система ФАПЧ с изменяемой полосой пропускания может использоваться для повышения фильтрующей способности без снижения относительной полосы захвата [1, 5]. Для этого необходимо, чтобы в режиме удержания коэффициент передачи цепи управления был малым, а в режиме биения большим. Это достигается регулированием коэффициента передачи фильтра низкой частоты ФНЧ1 (6).

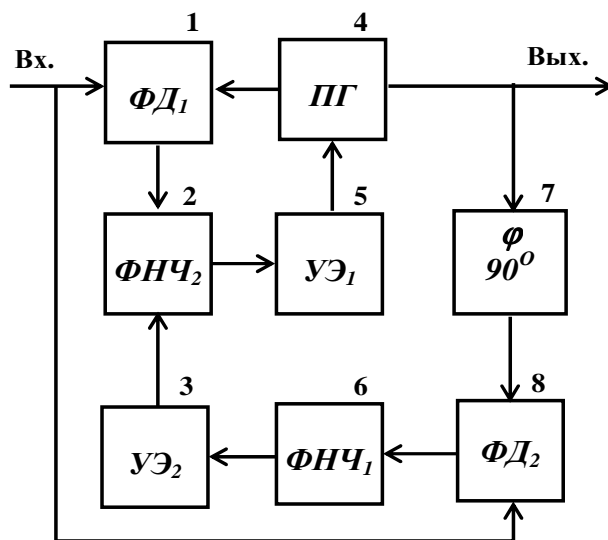


Рис. 1. Система ФАПЧ с изменяемой полосой пропускания

Регулирующий сигнал образуется на выходе ФД2, на вход которого через фазовращатель ФВ(φ) подается напряжение от подстраиваемого генератора ПГ, сдвинутое по фазе относительно входного напряжения ФД1 на 90° . ФНЧ2 устраняет переменную составляющую выходного напряжения ФД2. Постоянная составляющая этого напряжения

поступает на управляющий элемент УЭ2, который в зависимости от величины сигнала на его входе изменяет полосу пропускания ФНЧ2.

Поскольку напряжения на фазовых детекторах взаимно сдвинуты по фазе на 90° , постоянное напряжение на выходе ФД2 максимально по модулю только при нулевой начальной расстройке.

При увеличении начальной расстройки независимо от ее знака постоянное напряжение на выходе ФД2 уменьшается и коэффициент передачи цепи управления увеличивается.

В режиме биений постоянная составляющая на выходе ФД2 близка к нулю и полоса захвата получается большой.

В режиме удержания полоса пропускания фильтра ФНЧ1 оказывается узкой что обеспечивает высокую помехоустойчивость всей системы.

Результаты исследования

Исследования показали, что система обладает хорошей помехоустойчивостью только при небольшой интенсивности шума. При увеличении интенсивности шума сверх критической эффективность системы резко падает, в связи со снижением постоянной составляющей на выходе ФД2 в режиме удержания.

Данный способ применим и в астатической системе ФАПЧ [1]. Например в системе с цепью управления, состоящей из двух параллельных ветвей, одна из которых представляет собой линейный усилитель У, а вторая – интегратор И. Выходные напряжения ветвей складываются в сумматоре.

Фильтр с изменяемой полосой пропускания устанавливается между фазовым детектором и цепью управления подстраиваемым генератором.

Отличие структурной схемы астатической системы ФАПЧ от обычной состоит в том, что в цепи управления астатической системы ФАПЧ присутствует интегратор, который обеспечивает работу системы в астатическом режиме. В остальном работа астатической системы аналогична работе обычной системы ФАПЧ с ФНЧ с изменяемой полосой пропускания.

Сущность второго способа состоит в том, что обычная система дополняется каналом авторегулирования фазы выходного сигнала [2].

Этот канал не оказывает никакого влияния на процессы, протекающие в кольце ФАПЧ, но позволяет значительно улучшить фильтрацию помех на выходе устройства.

Структурная схема состоит из схемы обычной системы ФАПЧ, в которую входят фазовый детектор ФД, фильтр ФНЧ, УЭ, ПГ и дополнительно канал регулирования фазы

выходного напряжения, содержащего корректирующий четырехполосник КЧ, усилитель У и фазовый модулятор ФМ.

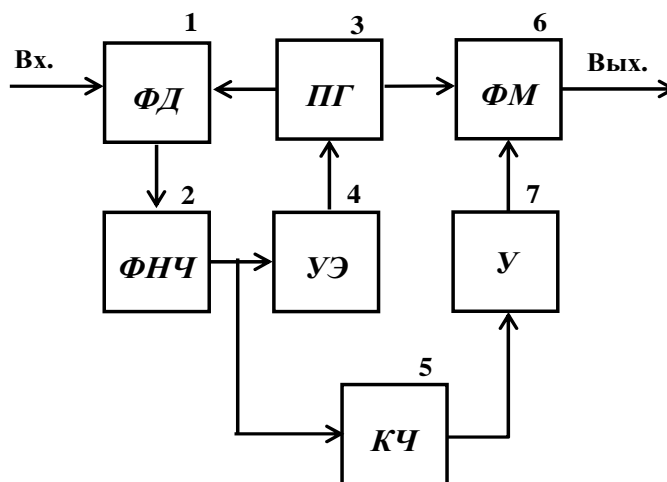


Рис. 2. ФАПЧ с дополнительным каналом авторегулирования фазы выходного сигнала

Если система ФАПЧ находится в состоянии синхронизма, а эталонный сигнал модулирован помехой, то на выходе УЭ появляется некоторое переменное напряжение помехи $u_{yэ}(t)$. Это напряжение вызывает паразитную модуляцию частоты ПГ. Считая, что характеристика УЭ линейна, можно найти закон отклонения частоты ПГ:

$$\Delta\omega_{пг}(t) = S_{yэ} u_{yэ}(t). \quad (1)$$

Компенсация действия помех, попадающих на вход УЭ, осуществляется следующим образом. Мгновенное напряжение ПГ, имеющее девиацию частоты $\Delta\omega_{пг}(t)$, имеет вид:

$$u_{пг}(t) = U_{пг} \sin [\omega_{пг}t + \int \Delta\omega_{пг}(t) + \varphi]. \quad (2)$$

Интеграл в выражении представляет собой закон отклонения фазы колебаний ПГ, вызванного помехой, являющийся функцией времени (от 0 до t). Заменяя в нем подынтегральную функцию $\Delta\omega_{пг}(t)$ ее значением из формулы (1), находим, что:

$$\varphi_{пг}(t) = S_{yэ} \int u_{yэ}(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Если внести в колебания фазовый сдвиг $-\varphi_{пг}(t)$, то тем самым можно скомпенсировать влияние помехи.

Таким образом, для полной компенсации помехи КЧ выполняет функцию идеального интегратора. Однако при идеальном интегрировании в дополнительном канале и линейной неограниченной характеристике ФМ компенсация действия любого напряжения, в том числе и полезного постоянного напряжения подстройки, присутствующего на входе УЭ, на фазу и частоту выходного напряжения будет настолько полной, что даже потеряется полезный эффект подстройки. При этом частота напряжения выходного сигнала окажется равной

частоте ПГ при разомкнутой петле ФАПЧ. Поэтому для нормальной работы устройства необходимо, чтобы в КЧ осуществлялось интегрирование только для переменной составляющей напряжения. Практически это достигается включением на входе КЧ обычной разделительной цепи.

Рассматриваемый метод позволяет устранить паразитную девиацию частоты (фазы) выходного напряжения системы ФАПЧ, обусловленную как любыми дискретными, так и флуктуационными помехами без уменьшения полосы захвата [3].

В качестве ФМ в рассмотренной схеме можно использовать четырехполюсники с сосредоточенными и распределенными регулируемыми параметрами.

Астатическую систему ФАПЧ также можно дополнить каналом регулирования фазы выходного напряжения, который содержит корректирующий четырехполюсник КЧ и фазовый модулятор ФМ [6]. Компенсация действия помех, попадающих на вход цепи управления, будет осуществляться КЧ и ФМ путем корректировки фазы выходного напряжения, устраняя паразитную модуляцию частоты ПГ (сдвиг фазы).

Третья разновидность системы ФАПЧ с фазовым модулятором (ФМ), включенным в цепь обратной связи системы [4]. Здесь сигнал ПГ перед поступлением на ФД подвергается дополнительной фазовой модуляции, закон которой определяется выходным напряжением ФД и ФНЧ2.

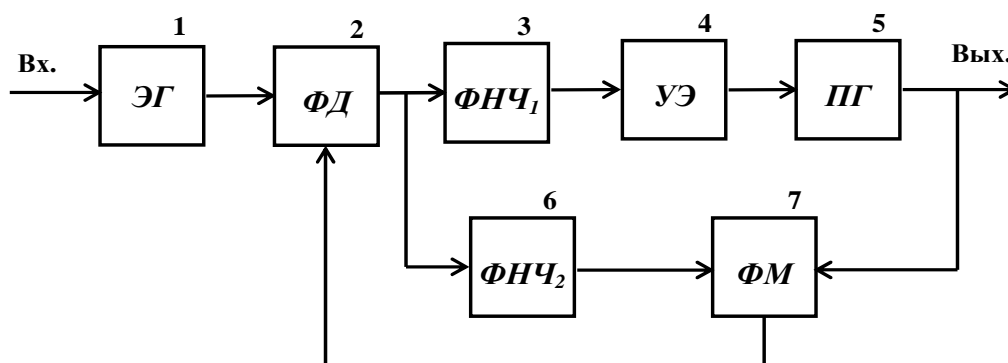


Рис. 3. Система ФАПЧ с фазовым модулятором

Параметры такой системы подбирались таким образом, чтобы с одной стороны, обеспечивать малую инерционность петли ОС и, следовательно, широкую полосу захвата, а с другой – большую инерционность цепи управления и, следовательно, узкую шумовую полосу. Подробные уравнения системы приведены в [1].

Данный способ позволяет уменьшить фазовые шумы системы ФАПЧ за счет дополнительной ОС (ФНЧ2, ФМ). В установившемся режиме при отсутствии фазовых

шумов на входе системы цепь ОС не оказывает влияния на выходной сигнал ПГ, подводимого к ФД.

При появлении фазовых шумов на входе системы по цепи ОС с малой инерционностью управляющий сигнал воздействует на ФМ, чем вызывает изменение фазы сигнала ПГ, подводимого к ФД. При этом уменьшается мгновенная разность фаз сигналов на входе ФД.

Цепь управления вследствие большой инерционности не изменяет управляющего воздействия на ПГ и не вызывает модуляцию выходного сигнала ПГ.

Для астатической системы ФАПЧ аналогично вводится дополнительная цепь ОС с малой инерционностью относительно управляющей цепи (с большой инерционностью).

Выводы

Описываемые способы уменьшения фазового шума и повышения фильтрующей способности применимы каждый для определенных условий и целей применения.

Первый способ способен обеспечить высокую помехоустойчивость, особенно в астатической системе ФАПЧ, т.к. разность фаз в этой системе в установившемся режиме теоретически равна нулю и выходное напряжение фазового детектора ФД2 достигает максимального значения, что приведет к уменьшению полосы пропускания ФНЧ1 вплоть до полного удаления переменной составляющей управляющего сигнала. В этом случае на выходе системы не наблюдалась частотная (фазовая) модуляция, вызванная наличием переменной составляющей на входе управляющей системы. Практически же осуществить полную фильтрацию сигнала от переменной составляющей невозможно. Однако данный способ позволил значительно улучшить фильтрующую способность системы ФАПЧ и уменьшить фазовые шумы выходного сигнала. Кроме того, данный способ применим при небольшой интенсивности шума, т.к. при слишком больших шумах снижается постоянная составляющая выходного напряжения ФД2 и увеличивается полоса пропускания ФНЧ1, что приводит к проникновению переменной составляющей на вход УЭ1 и модуляции выходного напряжения.

Второй способ, в отличие от первого, в отношении к структурной схеме можно отнести к структуре с прямым преобразованием, т.е. последовательно включена ФАПЧ и корректирующее устройство. Это может приводить к дополнительным искажениям и шумам в выходном сигнале. Однако данный способ не несет ограничений на вид помехи и позволяет устранить паразитную девиацию частоты, обусловленную как дискретными, так и флуктуационными помехами без уменьшения полосы захвата. Таким образом, данный метод оказался более применим для сигналов с большими помехами, чем первый способ.

В третьем способе фазовые шумы в режиме синхронизма возможно свести к нулю лишь при бесконечно большом коэффициенте передачи цепи ОС, т.е. в цепи управления ФМ. Однако это приводит к неустойчивой работе системы (скачки разности фаз на входе ФД), а также к уменьшению полосы захвата и, наоборот, уменьшая коэффициент передачи цепи управления ОС – увеличиваем полосу захвата. Исследования показали, что использование такой системы с максимальной фильтрующей способностью, возможно только в узком диапазоне частот.

Применение последовательной структуры, состоящей из ФАПЧ, в которой реализуется второй способ и ФАПЧ, в которой реализуется первый способ, дает низкие показатели шума при любой помехе, не уменьшая полосы захвата.

Список литературы

1. Жилин Н.С. Принципы фазовой синхронизации в измерительной технике. – Томск: Радио и связь, 1989. – 384 с.
2. Никонова Г.В. Поведение системы ФАПЧ при установке временных соотношений в измерительных устройствах с управляемой точностью // Омский научный вестник. - 2007.- №3(60).- С. 87-90.
3. Шахгильдян В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин. – М.: Связь, 1972. – 447 с.
4. Шахгильдян В.В. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. – М.: Радио и связь, 1989. – 320 с.
5. Nikonov A.V. A frequency converter with controllable characteristics. / A.V. Nikonov, G.V. Nikonova // Measurement Techniques. – New York, 2008. – V. 51. - № 1. – P. 74-81
6. Nikonov A.V. Frequency synthesizer for automatic control systems at ultrahigh frequencies / A.V. Nikonov, G.V. Nikonova // INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES. – 1993. - № 1. – P. 114-118.
7. Zhilin N.S. Measuring Devices with a Self-Adapting Adaptive System of Automatic Control / N.S. Zhilin, A.V. Nikonov, G.V. Nikonova // Proceeding 6th International Conference on actual problems of Electronic Instrument Engineering "APEIE-2002".- Novosibirsk, 2002. – V. 1. – P. 91-96.

Рецензенты:

Бирюков С.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный технический университет» (ОмГТУ), г. Омск.

Бубнов А.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электрическая техника» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный технический университет» (ОмГТУ), г. Омск.