

УДК 621.378

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛИС В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ

© 2011 П. И. Грушин<sup>1</sup>, В. И. Логинов<sup>2</sup>, Н. П. Ямпурин<sup>1</sup><sup>1</sup>Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р. Е. Алексеева<sup>2</sup>Волжская государственная академия водного транспорта

Приводятся алгоритмы расчёта комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты на основе рядов Фарея. Рассмотрены подходы, не использующие синтез всего ряда Фарея, позволяющие решать задачи «пораженности» комбинационными частотами преобразователей частоты только на основе синтеза ближайших компонент к рабочим частотам исследуемых систем нелинейного преобразования частот. Предложены методы нахождения параметров комбинационных помех, прямые которых проходят через «поражённые» точки. Доказано, что область номограммы, свободная от комбинационных помех, является четырёхугольником.

*Преобразование частоты, комбинационные составляющие, цепные дроби, ряд Фарея.*

Одной из важных задач при проектировании и анализе поведения систем нелинейного преобразования частот является уменьшение влияния комбинационных гармоник на полезный сигнал.

Для решения подобных задач широко используются графические [1-3], аналитические [4, 5] и алгоритмические методы [1, 6, 7]. Одним из эффективных методов расчёта комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты являются методы на основе рядов Фарея [6, 7].

Предлагаются эффективные методы и алгоритмы решения задач анализа ближайших комбинационных частот. Основу предлагаемых методов составляет отыскание заданного соотношения смешиваемых частот преобразователя в базисе дробей Фарея с помощью аппарата цепных дробей и процедуры, в основе которой лежит базовая теорема Фарея-Коши, связывающая соседние дроби в ряде Фарея.

Цель работы - разработать эффективные методы анализа комбинационных составляющих и получить для них уравнения прямых, проходящих через найденные «поражённые» точки.

Рассмотрим задачу отыскания ближайшей дроби Фарея  $R/Q$  к заданному соотношению смешиваемых частот  $q=f1/f2$  ( $f1 \leq f2$ ), минуя операцию синтеза всей последовательности Фарея [8].

### Использование цепных дробей

Согласно теореме Дирихле теории диофантовых приближений [9] для заданного  $q$  всегда существует такая дробь  $R/Q$ , что разность между ними может удовлетворять любой наперед заданной точности. Последовательность дробей Фарея  $\Phi_k$  является последовательностью всех несократимых рациональных дробей, у которых знаменатель  $Q \leq k$ , где  $k$  – порядок ряда Фарея, поэтому для отыскания приближения заданного соотношения  $q$  дробью Фарея можно использовать аппарат цепных дробей [10].

Представим заданное соотношение смешиваемых частот  $q \in (0, 1)$  конечной цепной дробью

$$q = [b_0; b_1, b_2, \dots, b_n]. \quad (1)$$

Цепные дроби обладают тремя замечательными свойствами:

1. Любая подходящая дробь  $R_j/Q_j$  цепной дроби (1) является несократимой дробью ( $j \in 1, n$ ).

2. Знаменатель подходящей дроби, согласно [10], растет как показательная функция от индекса  $j$  подходящей дроби

$$Q_j = 2^{j-1}. \quad (2)$$

3. Рекуррентность в определении подходящих дробей:

$$\begin{aligned} R_j &= b_j R_{j-1} + R_{j-2}; \\ Q_j &= b_j Q_{j-1} + Q_{j-2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$j \geq 1, R_{-1} = 1, Q_{-1} = 0;$$

$$R_0 = b_0, Q_0 = 1.$$

Из свойства 1 можно сделать вывод, что любая подходящая дробь  $R_j/Q_j$  цепной дроби (1), являющейся приближением действительного числа  $q \in (0, 1)$ , принадлежит последовательности Фарея. Таким образом, задача отыскания приближения в базисе дробей Фарея состоит в разложении  $q$  в цепную дробь (1) [8, 10] с одновременным вычислением подходящих дробей  $R_j/Q_j$  согласно (3). Разложение числа  $q$  заканчивается, когда не будет выполняться условие

$$Q_j \leq k. \quad (4)$$

При этом подходящая дробь  $R_j/Q_j$  и есть найденная ближайшая дробь Фарея  $R_i/Q_i$ ,  $i \in I, N_k$  [8] к  $q$ .

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма приближения  $q$  дробью Фарея. Максимальное количество итераций алго-

ритма на рис. 1 можно определить из (2) с учетом (4) по формуле

$$N_i = 2 \log_2 k + 1. \quad (5)$$

### Алгоритм цепных дробей для нахождения двойного Диофантова приближения в классе дробей Фарея

Для каждой дроби на  $(n - 1)$ -м уровне в дереве Фарея можно непосредственно вычислить две соседние дроби, или, иными словами, «прямых потомков» на  $n$ -м уровне. Непосредственного (прямого) предшественника любой дроби (предыдущего уровня) можно найти, вычитая единицу из последнего члена ее разложения в непрерывную дробь. Другой (отдаленный) предшественник данной рациональной дроби может быть найден простым *выбрасыванием* последнего члена [10].

Согласно [8]

$$P_n \cdot Q_{n-1} - P_{n-1} \cdot Q_n = (-1)^{n-1}. \quad (6)$$

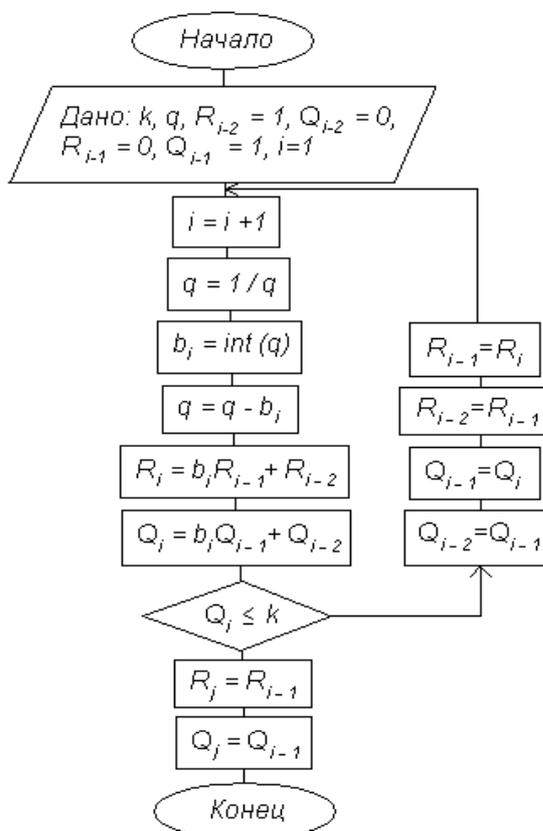


Рис. 1. Алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея

Если количество членов в последовательности  $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$  для прямого предшественника нечетно, то потомок расположится между отдалённым и прямым предшественником, а если чётно – между прямым и отдалённым предшественником.

У любой дроби из ряда Фарея всегда есть два потомка. Назовем потомок, образованный прибавлением единицы к короткой записи исходной дроби, *коротким* потомком, а потомок, образованный прибавлением единицы к длинной записи исходной дроби, *длинным* потомком, и обозначим их соответственно как

$$\frac{P_s}{Q_s} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n + 1];$$

$$\frac{P_l}{Q_l} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n - 1, 2]. \quad (7)$$

Для обоих потомков справедливо, что один из них всегда больше, а другой всегда меньше исходной дроби. Количество членов в одном потомке всегда чётно, а в другом всегда нечетно. Согласно (6) потомок с чётным числом членов всегда больше своего прямого предшественника и наоборот для нечетного числа членов.

Согласно алгоритму, в зависимости от направления поиска - в сторону увеличения дробей ряда или в сторону их уменьшения и чётного или нечётного количества членов последовательности  $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$  для исходной дроби - мы должны находить либо короткий потомок, либо длинный.

Потомки равны :

$$\frac{P_s}{Q_s} = \frac{P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} + P_{i\ddot{o}\ddot{a}}}{Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} + Q_{i\ddot{o}\ddot{a}}};$$

$$\frac{P_l}{Q_l} = \frac{2 \cdot P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} - P_{i\ddot{o}\ddot{a}}}{2 \cdot Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} - Q_{i\ddot{o}\ddot{a}}}. \quad (8)$$

Согласно (8) для отыскания любого из потомков исходной дроби необходимо лишь знать её последнюю промежуточную дробь. Для этого достаточно использовать алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея, приведенный на рис. 1.

В зависимости от направления поиска и чётности числа элементов в записи исходной

дроби необходимо находить значение длинного или короткого потомка. Рассмотрим случаи, когда знаменатель полученного потомка больше порядка ряда Фарея и когда он меньше или равен порядку ряда. В обоих случаях потомок будет являться медиантой исходной дроби и дроби, являющейся отдалённым предшественником исходной. В первом случае ( $Q_{nom} > k$ ) искомая дробь однозначно равна

$$\frac{P}{Q} = \frac{P_{\ddot{i}\ddot{o}} - P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}{Q_{\ddot{i}\ddot{o}} - Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}. \quad (9)$$

Во втором случае ( $Q_{nom} \leq k$ ) искомая дробь однозначно выражается формулой

$$\frac{P}{Q} = \frac{n \cdot P_{ucx} + P_{nom}}{n \cdot Q_{ucx} + Q_{nom}},$$

где  $n = ent\left(\frac{k - Q_{\ddot{i}\ddot{o}}}{Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}\right)$ . (10)

Алгоритм поиска следующей дроби Фарея приводится на рис. 2.

### Определение комбинационных помех, проходящих через «пораженные» точки

Нормированные уравнения прямых комбинационных частот имеют вид

$$q_{\dot{a}\ddot{i}\ddot{o}} = aq + c, \quad (11)$$

где  $q = f_1/f_2$  - соотношение смешиваемых частот на входе преобразователя частоты;  $f_1$  - меньшая из входных частот;  $f_2$  - большая из входных частот;  $a$  и  $c$  - целые числа.

При анализе на пораженность комбинационными частотами рассматриваются только такие частоты, коэффициенты которых удовлетворяют следующему ограничению:

$$|a| + |c| \leq p \quad (12)$$

согласно [1] либо условию

$$|a| \leq p, |c| \leq p \quad (13)$$

согласно [4].

Абсциссы пересечения комбинационных с прямыми основного преобразования в интервале  $0 \leq q \leq 1$  представляют собой последовательность рациональных дробей вида

$R/Q$  со знаменателем, не превышающим некоторое число  $k$ , и такая последовательность является последовательностью Фарея [8].

На рис. 3 изображена номограмма в окрестности  $i$ -ой "пораженной" точки.

В общем случае структура номограммы в окрестности  $i$ -ой "пораженной" точки (рис. 3) представляет собой узел пересечения комбинационных частот, крайними из которых будут комбинационные частоты с индексом  $j = 1$ , имеющие наименьший порядок.

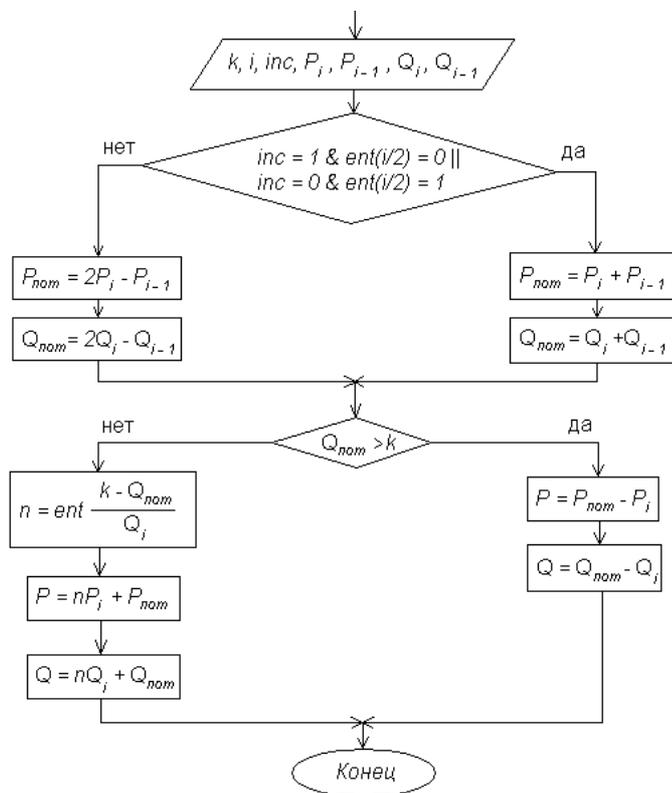


Рис. 2. Алгоритм поиска следующей дроби Фарея

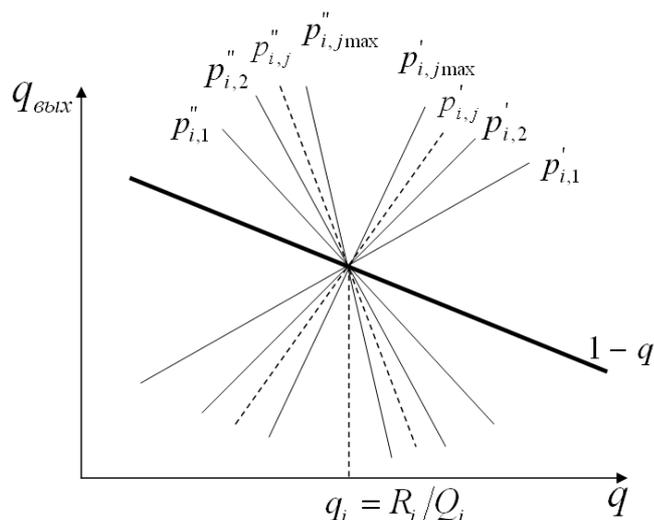


Рис. 3. Номограмма комбинационных частот в окрестности «поражённой» точки

В случае ограничения (12) максимальное число прямых комбинационных частот  $J_{max}$ , проходящих через  $i$ -ую "пораженную" точку номограммы при суммировании частот, равно

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P}{R_i + Q_i} \right], \quad (14)$$

а при вычитании разбивается на два случая: для комбинационных частот с положительной производной

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P + 2}{R_i + Q_i} \right] \quad (15)$$

и комбинационных частот с отрицательной производной

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P - 2}{R_i + Q_i} \right]. \quad (16)$$

В случае ограничения (13) для суммирования частот при положительных производных комбинационных частот

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P - 1}{Q_i} \right], \quad (17)$$

при отрицательных производных

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P + 1}{Q_i} \right]. \quad (18)$$

Для вычитания частот при положительных производных

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P + 1}{Q_i} \right], \quad (19)$$

при отрицательных производных

$$j_{max} = ent \left[ \frac{P - 1}{Q_i} \right]. \quad (20)$$

Для суммирования частот имеем следующие выражения для определения коэффициентов комбинационной частоты (11) с положительной производной по  $q$ :

$$a'_{i,j} = jQ_i + 1; \quad c'_{i,j} = -jR_i + 1, \quad (21a)$$

с отрицательной производной

$$a''_{i,j} = -jQ_i + 1; \quad c''_{i,j} = jR_i + 1. \quad (21б)$$

Для вычитания частот с положительной производной

$$a'_{i,j} = jQ_i - 1; \quad c'_{i,j} = -jR_i + 1, \quad (22a)$$

с отрицательной производной

$$a''_{i,j} = -jQ_i - 1; \quad c''_{i,j} = jR_i + 1. \quad (22б)$$

Подставив в (11) выражения из (21), (22), получим общее уравнение для определения комбинационных частот, проходящих через  $i$ -ую "пораженную" точку:

$$p''_{i,j} = a''_{i,j}q + c''_{i,j}. \quad (23)$$

### Геометрия областей номограммы, свободных от помех

Особый интерес составляет вопрос о форме области, ограниченной ближайшими комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки с номерами  $i$  и  $i + 1$ . Исходя из выводов предыдущего пункта и рис. 3, можно сделать предположение, что область, ограниченная комбинационными частотами  $p''_{i,1}$  и  $p''_{i+1,1}$ , образует четырехугольник  $ABCD$  (рис. 4).

Докажем это предположение путем следующих рассуждений: четырехугольник  $ABCD$  не пересекают комбинационные частоты  $p''_{i-1,1}$  и  $p''_{i+2,1}$ , проходящие через соседние "пораженные" точки  $q_{i-1}$  и  $q_{i+2}$ . Следовательно, для абсцисс точек пересечения комбинационных прямых  $p''_{i,1}$  и  $p''_{i+1,1}$  с прямыми  $p''_{i-1,1}$  и  $p''_{i+2,1}$  должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} B' < B < B''; \\ D' < D < D'', \end{aligned} \quad (24)$$

при условии, что

$$q_{i-1} < q_i < q_{i+1} < q_{i+2}. \quad (25)$$

Так как последовательность "пораженных" точек, заданных неравенством (25), можно заменить последовательностью дробей Фарея, то неравенство (25) переписывается следующим образом:

$$\frac{R_{i-1}}{Q_{i-1}} < \frac{R_i}{Q_i} < \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}} < \frac{R_{i+2}}{Q_{i+2}}. \quad (26) \quad B'' = D'' = \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (29)$$

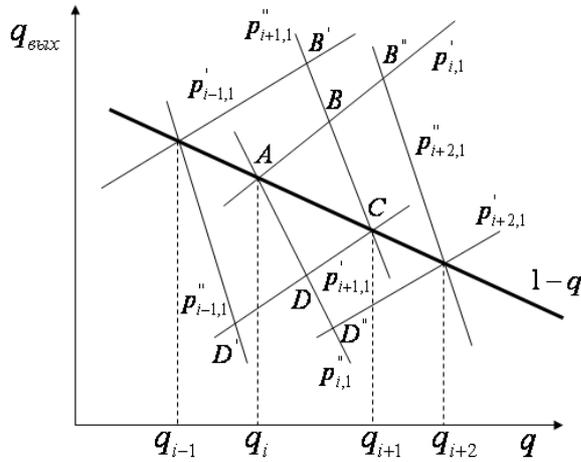


Рис. 4. Номограмма комбинационных частот

Рассмотрим значения абсцисс точек пересечения  $B$  и  $D$  комбинационных прямых  $p_{i,1}''$  и  $p_{i+1,1}'$ . Приравняв уравнения комбинационных прямых (21), (22), (23), после преобразований получим

$$B = D = \frac{R_i + R_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}}. \quad (27)$$

То есть абсцисса пересечения двух комбинационных прямых, проходящих через соседние "пораженные" точки, является медиантой дробей Фарея  $R_i/Q_i$  и  $R_{i+1}/Q_{i+1}$ . Следовательно, исходя из основного свойства медиант дробей Фарея [8], будет выполняться следующее неравенство:

$$\frac{R_i}{Q_i} < \frac{R_i + R_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}}. \quad (28)$$

Теперь рассмотрим значения абсцисс точек пересечения  $B'$  и  $D'$ ,  $B''$  и  $D''$  соответственно комбинационных прямых  $p_{i-1,1}'$  и  $p_{i+1,1}''$ ,  $p_{i,1}''$  и  $p_{i+2,1}'$ . Приравняв уравнения комбинационных прямых (21), (22), (23), после преобразования получим

$$B' = D' = \frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}};$$

Подставив значения абсцисс точек пересечения комбинированных прямых из (27), (29) в неравенство (24), получим вместо двух неравенств (24) одно:

$$\frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1} + R_i}{Q_{i+1} + Q_i} < \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (30)$$

Таким образом, доказательством того, что область, ограниченная комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, суть четырехугольник, есть доказательство выполнения неравенства (30), если выполняются (25), (26).

Для этого рассмотрим попарно соседние дроби Фарея:  $R_{i-1}/Q_{i-1}$ ,  $R_i/Q_i$  и  $R_i/Q_i$ ,  $R_{i+1}/Q_{i+1}$  в одном случае и пары  $R_i/Q_i$ ,  $R_{i+1}/Q_{i+1}$  и  $R_{i+1}/Q_{i+1}$ ,  $R_{i+2}/Q_{i+2}$  в другом случае. Согласно основному свойству дробей Фарея (6) для рассматриваемых пар в первом случае имеем

$$\begin{cases} Q_i R_{i+1} - R_i Q_{i+1} = 1; \\ Q_{i-1} R_i - R_{i-1} Q_i = 1, \end{cases} \quad (31)$$

во втором случае имеем

$$\begin{cases} Q_{i+1} R_{i+2} - R_{i+1} Q_{i+2} = 1; \\ Q_i R_{i+1} - R_i Q_{i+1} = 1. \end{cases} \quad (32)$$

Разрешив системы уравнений (31), (32) относительно центральных дробей рассматриваемых пар, получим

$$\begin{aligned} \frac{R_i}{Q_i} &= \frac{R_{i+1} + R_{i-1}}{Q_{i+1} + Q_{i-1}}; \\ \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}} &= \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \end{aligned} \quad (33)$$

Подставив (33) в неравенство (28), получим неравенство

$$\frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1} + R_i}{Q_{i+1} + Q_i} < \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (34)$$

Неравенство (34) всегда выполняется вследствие основного свойства медиант соседних дробей Фарея. Таким образом, утверждение, что область, ограниченная комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, есть четырехугольник, есть доказательство выполнения неравенства (30), если выполняются (25), (26).

ционными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, является четырехугольником, доказана.

### Реализация на ПЛИС

Одним из преимуществ программируемых логических интегральных микросхем (ПЛИС) над микропроцессорами является возможность распараллеливания выполняемых операций. При реализации алгоритма на ПЛИС уменьшается вычислительная сложность за счет того, что выполнение любой основной операции (сложение, умножение, присваивание) занимает один такт в отличие от реализации алгоритмов на микропроцессорах или микроконтроллерах. Ограничением является только частота тактирования ПЛИС (250...500 МГц). Алгоритм на основе только цепных дробей имеет максимальное количество тактов (5).

Для целого числа, меньшего  $2^{32}=4\,294\,967\,296$ , количество тактов не будет превышать 65. Максимальное время выполнения алгоритма будет постоянно и для частоты 250 МГц не превысит 260 нс, для частоты 500 МГц не превысит 130 нс.

В качестве ПЛИС была выбрана Altera Cyclone II со встроенным сигнальным процессором Nios II. ПЛИС является ядром лабораторного стенда DE2-70 Terasic, обладающего большими функциональными возможностями и архитектурой для построения и отладки законченных цифровых устройств. Встроенный процессор синхронизирован со всеми компонентами ПЛИС и обеспечивает одноктактное выполнение основных операций над числами.

### Выводы

В статье предложены и реализованы методики поиска двойного диафантового приближения комбинационных составляющих в ряде Фарей произвольного порядка, приведены формулы для нахождения уравнений прямых комбинационных помех, проходящих через «поражённые» точки, и доказано, что область номограммы, свободная от комбинационных помех, является четырёхугольником. Произведена оценка использо-

вания ПЛИС для алгоритма нахождения двойного диафантового приближения на основе только цепных дробей.

### Библиографический список

1. Манасевич, В. Синтезаторы частоты (теория и проектирование): пер. с англ. [Текст] / В. Манасевич / Под ред. А. С. Галина. - М.: Связь, 1979. - 384 с.
2. Лобенштейн. Номограмма для расчёта значений комбинационных частот [Текст] / Лобенштейн // Электроника: 1973. - Т. 46. - №16.
3. Gandhi D, Lyons C. Mixer Spur Analysis with Concurrently Swept LO, RF and IF: Tools and Techniques Vol. 46, No. 5, *May 2003*, 212 p.
4. Шарапов, Ю. И. Преобразование сигнала без комбинационных частот [Текст] / Ю. И. Шарапов, Г. М. Крылов, Ю. П. Пантелеев. - М.: ИПРЖР, 2001. - 288 с.
5. Шарапов, Ю. И. Преобразование сигнала без комбинационных частот в специальных приемниках [Текст] / Ю. П. Шарапов. - М.: Издательство «САЙНС-ПРЕСС», 2009. - 256 с.
6. Логинов, В. И. Номограмма комбинационных частот - алгоритмический подход [Текст] / В. И. Логинов, С. А. Маркова // Радиотехника. - 1989. - № 1. - С. 44-46.
7. Логинов, В. И. Программа расчёта номограммы комбинационных частот // WWW.VGAVT-NN.RU: сервер волжской государственной академии водного транспорта, 2009. RL: [http://www.vgavt-nnov.ru:100/informatika/downloads.php?cat\\_id=1&download\\_id=10](http://www.vgavt-nnov.ru:100/informatika/downloads.php?cat_id=1&download_id=10) (дата обращения: 25.12.2009).
8. Бухштаб, А. А. Теория чисел [Текст] / А. А. Бухштаб. - М.: Учпедгиз, 1960. - 375 с.
9. Шмидт, В. Диафантовы приближения [Текст] / В. Шмидт. - М.: Мир, 1983. - 232 с.
10. Хинчин, А. Я. Цепные дроби [Текст] / А. Я. Хинчин. - М.: Наука, 1978. - 112 с.
11. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные ряды. Миниатюры из бесконечного ряда. - Ижевск [Текст] / М. Шредер. - НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2001. - 528 с.

## FPGA USING IN SYSTEMS OF AUTOMATED FREQUENCY DISTRIBUTION

© 2011 P. I. Grushin<sup>1</sup>, V. I. Loginov<sup>2</sup>, N. P. Yampurin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arzamas polytechnic institute (department) NSTU named after R. Y. Alekseev

<sup>2</sup>Volga state academy of water transportation

Algorithms for calculating the combination components in nonlinear frequency conversion based on Farey series. The approaches that do not use the synthesis of the entire series Farey, allowing to solve the problem of "failure" combination frequencies frequency converter only on the basis of the synthesis of the next component of the nonlinear frequency operating frequencies conversion systems. Methods for finding the parameters of Raman noise, straight pass through the "failure" point are proposed. We prove that the area of the nomogram, free from interference of combination, is a quadrangle.

*Frequency conversion, combinational components, infinite fractions, Farey series.*

### Информация об авторах

**Грушин Павел Игоревич**, аспирант Арзамасского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексеева. E-mail: [grushin@tecomgroup.ru](mailto:grushin@tecomgroup.ru). Область научных интересов: преобразование частоты.

**Логинов Вячеслав Иванович**, к.т.н., доцент кафедры ИАПП, Волжская государственная академия водного транспорта. E-mail: [loginov@aquasci-nnov.ru](mailto:loginov@aquasci-nnov.ru). Область научных интересов: проектирование систем нелинейного преобразования частоты.

**Ямпурин Николай Петрович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой КиТРЭС Арзамасского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексеев. E-mail: [yampurin@arzamas.nnov.ru](mailto:yampurin@arzamas.nnov.ru). Область научных интересов: синтезаторы частоты радиоэлектронных систем.

**Grushin Pavel Igorevich**, post-graduate student of Arzamas polytechnic institute NSTU named after R. Y. Alekseev. E-mail: [grushin@tecomgroup.ru](mailto:grushin@tecomgroup.ru). Research interests: frequency converters.

**Loginov Vyacheslav Ivanovich**, Ph. D, docent of Volga state academy of water transportation. E-mail: [loginov@aquasci-nnov.ru](mailto:loginov@aquasci-nnov.ru). Research interests: design of nonlinear frequency conversion.

**Yampurin Nicolay Petrovich**, doctor of technical sciences, professor of Arzamas polytechnic institute (department) NSTU named after R. Y. Alekseev. E-mail: [yampurin@arzamas.nnov.ru](mailto:yampurin@arzamas.nnov.ru). Research interests: synthesis frequency electronic systems.