

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

(19) **ВУ** (11) **6863**

(13) **С1**

(51)⁷ **Н 03L 7/00, 7/18**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(54) **СПОСОБ СИНТЕЗА СТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НЕКРАТНЫХ ЧАСТОТ**

(21) Номер заявки: а 20000048

(22) 2000.01.12

(46) 2005.03.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

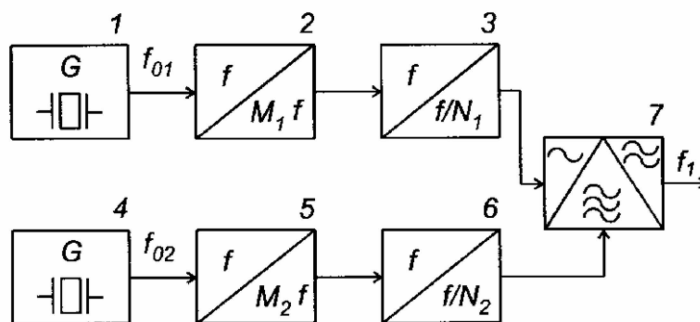
(72) Авторы: Ильинков Валерий Андреевич; Романов Вячеслав Евгеньевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(57)

Способ синтеза стабильных электрических колебаний некрастных частот $f_i = f_0 \cdot \frac{M_i}{N_i}$, где

$i = \overline{1, K}$, M_i и N_i - произвольные целые положительные числа, K - количество стабильных электрических колебаний, основанный на генерировании стабильного опорного колебания с частотой f_0 , генерировании колебания с перестраиваемой частотой f и формировании из него делением частоты в M_1 раз вспомогательного колебания, формировании сигнала ошибки, прямо пропорционального разности фаз вспомогательного и опорного колебаний, и управлении им частотой f колебания с перестраиваемой частотой, образовании выходного стабильного колебания с частотой $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$ делением в N_1 раз частоты f колебания с перестраиваемой частотой, **отличающийся** тем, что при формировании вспомогательного колебания частоту f коле-



Фиг. 1

ВУ 6863 С1

ВУ 6863 С1

бания с перестраиваемой частотой дополнительно делят в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз, при образовании выходного стабильного колебания с частотой f_1 частоту f_{Γ} колебания с перестраиваемой частотой дополнительно делят в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз, а каждое из остальных $(K-1)$ выходных стабильных колебаний образуют делением $\left(N_i \cdot \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i$ раз частоты f_{Γ} колебания с перестраиваемой частотой.

(56)

Левин В.А. и др. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. - М.: Радио и связь, 1989. - С. 17-19.

RU 2047273 С1, 1995.

RU 2085031 С1, 1997.

RU 94030361 А1, 1996.

US 4694475 А, 1987.

EP 0907252 А3, 1999.

EP 0224828 А2, 1987.

JP 10276084 А, 1998.

Предлагаемое изобретение относится к радиотехнике (РТ) и может быть использовано при построении синтезаторов электрических колебаний произвольных (некратных) частот.

Важной для радиоэлектроники является проблема генерирования высокостабильных электрических колебаний с требуемой частотой f_1 . Она решается двумя основными способами [1]: методом прямого частотного синтеза; с помощью системы ФАПЧ. Как известно, в первом случае колебание с частотой f_1 образуется посредством операций деления и (или) умножения частот одного (нескольких) базовых стабильных колебаний с последующим выделением соответствующего комбинационного продукта. Если при синтезе используются два базовых колебания с частотами f_{01} и f_{02} , то требуемое колебание f_1 соответствует одному из уравнений

$$f_1 = f_{01} \cdot \frac{M_1}{N_1} + f_{02} \cdot \frac{M_2}{N_2}, \quad f_2 = f_{01} \cdot \frac{M_1}{N_1} - f_{02} \cdot \frac{M_2}{N_2}. \quad (1)$$

Уравнению (1) соответствует структурная схема синтезатора частоты, приведенная на фиг. 1.

Здесь: 1, 4 - генераторы (кварцевые) базовых стабильных колебаний с частотами соответственно f_{01} и f_{02} ; 2, 5 - умножители частоты колебаний соответственно в M_1 и M_2 раз; 3, 6 - делители частоты соответственно в N_1 и N_2 раз; 7 - смеситель частоты, выделяющий суммарный либо разностный продукты. В общем случае M_1, M_2 - произвольные целые неотрицательные числа, N_1, N_2 - произвольные целые положительные числа. Если $M_1 = 0$ или $M_2 = 0$, то соответствующая ветвь структурной схемы (блоки 1-3 либо 4-6) вместе со смесителем 7 частоты отсутствуют. Местоположение блоков 2 и 3 (5 и 6) принципиально может изменяться местами.

Недостатки метода прямого частотного синтеза известны и состоят в следующем: сложность аппаратурной реализации, вытекающая в основном из сложности реализации умножителей частоты и смесителей частоты; принципиальная невозможность получения колебания с изменяемым в процессе работы значением частоты, т.е. метод прямого частотного синтеза применяется для получения стабильных колебаний с фиксированной(ыми) частотой(ами).

ВУ 6863 С1

По указанным выше причинам на практике в основном применяется метод синтеза с помощью системы ФАПЧ [2]. Идея метода основана на том, что любое требуемое значение (включая иррациональное) f_1 частоты генерируемого колебания можно представить в виде

$$f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}, \quad (2)$$

где f_0 частота опорного стабильного колебания;

M_1, N_1 - в общем случае произвольные целые положительные числа.

Сущность метода состоит в следующем.

Генерируется стабильное опорное колебание с фиксированной частотой f_0 . Генерируется колебание с перестраиваемой частотой f_{Γ} , из которого делением частоты в M_1 раз формируется вспомогательное колебание с частотой f_{Γ}/M_1 . Вспомогательное и опорное колебания сравниваются по фазе. На основе сравнения формируется сигнал ошибки, прямо пропорциональный разности фаз, с помощью которого осуществляется управление частотой f_{Γ} . Изменение (подстройка) частоты f_{Γ} обеспечивает выполнение условия

$f_{\Gamma}/M_1 = f_0$. Выходное колебание с частотой $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$ образуется делением в N_1 раз час-

тоты f_{Γ} колебания с перестраиваемой частотой. Стабильность выходного колебания, благодаря непрерывному процессу управления (подстройки) частотой f_{Γ} (процессу фазовой автоподстройки частоты), соответствует стабильности опорного колебания с частотой f_0 .

Рассматриваемый метод синтеза реализуется устройством, структурная схема которого приведена на фиг. 2.

Она содержит в себе перестраиваемый генератор 1, делитель 2 частоты, фазовый детектор 3, ФНЧ 4, усилитель 5 постоянного тока, делитель 6 частоты и генератор 7 опорного колебания.

Генератор 7 представляет собой кварцевый генератор стабильного опорного колебания с частотой f_0 . Генератор 1 является перестраиваемым по частоте. Он является источником колебания с перестраиваемой частотой f_{Γ} . Делитель 2 делит частоту входного колебания в M_1 раз, образуя тем самым вспомогательное колебание с частотой f_{Γ}/M_1 . В фазовом детекторе 3 осуществляется сравнение по фазе вспомогательного и опорного колебаний. Сигнал на выходе детектора 3 далее подвергается низкочастотной фильтрации (ФНЧ 4) и усилению (усилитель 5). В результате образуется сигнал ошибки, прямо пропорциональный разности фаз вспомогательного и опорного колебаний. Генератор 1 являет собой генератор, управляемый напряжением. Поэтому под влиянием сигнала ошибки частота f_{Γ} колебаний на его выходе изменяется (подстраивается), стремясь к значению $f_{\Gamma} = f_0 \cdot M_1$, при котором разность фаз вспомогательного и опорного колебаний стремится к нулю. Элементы 1-5 и 7 образуют в совокупности систему ФАПЧ генератора 1, управляющую частотой последнего с точностью до фазы. Делитель 6 делит частоту входного колебания в N_1 раз. На его выходе образуется выходное стабильное колебание с частотой $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$.

Устройство фиг. 2 позволяет синтезировать стабильное колебание с частотой f_1 , изменяемой в процессе работы, создавая, таким образом, сетку частот с некоторым шагом Δf . Обычно весь рабочий диапазон синтезатора частот разбивается на поддиапазоны, например, по декадному принципу. Для упрощения синтезатора целесообразно, чтобы на всех поддиапазонах генерируемых частот генератор 1 работал (перестраивался) в одном и том же рабочем диапазоне, соответствующем верхнему поддиапазону синтезатора. При таком построении переход синтезатора с одного поддиапазона на другой осуществляется ступенчатым изменением коэффициента деления N_1 делителя 6 частоты, который в пределах поддиапазона остается неизменным. Так, при декадном (октавном) разбиении на поддиапазоны переход в соседний, более низкочастотный поддиапазон соответствует увеличе-

ВУ 6863 С1

нию N_1 в 10 (2) раз, а переход в соседний, более высокочастотный поддиапазон соответствует уменьшению N_1 в 10 (2) раз. При этом на верхнем поддиапазоне $N_1 = 1$. Делитель 2 частоты имеет переменный коэффициент M_1 деления, обычно изменяющийся с шагом 1 от минимального $M_{1\min}$ до максимального $M_{1\max}$ значения независимо от поддиапазона. Такое построение обеспечивает неизменный внутри поддиапазона шаг Δf сетки частот, который имеет максимальное значение $\Delta f = \Delta f_{\max} = f_0$ на верхнем поддиапазоне и уменьшается (пропорционально увеличению N_1) при переходе в более низкочастотный поддиапазон.

Метод синтеза с помощью системы ФАПЧ, реализуемый устройством по фиг. 2, позволяет получить стабильное колебание с практически любым требуемым шагом сетки частот. Однако он обладает существенным недостатком, который заключается в невозможности одновременного формирования не одного, а нескольких стабильных колебаний с произвольными (некратными) частотами. Необходимость же наличия одновременно нескольких (чаще двух) стабильных колебаний с некратными частотами часто возникает при построении различных систем и устройств, например, систем телекоммуникаций, генераторов электрических сигналов, радиоизмерительных приборов. Для решения этой проблемы в состав системы (устройства) вводят несколько синтезаторов по схеме фиг. 2. Их число равно числу требуемых колебаний с некратными частотами. Такой подход существенно усложняет аппаратную реализацию.

Задачей данного изобретения является получение технического результата, который выражается в устранении отмеченного существенного недостатка метода синтеза с помощью системы ФАПЧ, а именно, в обеспечении возможности одновременного синтеза нескольких колебаний произвольных (некратных) частот и, как следствие, упрощении синтезаторов электрических колебаний.

Идея предлагаемого способа синтеза основана на следующем. По известному методу при формировании колебания с частотой $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$ перестраиваемая частота f_1 имеет значение $f_0 \cdot M_1$, при формировании колебания с другой частотой $f_2 = f_0 \cdot \frac{M_2}{N_2}$ - другое значение $f_0 \cdot M_2$, поэтому при синтезе K произвольных (некратных) стабильных колебаний $f_i = f_0 \cdot \frac{M_i}{N_i}$, ($i = \overline{1, K}$), необходимо использовать K колебаний с переустраиваемыми частотами $f_0 \cdot M_i$, т.е. K синтезаторов частот по структурной схеме фиг. 2.

Суть предлагаемого способа синтеза состоит в использовании при генерировании K стабильных колебаний одного колебания с перестраиваемой частотой. Обратим внимание, что применительно к любому i -му колебанию с частотой $f_i = f_0 \cdot \frac{M_i}{N_i}$ значение частоты f_1 колебания с перестраиваемой частотой определяется числителем последнего выражения. Поэтому для использования одного колебания с перестраиваемой частотой необходимо, чтобы числители выражений, определяющие частоты f_i генерируемых K стабильных колебаний, были одинаковы. Это приводит к формальному соотношению

$$f_i = \frac{f_0 \cdot M_i}{N_i} = \frac{f_0 \cdot \prod_{j=1}^K M_j}{\left(N_i \cdot \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i}. \quad (3)$$

Отметим, что знаменатель выражения (3) определяет необходимый коэффициент деления частоты f_1 перестраиваемой частоты для образования стабильного колебания с частотой f_i . Он должен быть целым, что при различных сочетаниях коэффициентов M_i K некратных стабильных колебаний можно обеспечить только в виде (3).

ВУ 6863 С1

В случае синтеза двух стабильных колебаний с частотами $f_1 = \frac{f_0 \cdot M_1}{N_1}$ и $f_2 = \frac{f_0 \cdot M_2}{N_2}$ на основе (3) имеем: $f_1 = \frac{f_0 \cdot M_1}{N_1} = \frac{f_0 \cdot M_1 \cdot M_2}{N_1 \cdot M_2}$; $f_2 = \frac{f_0 \cdot M_2}{N_2} = \frac{f_0 \cdot M_1 \cdot M_2}{N_2 \cdot M_1}$.

На основании изложенного вытекает следующая последовательность операций, характеризующих предлагаемый способ синтеза.

Генерируется стабильное опорное колебание с фиксированной частотой f_0 . Генерируется колебание с перестраиваемой частотой f_Γ . Последовательно выполняемыми операциями деления частоты в M_1 и $\prod_{j=2}^K M_j$ раз колебания с перестраиваемой частотой f_Γ формируется вспомогательное колебание с частотой $f_\Gamma / \prod_{j=1}^K M_j$.

Формируется сигнал ошибки, прямо пропорциональный разности фаз вспомогательного и опорного колебаний. Сигналом ошибки управляется частота f_Γ колебания с перестраиваемой частотой, вследствие чего обеспечивается выполнение условия $f_\Gamma / \prod_{j=1}^K M_j = f_0$. Выходное колебание с частотой

$f_1 = \frac{f_0 \cdot M_1}{N_1} = \frac{f_0 \cdot \prod_{j=1}^K M_j}{N_1 \cdot \prod_{j=2}^K M_j}$ образуется последовательно выполняемыми операциями деления

в N_1 и $\prod_{j=2}^K M_j$ раз частоты f_Γ колебания с перестраиваемой частотой. Каждое из остальных

(K-1) выходных стабильных колебаний образуется делением в $\left(N_1 \cdot \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i$ раз частоты f_Γ колебания с перестраиваемой частотой.

Таким образом, предлагаемый способ синтеза отличается от известного тем, что вводятся следующие новые операции: операция дополнительного деления в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз частоты f_Γ колебания с перестраиваемой частотой для формирования вспомогательного колебания;

операция дополнительного деления в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз частоты f_Γ колебания с перестраиваемой частотой для образования выходного стабильного колебания с частотой

$f_1 = \frac{f_0 \cdot M_1}{N_1}$; (K-1) независимых операций деления в $\left(N_1 \cdot \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i$ раз частоты f_Γ колебания с перестраиваемой частотой для образования остальных (K-1) выходных стабильных колебаний.

Сформулированные отличия обеспечивают возможность синтеза одновременно K выходных стабильных колебаний с частотами $f_i = f_0 \cdot \frac{M_i}{N_i}$, $i = \overline{1, K}$, M_1, N_1 - произвольные целые положительные числа.

Из приведенного описания предлагаемого способа синтеза прямо вытекает структурная схема реализующего его устройства фиг. 3.

Она содержит перестраиваемый генератор 1, делители 2, 7-12 частоты, фазовый детектор 3, ФНЧ 4 и усилитель 5 постоянного тока, генератор 6 опорного колебания. Назначение

ВУ 6863 С1

ние блоков 1, 3-6 соответствует блокам 1, 3-5, 7 схемы фиг. 2. Делитель 2 делит частоту входного колебания в $M_b = \prod_{j=1}^K M_j$ раз, делители 7, 9, 11 - соответственно в N_1 , N_2 и N_K ,

делители 8, 10 и 12 - соответственно в $M_{1g} = \left(\prod_{j=1}^K M_j \right) / M_1$, $M_{2g} = \left(\prod_{j=1}^K M_j \right) / M_2$ и

$M_{Kg} = \left(\prod_{j=1}^K M_j \right) / M_K$ раз. Как и в схеме фиг. 2, сигнал ошибки (на выходе усилителя 5),

прямо пропорциональный разности фаз вспомогательного и опорного колебаний, поступает на генератор 1, являющийся генератором, управляемым напряжением. Под его влиянием частота f_r колебаний изменяется (подстраивается), стремясь к значению $f_r = f_0 \cdot M_b$, при котором разность фаз вспомогательного и опорного колебаний стремится к нулю. Блоки 2-6 входят в систему ФАПЧ, управляющую частотой генератора 1 с точностью до фазы.

Анализ показывает, что устройство фиг. 3, реализующее предлагаемый способ синтеза, неоптимально с позиции сложности аппаратной реализации. Коэффициенты M_i (см. (3)), определяющие частоты K синтезируемых колебаний, изменяются независимо друг от друга. По этой причине делитель 2 частоты реализуется как последовательное соединение K делителей с коэффициентами деления M_i ($i = \overline{1, K}$), а делители 8, 10 и 12 - как последовательное соединение $(K-1)$ делителей, при этом в делителе 8 отсутствует делитель частоты (секция) с коэффициентом деления M_1 , в делителе 10 - с коэффициентом деления M_2 , в делителе 12 - с коэффициентом деления M_K . Последнее означает, что для реализации делителей 8, 10 и 12 целесообразно использовать соответствующие части (секции) делителя 2, т.е. при делении частоты f_r колебания с перестраиваемой частотой в необходимое число

$\left(N_i \cdot \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i$ раз (см. знаменатель (3)) необходимо использовать соответствующие

секции делителя 2. При этом, как показывает дальнейший анализ, в случае синтеза K стабильных колебаний существует $P = K!$ равноправных вариантов, оптимальных по аппаратной реализации, реализации предлагаемого способа синтеза. Число вариантов равно числу перестановок P из K чисел, изменяющихся от 1 до K , что, например, составляет: $K = 1, P = 1$; $K = 2, P = 2$; $K = 3, P = 6$; $K = 4, P = 24$ и т.д. Для определения этих вариантов необходимо вначале выписать все $P = K!$ перестановок коэффициентов M_j . Для каждой перестановки в соответствии с (3) записать выражения для всех синтезируемых стабильных колебаний f_i ($i = \overline{1, K}$). При этом надо дополнительно учесть, что последовательность записи коэффициентов M_j в числителе (3) определяет последовательность включения соответствующих секций делителя, формирующего вспомогательное колебание, что принципиально и определяет вариант реализации устройства.

В таблице 1 на фиг. 4 приведены для различных K перестановки коэффициентов M_j и выражения для синтезируемых колебаний.

На основании полученных сведений приходим к следующим двум вариантам построения устройства, реализующего предлагаемый способ синтеза для $K = 2$ (фиг. 5, а, б).

Аналогично можно получить 6 вариантов устройства для $K = 3$ и 24 варианта для $K = 4$. Два варианта устройства для $K = 3$, соответствующие перестановкам M_3, M_2, M_1 и M_1, M_2, M_3 , приведены на фиг. 6.

На примере приведенных на фиг. 5, 6 вариантов видно, что конкретный вариант реализации устройства определяется выбранной перестановкой коэффициентов M_j , при этом последовательность расположения коэффициентов M_j соответствует последовательности размещения делителей частоты, включаемых слева направо между генератором пере-

ВУ 6863 С1

страиваемой частоты и фазовым детектором в цепи формирования вспомогательного колебания. Именно поэтому, как сказано выше, принципиально важна выбранная последовательность (перестановка) записи коэффициентов в числителе формулы (3). Последовательность включения, например, блоков 8 и 9 в устройстве фиг. 5, а либо блоков 12-14 в устройстве фиг. 6, а непринципиальна и не определяет новый вариант устройства. Поэтому непринципиальна и последовательность записи коэффициентов в знаменателе (3). Важно только, чтобы при образовании выходного стабильного колебания с частотой f_1 суммарный коэффициент деления частоты f_1 , реализуемый с максимальным использованием делителей в цепи формирования вспомогательного колебания, численно точно соответствовал знаменателю выражения (3).

Таким образом, предлагаемый способ синтеза K стабильных колебаний некрatных частот можно реализовать с помощью $K!$ различных (оптимальных по сложности аппаратной реализации) устройств. В случае решения задачи генерирования K стабильных колебаний использование предлагаемого метода, по сравнению с известным, существенно упрощает аппаратную реализацию. Например, в случае синтеза двух стабильных колебаний некрatных частот ($K = 2$, $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$, $f_2 = f_0 \cdot \frac{M_2}{N_2}$) стандартный подход требует ис-

пользования двух синтезаторов частоты по схеме фиг. 2, содержащих в сумме 14 функциональных элементов. Применение предлагаемого метода позволяет решить эту задачу устройством, содержащим 10 функциональных узлов и отличающимся от одного устройства по схеме фиг. 2 дополнительным введением в него трех делителей частоты с коэффициентами деления M_2 , M_2 и N_2 либо коэффициентами деления M_1 , M_2 и N_2 (соответственно на фиг. 5, а, б). В случае синтеза трех колебаний частот ($K = 3$, $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$,

$f_2 = f_0 \cdot \frac{M_2}{N_2}$, $f_3 = f_0 \cdot \frac{M_3}{N_3}$) вместо трех синтезаторов частоты, содержащих всего 21 функциональный элемент, можно использовать устройство из 14 функциональных элементов (фиг. 6).

Каждый из $K!$ вариантов реализации предлагаемого метода является равноправным. Тем не менее, в одних случаях предпочтительнее выбрать один вариант, в других - другой. Выбор варианта определяется конкретными условиями решаемой задачи. Поясним сказанное на примере синтеза двух колебаний некрatных частот $f_1 = f_0 \cdot \frac{M_1}{N_1}$ и $f_2 = f_0 \cdot \frac{M_2}{N_2}$,

где $f_0 = 10^3$ Гц, $N_1 = N_2 = 1$, $M_1 = \overline{1,10}$ и $M_2 = \overline{1000,10000}$, т.е. формируется низкочастотное колебание с частотой f_1 1, 2, 3,..., 9, 10 кГц и высокочастотное колебание f_2 с частотой из ряда частот $1000 \cdot 10^3$, $1001 \cdot 10^3$, $1002 \cdot 10^3$,..., $9999 \cdot 10^3$, $10000 \cdot 10^3$ Гц. Очевидно, для выполнения этого коэффициенты деления делителей частоты равны: $N_1 = N_2 = 1$; коэффициенты деления M_1 и M_2 изменяются через единицу от значений соответственно 1 и 1000 до значений соответственно 10 и 10000. Конечно, реализовать делитель частоты с изменяемым коэффициентом деления $M_2 = \overline{1000,10000}$ значительно сложнее, чем делитель частоты с коэффициентом деления $M_1 = \overline{1,10}$. С учетом этого для решения поставленной задачи целесообразно использовать устройство по схеме фиг. 5, б, содержащее в себе два делителя частоты с коэффициентом деления M_1 и один делитель с коэффициентом деления M_2 . Естественно, что при решении другой задачи синтеза двух стабильных колебаний предпочтительнее могут оказаться аргументы в пользу выбора синтезатора по схеме фиг. 5, а.

Очевидно, синтезатор частот по схеме фиг. 2 является частным случаем устройства, реализующего предлагаемый способ синтеза. Например, устройство фиг. 5, б преобразу-

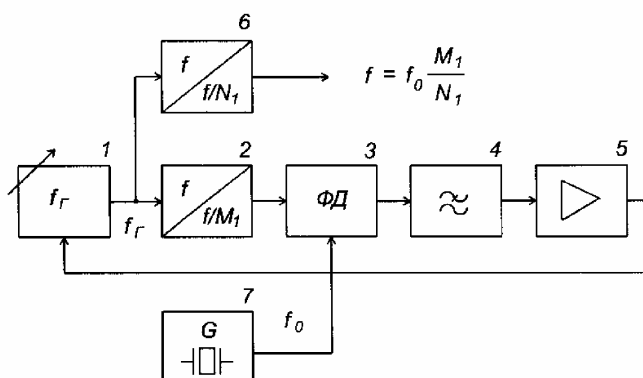
ВУ 6863 С1

ется в известное при условии $M_2 = 1$ и $N_2 = 0$, что соответствует "перемыканию" делителя 2 и исключению делителей 9 и 10.

Источники информации:

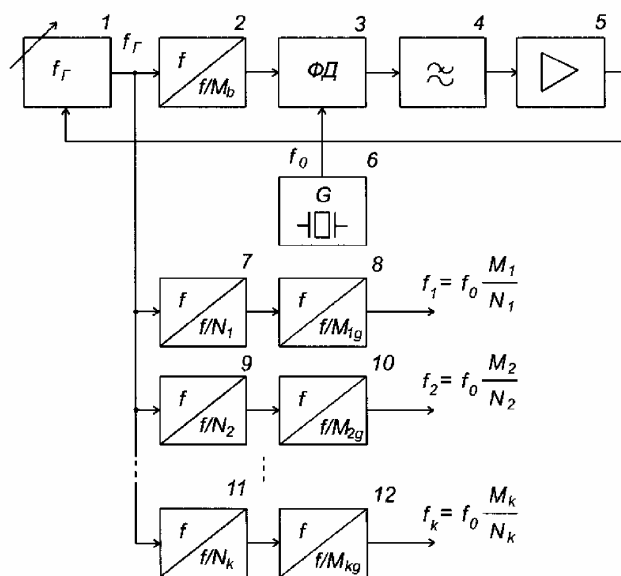
1. Манассевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование): Пер. с англ./Под ред. А.С. Галина. -М.: Связь, 1979. - С. 12, 33.
2. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. -М.: Радио и связь, 1989. - С. 17-19 (прототип).

Структурная схема устройства, реализующего метод ФАПЧ



Фиг. 2

Структурная схема устройства синтеза нескольких колебаний некрратных частот



Фиг. 3

ВУ 6863 С1

Таблица 1

Выражения для синтезируемых колебаний

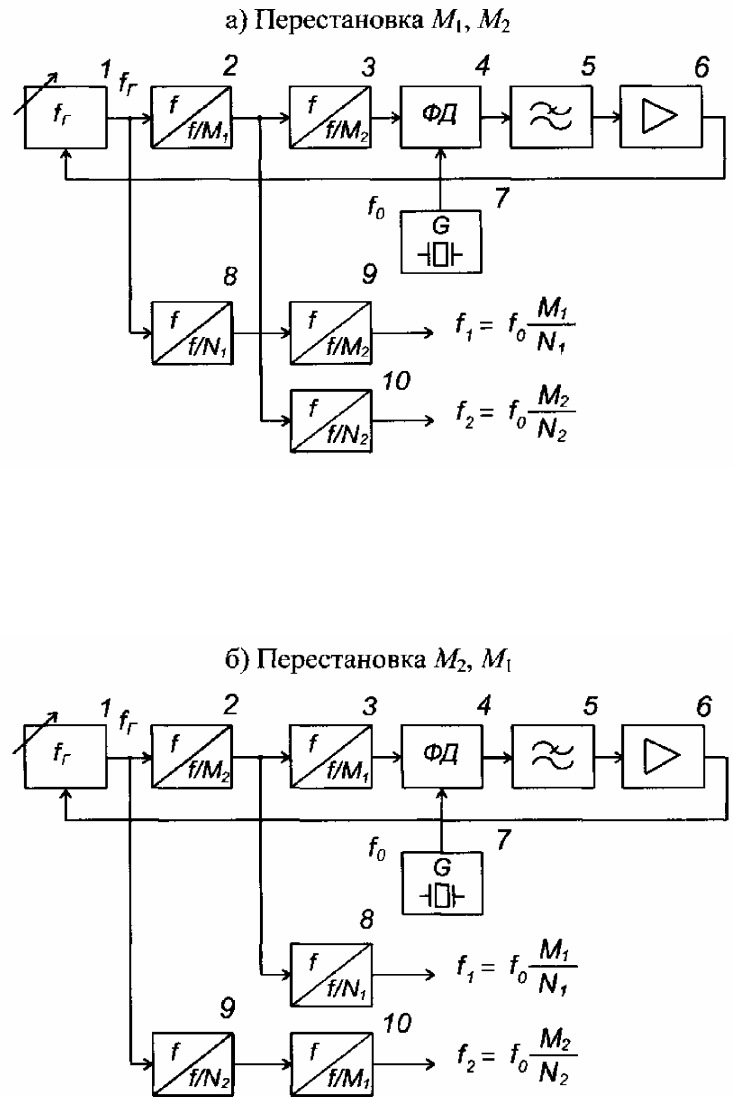
Кол. синт. колеб.	Перес-тановки коэфф. M_i	Выражения для синтезируемых частот			
		f_i			
		f_1	f_2	f_3	f_4
K=2	M_1, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_2 M_1}$	—	—
	M_2, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_1}{N_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_1}{N_2 M_1}$	—	—
K=3	M_2, M_3, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_3 M_2 M_1}$	—
	M_3, M_2, M_1	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_3 M_2 M_1}$	—
	M_1, M_3, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_1 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_2 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_3, M_1, M_2	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_1, M_2, M_3	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_1 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_2 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_2, M_1, M_3	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_2 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_3 M_2 M_1}$	—
K=4	M_4, M_3, M_2, M_1	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_4 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_3 M_2 M_1}$
	M_3, M_4, M_2, M_1	$f_0 \frac{M_3 M_4 M_2 M_1}{N_1 M_3 M_4 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_4 M_2 M_1}{N_2 M_4 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_4 M_2 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_4 M_2 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_1}$
	M_4, M_2, M_3, M_1	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_1 M_4 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_2 M_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_3 M_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_4 M_1 M_3 M_2}$
	M_2, M_3, M_4, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_1 M_2 M_3 M_4}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_3, M_2, M_4, M_1	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_1 M_3 M_2 M_4}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_4, M_1, M_3, M_2	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_1 M_4 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_2 M_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_3 M_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_2, M_4, M_3, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_4 M_3 M_1}{N_1 M_2 M_4 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_4 M_3 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_4 M_3 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_4 M_3 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_4, M_3, M_1, M_2	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_1 M_2}{N_1 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_1 M_2}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_1 M_2}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_1 M_2}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_4, M_1, M_3, M_2	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_1 M_4 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_2 M_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_3 M_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_3 M_2}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_2, M_3, M_4, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_1 M_2 M_3 M_4}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_3, M_2, M_4, M_1	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_1 M_3 M_2 M_4}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_4 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_4, M_1, M_2, M_3	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_2 M_3}{N_1 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_2 M_3}{N_2 M_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_2 M_3}{N_3 M_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_1 M_2 M_3}{N_4 M_1 M_2 M_3}$

продолжение таблицы 1

Кол. синт. колеб.	Перес-тановки коэфф. M_i	Выражения для синтезируемых частот			
		f_i			
		f_1	f_2	f_3	f_4
K=2	M_3, M_4	$f_0 \frac{M_3 M_4}{N_1 M_3 M_4}$	$f_0 \frac{M_3 M_4}{N_2 M_4 M_3}$	$f_0 \frac{M_3 M_4}{N_3 M_4 M_3}$	$f_0 \frac{M_3 M_4}{N_4 M_3 M_4}$
	M_1, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_1 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_2 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_4 M_1 M_2}$
K=3	M_1, M_4, M_3, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_4 M_3 M_2}{N_1 M_1 M_4 M_3}$	$f_0 \frac{M_1 M_4 M_3 M_2}{N_2 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_4 M_3 M_2}{N_3 M_4 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_1 M_4 M_3 M_2}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
	M_3, M_1, M_4, M_2	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_4 M_2}{N_1 M_3 M_1 M_4}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_4 M_2}{N_2 M_4 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_4 M_2}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_4 M_2}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
K=4	M_4, M_2, M_3, M_1	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_1 M_4 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_2 M_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_3 M_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_4 M_2 M_3 M_1}{N_4 M_1 M_3 M_2}$
	M_2, M_3, M_4, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_1 M_2 M_3 M_4}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_3 M_4 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_4 M_1}{N_4 M_1 M_2 M_3}$
K=5	M_5, M_4, M_3, M_2, M_1	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_5 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_4 M_2 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_3 M_2 M_1 M_2}$
	M_4, M_3, M_2, M_1, M_5	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1 M_5}{N_1 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1 M_5}{N_2 M_4 M_3 M_1 M_5}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1 M_5}{N_3 M_4 M_1 M_5 M_2}$	$f_0 \frac{M_4 M_3 M_2 M_1 M_5}{N_4 M_1 M_5 M_2 M_3}$
K=6	$M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_5 M_4 M_2 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_4 M_3 M_2 M_1 M_2}$
	$M_5, M_4, M_3, M_2, M_1, M_6$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_6}{N_1 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_6}{N_2 M_5 M_4 M_2 M_1 M_6}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_6}{N_3 M_5 M_4 M_1 M_6 M_2}$	$f_0 \frac{M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_6}{N_4 M_4 M_3 M_2 M_1 M_6}$
K=7	$M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_6 M_5 M_4 M_2 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_2}$
	$M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1, M_7$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_7}{N_1 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_7}{N_2 M_6 M_5 M_3 M_2 M_1 M_7}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_7}{N_3 M_6 M_5 M_2 M_1 M_7 M_2}$	$f_0 \frac{M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_7}{N_4 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_7}$
K=8	$M_8, M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_7 M_6 M_5 M_4 M_2 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_2}$
	$M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1, M_8$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}{N_1 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}{N_2 M_7 M_6 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}{N_3 M_7 M_6 M_3 M_2 M_1 M_8 M_2}$	$f_0 \frac{M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}{N_4 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_8}$
K=9	$M_9, M_8, M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$	$f_0 \frac{M_9 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_1 M_9 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_9 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_2 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_9 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_3 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_2 M_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_9 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}{N_4 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_2}$
	$M_8, M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1, M_9$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}{N_1 M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}{N_2 M_8 M_7 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}{N_3 M_8 M_7 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9 M_2}$	$f_0 \frac{M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}{N_4 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 M_9}$

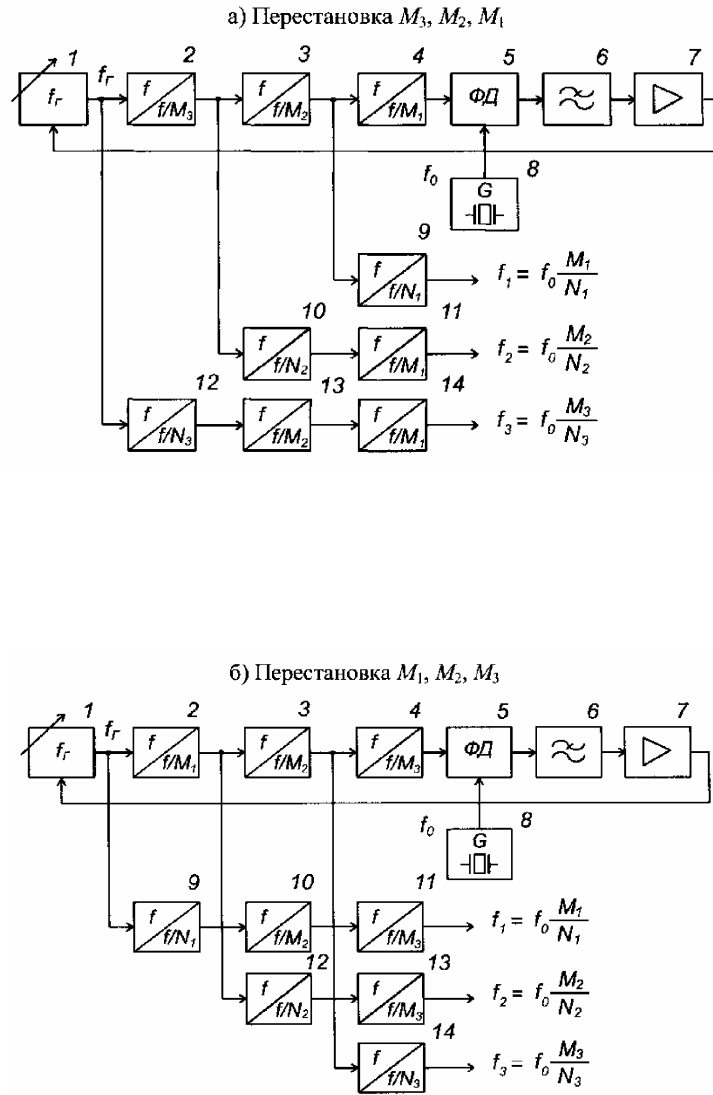
Фиг. 4

ВУ 6863 С1



Фиг. 5

BY 6863 C1



Фиг. 6