

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗБУДИТЕЛЕЙ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Лисиченко Р. Н.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко*

*На основе проведенного анализа выбрано однопетлевой цифровой синтезатор на основе ФАПЧ с делителем частоты в цепи обратной связи, а уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала должен быть на уровне фоновых шумов (200 дБ).*

**Постановка проблемы.** Инвертирование – как вид преобразования параметров электроэнергии, на практике используется столь же широко, как и выпрямление. В зависимости от типа потребителей переменного тока инверторы выполняются однофазными, двухфазными, трехфазными и многофазными (например, для вентиляльных двигателей), а по принципу действия – одноктактными или двухтактными. Для обеспечения требуемых показателей качества спектрального состава инвертированного напряжения используют в основном два импульсно-модуляционных способа – широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) в различных ее модификациях и амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ). Функцию регулирования уровня напряжения в инверторах осуществляют способами широтного регулирования (ШР), широтно-импульсного регулирования (ШИР) или ШИМ. Одним из существенных признаков инверторов, во многом определяющий их структурно-алгоритмический облик – это построение их по принципу одноканального или многоканального преобразования (МКП) энергетического потока. Этот принцип используют при построении инверторов повышенной мощности и при высоких требованиях к их электромагнитной совместимости (ЭМС) [1].

Таким образом, значительный арсенал способов преобразования и принципов построения инверторов требует от разработчика знания базовой информации по данной тематике с тем, чтобы в каждом конкретном случае их применения синтезировать на современном уровне техническое решение, наиболее полно удовлетворяющее требованиям поставленного технического задания.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как показал проведенный анализ, основной целью оптимального проектирования синтезаторов частоты для возбудителей инверторов является достижение минимального уровня помех в выходном спектре синтезатора частот в режиме синхронизма. Это необходимо обеспечить в условиях когда в кольце обратной связи одновременно действуют внутренние помехи, возникающие в стабилизируемом автогенераторе, и внешние помехи, в основном, обусловленные комбинационными частотами от генератора эталонных частот. Стремление к достижению лучшей фильтрации тех и других помех приводит к противоречивым требованиям к частотным характеристикам передаточной функции ФАП. Подавление помех обоих видов можно обеспечить одновременно, однако в абсолютно устойчивой системе ФАП при заданной глуби-

не подавления одних помех существует предел возможного подавления другими [2].

Проблема разрешения противоречий между динамическими и спектральными характеристиками систем синтеза частот является самой сложной задачей проектирования синтезатора частоты [3-5].

Достижения компромисса между спектральными и динамическими характеристиками достигается различными методами и способами [3-5].

Рассмотрим существующие в настоящее время методы улучшения спектральных и динамических характеристик цифровых синтезаторов частот (ЦСЧ).

Понятно, что не так-то просто построить синтезатор частоты, одновременно обеспечивающий высокие характеристики как спектральной чистоты сигнала, так и быстродействия. Для этого прибегают к сложным структурам, дорогим и со значительным потреблением электроэнергии. Но всегда существовало стремление сделать это как можно проще, например, в однопетлевой системе ФАПЧ или в прямом цифровом синтезаторе (DDS).

Рассмотрим как ранние, не очень удачные попытки в этом направлении, так и более поздние и более успешные технические решения. При этом нет смысла останавливаться на простейшей, однопетлевой структуре с делителем частоты с целочисленным переменным коэффициентом деления (ДПКД) [6], недостатки которой хорошо известны, как и область её возможного применения, которая весьма ограничена. Тем не менее, есть интересные идеи как получить сравнительно неплохие результаты при использовании нескольких несложных петель ФАПЧ на основе ДПКД.

**Цель исследований.** Провести детальный анализ способов получения требуемых спектральных характеристик возбудителей инверторов напряжения.

**Основные материалы исследований.** В [7] предложен метод расширения полосы захвата при сохранении фильтрующей способности СЧ в установившемся режиме за счет предварительной установки ГУН вблизи требуемой номинальной частоты (рис.1).

В схему ЦСЧ вводится цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и дешифратор (ДШ). Диапазон перестройки ГУН делится на ряд диапазонов. Предусмотрена осуществляется путем подачи на второй вход сумматора напряжения подстройки с выхода ЦАП.

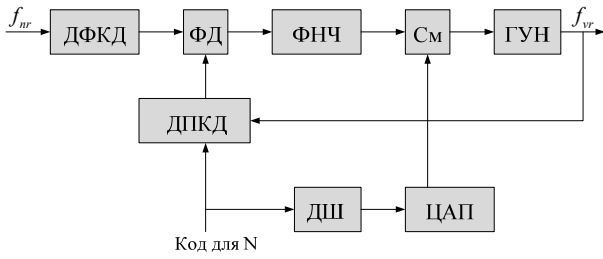


Рисунок 1 – Структурная схема СЧ с предварительной установкой ГУН

При использовании ФНЧ с большой инерционностью должна быть повышена точность предварительной установки, т.к. полоса захвата при этом резко сужается.

Развитие этого метода в [8] производится за счет введения автоматического выбора управляющих напряжений, как показано на (рис.2).

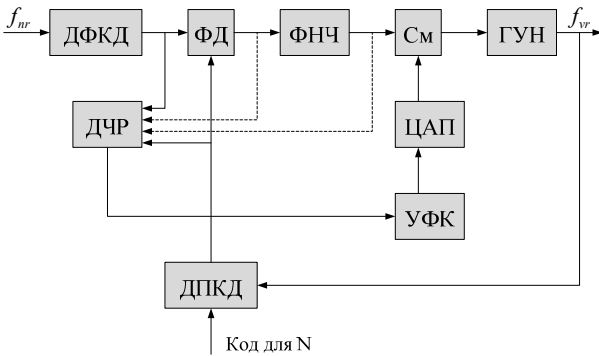


Рисунок 2 – Структурная схема синтезатора с устройством поиска

Для определения момента вхождения системы ИФАПЧ в указанный режим в схему вводится датчик частотного рассогласования (ДЧР). Штриховыми линиями обозначены возможные варианты подключения ДЧР. Для формирования закона изменения напряжения подстройки включается устройство формирования кода (УФК).

В качестве УФК использован реверсивный счетчик, изменяющий код управления ЦАП, а следовательно, и напряжение по линейному закону с некоторой тактовой частотой  $f_T$ . Максимальное время поиска в этом случае:

$$t_{nМАКС} = 2n / f_T, \quad (1)$$

где  $n$  - разрядность ЦАП.

Напряжение подстройки можно осуществить, также подавая его на вход ФНЧ. Для этого сумматор напряжений должен быть включен между используемым в качестве дискриминатора ИФД и фильтром. В этом случае ФНЧ производит дополнительную фильтрацию, что благоприятно сказывается на спектральных характеристиках синтезатора [9].

В [10] повышение быстродействия СЧ достигается с помощью систем автоматического поиска частоты (АПЧ), использующий для уменьшения начального частотного рассогласования частотный детектор (рис.3).

ты (АПЧ), использующий для уменьшения начального частотного рассогласования частотный детектор (рис.3).

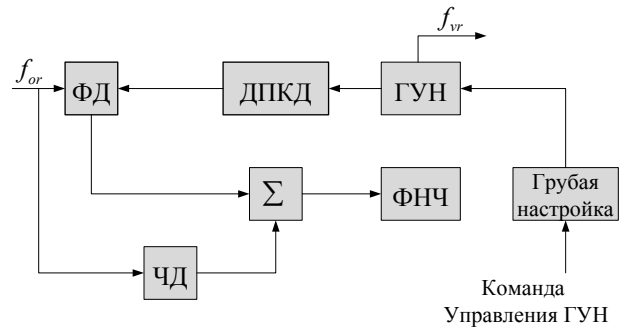


Рисунок 3 – Структурная схема двухкольцевой петли СЧ

В этом случае режим захвата обеспечивается частотным детектором, напряжение на выходе которого падает до нуля сразу же после установления режима захвата по фазе. Далее в действие вступает фазовый дискриминатор и происходит захват частоты ГУН [11].

Обе эти функции могут быть совмещены в едином приборе, например, импульсном частотно-фазовом детекторе (ИЧФД) (рис.4).

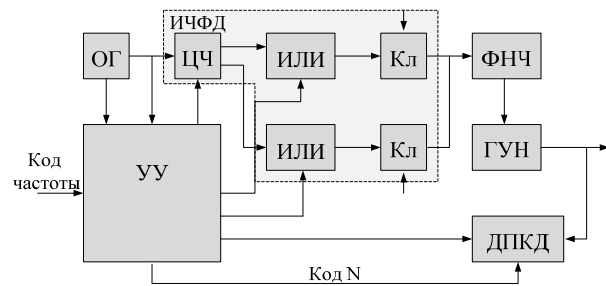


Рисунок 4 - Структурная схема СЧ с ИЧФД

Критерием смены режима работы ИЧФД является нарушение очередности поступления входных импульсов дискриминатора [12].

Расширение полосы захвата при сохранении высокой фильтрующей способности СЧ возможно также за счет непосредственного изменения характеристик канала управления кольца ФАПЧ в режиме захвата. Например, включение в канал управления нелинейного фильтра нижних частот на основе РС - фильтра (рис.5).

Его свойства определяются постоянной времени  $T = RC$ .

В режиме захвата переменное напряжение с выхода ИФД открывает диоды  $VD1$  и  $VD2$ , при этом закорачивается  $R$ , что приводит к уменьшению инерционности фильтра и, следовательно, к расширению  $\Delta f_3$  [13].

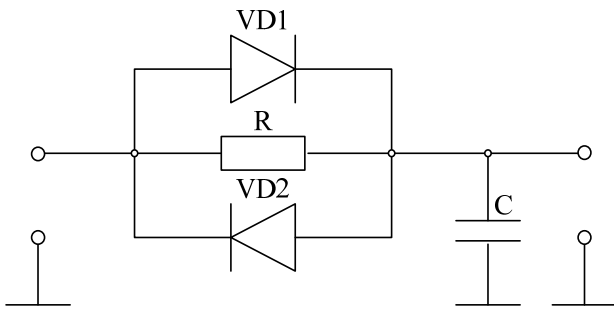


Рисунок 5 – Схема нелинейного фильтра

Уровень переменного напряжения на входе НФ в режиме захвата должен быть достаточным для надежного открытия диодов. В стационарном режиме ИФАПЧ переменное напряжение на входе фильтра мало, диоды закрыты и фильтр эффективно ослабляет входные помехи, так как инерционность НФ в этом случае велика. Применение НФ в качестве единого звена фильтрации допустимо лишь тогда, когда в режиме синхронизма сигнал на выходе ИФД имеет относительно малые пульсации. В противном случае НФ может быть использован как дополнительный фильтр к основному ФНЧ [13].

В [9] предложен вариант нелинейного коммутируемого фильтра (КФ) на основе  $RC$  фильтра, в котором параллельно резистору  $R$  включен ключ КЛ (рис.6).

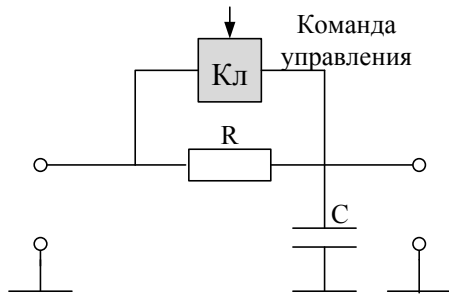


Рисунок 6 – Схема коммутируемого фильтра

Команда на замыкание подается при переключении выходных частот синтезатора и удерживается до достижения системой ИФАПЧ стационарного состояния. Основным недостатком при использовании КФ, является борьба с коммутационной помехой, образующейся на выходе фильтра. В [7] расширение полосы захвата осуществлено за счет изменения коэффициента усиления петли ФАПЧ. На рис. 7 приведена структурная схема синтезатора, в которой для этого в цепь управления ГУН введен регулируемый усилитель постоянного тока (УПТ). Такой же усилитель может быть введен между выходом дискриминатора и входом ФНЧ с целью изменения коэффициента передачи детектора в переходном режиме. Управление коэффициентом усиления УПТ осуществляется при переключении частот СЧ.

Повышение быстродействия в ЦСЧ также достигается за счет включения делителя с дробным коэффициентом деления (ДПКД) вместо ДПКД [12].

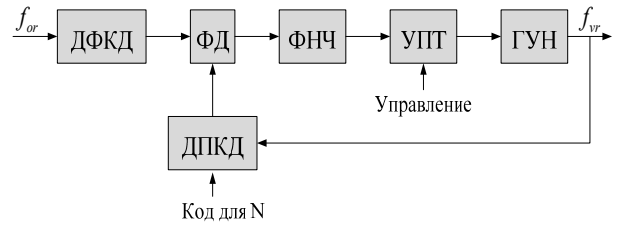


Рисунок 7 - Структурная схема синтезатора с изменяемым коэффициентом усиления в цепи управления ГУН

Применение ДПКД повышает  $f_{ос}$  при заданном шаге  $F_{ш}$ . Однако улучшение динамических характеристик синтезатора возможно в случае, если приняты меры по снижению так называемых «помех дробности» [13].

Другим способом повышение быстродействия [14] является использование алгоритмов аппроксимации номинальных значений ГУН. В этом случае вместо ДПКД вводится ДПКД2 с коэффициентом деления  $R_d$  (рис.8). Тогда справедливо равенство  $f_{улон} = f_{ор} \frac{N}{R_d}$ .

Использование алгоритмов аппроксимации позволяет существенно повысить быстродействие СЧ, однако приводит к непостоянству  $F_{ш}$  что накладывает известные ограничения на область применения таких синтезаторов. Кроме того, реализующая алгоритм, система ИФАПЧ работает с изменяющейся в широких пределах частотой сравнения  $f_0$  что затрудняет оптимизацию параметров цепи регулирования. Повышение быстродействия достигается также использованием многокольцевых ИФАПЧ [7]. На рис. 9 приведена двухкольцевая схема СЧ.

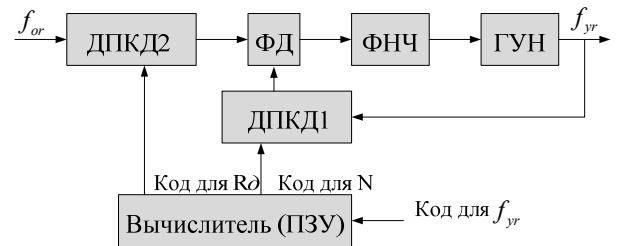


Рисунок 8 – Структурная схема синтезатора с аппроксимацией значений выходных частот

Выходная частота синтезатора определяется соотношением

$$f_{ур2} = f_3 - N_1 f_{01} + N_2 f_{02}, \quad (2)$$

где  $f_{01}$ ,  $f_{02}$  - частота сравнения первого и второго колец ИФАПЧ;

$f_3$  - частота подставки, вырабатываемая датчиком опорных частот (ДОЧ).

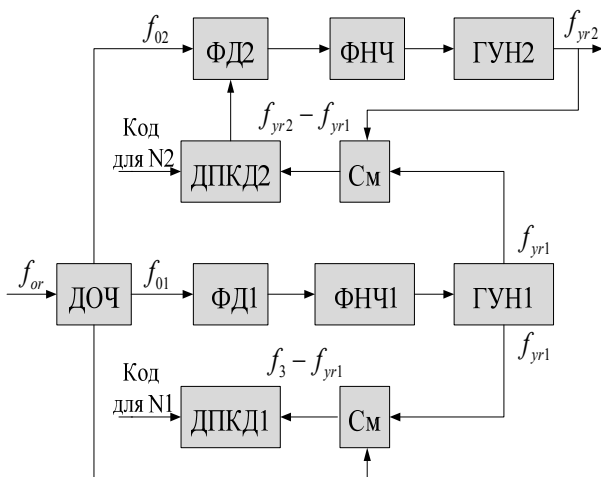


Рисунок 9 – Структурная схема двухкольцевого синтезатора частоты

Изменив  $N_1$  и  $N_2$  на единицу, можно получить перестройку  $f_{yr}$  на величину  $F_{ш} = f_{02} - f_{01}$ . Частоты  $f_{01}$  и  $f_{02}$  могут быть на несколько порядков выше  $F_{ш}$ . При правильном выборе частотного режима смесителей (СМ) комбинационные составляющие на их выходах фильтруются кольцом ИФАПЧ.

На рис. 10 приведена схема трехкольцевого синтезатора. Трансформация шага сетки частот происходит здесь за счет деления частоты второго синтезатора  $f_{yr2}$  и использования ее в качестве опорной в выходном кольце ИФАПЧ. Вспомогательный синтезатор СЧ1 необходим для расширения диапазона перестройки синтезатора. Выходная частота определяется соотношением  $f_{yr} = f_{yr1} + \frac{f_{yr2}}{M}$  следует, что шаг сетки частот на выходе СЧ в  $M$  раз меньше шага (частоты сравнения) СЧ2. Выбирая благоприятный режим смесителя, сложный полосовой фильтр на его выходе можно заменить достаточно широкополосным ФНЧ, не ухудшая динамику выходного кольца синтезатора [7].

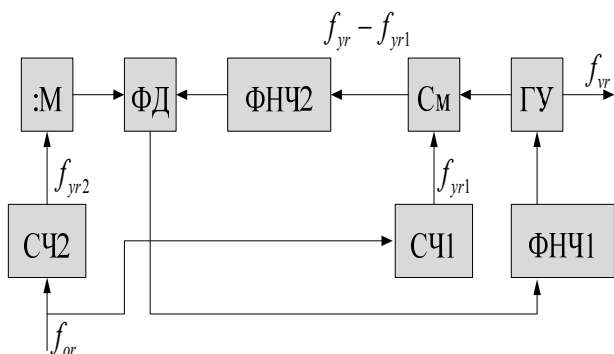


Рисунок 10 – Структурная схема трехкольцевого синтезатора частоты

Как показал проведенный нами анализ и работы [3-5], из рассмотрения принципа работы цифрового синтезатора видно, что в установившемся режиме на

выходе ИФД действует напряжение в виде периодической последовательности видеоимпульсов с частотой следования, равной частоте сравнения, меньшей или равной шагу перестройки  $f_{cp} \leq F_{ш}$ . Компоненты спектра этой последовательности с частотами, кратными  $f_{cp}$ , будут играть основную роль в образовании гармонических помех на выходе цифрового синтезатора, ибо они непосредственно воздействуют на объект регулирования - управляющий элемент контура генератора [15]. Наиболее опасной из них является первая гармоника частоты сравнения. Присутствие ее на управляющем элементе вызовет угловую модуляцию основного сигнала.

Величина индекса модуляции, а следовательно, количество и уровень боковых компонент будут зависеть от амплитуды первой гармоники частоты сравнения, величины подавления ее ФНЧ и крутизны характеристики управляющего элемента.

Для подавления частоты сравнения в СЧ на практике применяют пассивные фильтры  $RC$  и  $LC$ , реализующие характеристики Баттворта и Чебышева [16-17] и др.

Применение пассивных и активных фильтров позволяет получить подавление частоты сравнения на уровне 80 дБ [18]. Дальнейшее увеличение подавления может быть достигнуто следующими способами:

- увеличение постоянной времени фильтра, что приводит к ухудшению динамических характеристик;
- понижение общего коэффициента усиления до величины, при которой будет обеспечено подавление заданного уровня;
- включение дополнительно режекторных фильтров, настроенных на частоту сравнения.

На рис. 11 предоставлены графики зависимости числа звеньев режекторного фильтра от величины подавления частоты сравнения [12].

Из приведенных графиков видно, что для подавления частоты сравнения в спектре выходного сигнала синтезатора частоты, например, до уровня -120 дБ необходимо наличие 10-звенного или 8-звенного пассивного и активного режекторных фильтров соответственно. Наличие такого количества фильтров в цепи обратной связи петли ФАПЧ приводит к ухудшению динамических характеристик СЧ.

В результате проведенного анализа возможностей достижения требуемых спектральных и динамических характеристик СЧ можно сделать следующие выводы:

- существующие методы и способы не обеспечивают в полной мере необходимый компромисс между спектральными и динамическими характеристиками СЧ;
- существующие синтезаторы не обеспечивают необходимого уровня, подавления побочных составляющих в спектре выходного сигнала;
- необходимо искать новые пути и способы подавления побочных составляющих в спектре выходного сигнала при сохранении необходимого быстродействия, например, с помощью метода адаптивной компенсации.

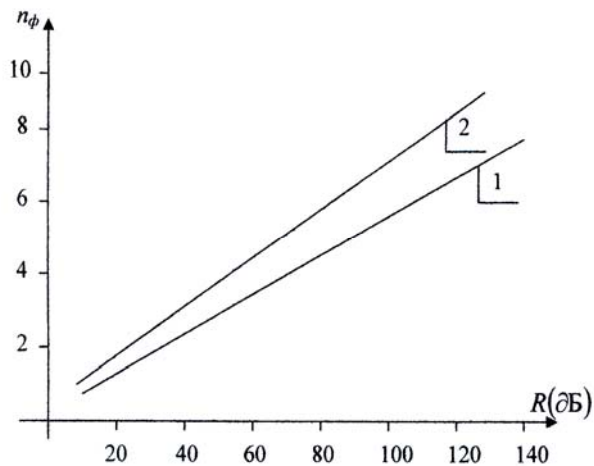


Рисунок 11 – График зависимости числа звеньев фильтра от величины подавления побочных составляющих: 1 – активные фильтры; 2 – пассивные фильтры

**Выводы.** В качестве основной структуры возбудителя инвертора напряжения следует выбрать однопетлевой цифровой синтезатор на основе ФАПЧ с делителем частоты в цепи обратной связи.

Для обеспечения перспективных требований к спектральной чистоте выходного сигнала возбудителя необходимо, чтобы уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала был на уровне фоновых шумов, т.е. имел уровень - 200 дБ.

#### Список использованных источников

1. Альбац М. Е. Справочник по рас чету фильтров и линий задержки / М. Е. Альбац – М.: Горэнергоиздат, 1963. – 200 с.
2. Галин А. С. Диапазонно-кварцевая стабилизация СВЧ / А. С. Галин - М: Связь, 1976. - 256 с.
3. Губернаторов О. И. Цифровые синтезаторы частот радиотехнических систем / О. И. Губернаторов, Ю. Н. Соколов - Л.: Энергия, 1973. - 176 с.
4. Михалёв П. И. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе производства фирмы Analog Devices. Компоненты и технологии. - 2005.-№ 4
5. Шахгильдян В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин – М.: Связь, 1972. - 448 с.
6. Woodward J. D., Variable Frequency Oscillation Generator, US Patent № 2.490.499. 06.12.2004
7. Шапиро Д. Н. Основы теории синтеза частот / Д. Н. Шапиро, А. А. Паин. - М.: Радио и связь, 1981. - 264 с.
8. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / 2-е издание. Под ред. В. В. Шахгильдяна. - М.: Радио и связь, 1989.-230 с.
9. А. С. 657575 СССР. Устройство для автоматической подстройки частот / Д. Г. Нисневич, Р. С. Нисневич (СССР). № 348753/87; опубл. 21.07.79, Бюл. № 14.
10. А. С. 1109914 СССР. Цифровой синтезатор частоты / В. Н. Малиновский, С. К. Романов (СССР). - № 33678651/34; опубл. 19.05.84, Бюл.№31.

11. А. С. 1054907 СССР. Устройство для автоматической подстройки частоты / В. Н. Малиновский, С. К. Романов (СССР). - № 4568729/33; опубл. 11.09.83, Бюл. № 14.

12. Шахгильдян В. В. Общие принципы построения быстродействующих синтезаторов на основе систем фазовой синхронизации / В. В. Шахгильдян, А. В. Петряков, А. Н. Кабанов // - Электросвязь. - 1983. - № 10. - С. 36 - 42.

13. Манасевич В. Синтезаторы частот. Пер. с англ. / В. Манасевич под ред. А. С. Галина, Связь, 1979. - 384 с.

14. Левин Б. А. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки / Б. А. Левин, В. Н. Малиновский С. К. Романов – М.: Радио и связь, 1989. - 232 с.

15. Губернаторов О. И. К вопросу о побочном излучении в цифровых синтезаторах частот / О. И. Губернаторов, А. Г. Гордиенко, В. Т. Пивовар // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 1969. - Т. XII. - № 10 - С. 140-143.

16. Альбац М. Е. Справочник по расчету фильтров и линий задержки / М. Е. Альбац. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 200 с.

17. Христиан Э. Таблицы и графики по расчету фильтров (Справочник) / Э. Христиан. Пер. с нем. - М.: Связь, 1975. – 407 с.

18. Гуревич И. Н. Подавление помехи с частотой, кратной шагу сетки, в синтезаторах частоты/ И. Н. Гуревич // Техника средств связи. Сер. ТРС. - 1979. - Вып 6. - С. 30 - 41.

#### Аннотация

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ДОСЯГНЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗБУДНИКІВ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ

Лисиченко Р. М.

*Вибрані однопетльовою цифровий синтезатор на основі ФАПЧ з дільником частоти в колі зворотного зв'язку, рівень побічних складових у спектрі вихідного сигналу повинен бути на рівні фонових шумів, тобто мав рівень - 200 дБ.*

#### Abstract

### ANALYSIS OF OPPORTUNITIES ACHIEVE THE DESIRED SPECTRAL CHARACTERISTICS AGENTS VOLTAGE INVERTERS

R. Lysychenko

*Joined-loop synthesizer based on a digital PLL frequency divider in the feedback loop, the level of spurious spectrum of the output signal should be at the level of background noise, ie, I had a level of - 200 dB.*