

УДК 62.51

Гумаров А. Р.

Аспирант

***ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей
сообщения»***

Россия, г. Самара

Научный руководитель: Авсиевич А. В.

Зав. кафедрой «МАУТ», доцент, к.т.н

**СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ОРТОГОНАЛЬНОЙ КОДОВО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ И
УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK**

Аннотация: В статье представлены модели генераторов для построения: частотно-модулированного сигнала, фазово-модулированного сигнала, ортогонального кодово-частотно модулированного сигнала, в программном комплексе Matlab Simulink. Рассмотрены: процесс формирования ортогонального кодово-частотного сигнала, частотной и фазовой модуляции их различия.

Ключевые слова: ортогональная кодово-частотная модуляция (ОКЧМ), угловая модуляция (УМ), частотная модуляция (ЧМ), фазовая модуляция (ФМ), частота, фаза, Matlab, Simulink.

Gumarov A. R.

Postgraduate student

Samara state University of railway transport

Russia, Samara

Scientific supervisor: Avsievich A.V.

Head of the Department "MAUT", Associate Professor, PhD

COMPARISON OF THE PROCESS OF FORMING ORTHOGONAL CODE-FREQUENCY MODULATION AND ANGULAR MODULATION IN THE MATLAB SIMULINK

Abstract: The article presents models of generators for constructing: a frequency-modulated signal, a phase-modulated signal, an orthogonal code-frequency-modulated signal, in the Matlab Simulink. The article considers: the process of forming an orthogonal code-frequency signal, frequency and phase modulation.

Keywords: orthogonal code-frequency modulation (OCFM), angular modulation, frequency modulation (FM), phase modulation (FM), frequency, phase, Matlab, Simulink.

Введение

В таких областях промышленности, как транспорт, энергетика, нефтегазовая отрасль, необходимо обеспечивать надежное функционирование связи. От правильного приема сигналов телемеханики и телеуправления зависит безопасность. В настоящий момент области применения систем телемеханики расширяются. По этой причине необходимо разрабатывать более надежные способы передачи информации. В работе исследуется процесс формирования ортогональных кодово-частотно модулированных сигналов, рассматривается процесс формирования сигналов с угловой модуляцией, производится их сравнение. Исследование проводится с помощью программного комплекса Matlab Simulink – блочного имитационного моделирования различных систем [1, с. 30].

Matlab с расширением Simulink является эффективной системой моделирования и стандартом в области исследования. Имитационное моделирование — это моделирование с использованием математической модели для имитации реального объекта [1, с. 39]. Пакет (расширение) Simulink существенно упрощает исследование и позволяет не изучать языки программирования.

Теоретические сведения

Модуляция – процесс наложения информации, которая имеет вид сигнала сообщения на другой сигнал с более высокой частотой (несущей) [2, с. 136]. Различают два основных вида модуляции в которых происходит изменение по закону передаваемого сообщения: амплитуды (U_H) и угла (θ). Мгновенное значение какой-либо электрической величины, изменяющейся во времени по гармоническому закону, определяется уравнением (высокочастотное колебание, используемое в качестве несущей):

$$U_H \sin \theta,$$

где θ – полная фаза колебания.

$$\theta = (\omega_H t + \varphi_H).$$

Тогда:

$$a(t) = U_H \sin(\omega_H t + \varphi_H),$$

где U_H – амплитуда колебания, ω_H – круговая частота, φ_H – начальная фаза (при $t = 0$).

Амплитудная модуляция (АМ). Частота (ω_H) и фаза (φ_H) постоянные, амплитуда (U_H) изменяется по закону модулирующего сигнала $b(t)$, вокруг среднего значения U_0 . АМ – является линейной системой [3, с. 62].

$$U_H = U_0 + kb(t),$$

$b(t)$ – модулирующий сигнал, k – постоянный во времени коэффициент пропорциональности

$$b(t) = B \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$U_H = U_0(1 + M \cos \Omega t),$$

где $M = \frac{KB}{U_0}$ – коэффициент.

$$a_{AM} = U_0(1 + M \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

При фазе $\varphi_0 = 0$, путем тригонометрического преобразование произведение может быть приведено к виду:

$$a_{AM} = U_0 \sin \omega_0 t + \frac{MU_0}{2} \sin(\omega_0 + \Omega) t + \frac{MU_0}{2} \sin(\omega_0 - \Omega) t.$$

Угловая модуляция (УМ). При УМ изменяется полный угол (θ) несущего колебания. УМ может быть реализована: с помощью фазовой модуляции, когда фаза изменяется в соответствии с изменением амплитуды модулирующего сигнала; частотной модуляции, когда частота несущей изменяется пропорционально амплитуде модулирующего сигнала.

Полная фаза:

$$\theta = \omega_0 t + kb(t).$$

Круговая частота по определению представляет собой скорость изменение начальной фазы. Мгновенная частота – это производная полной фазы по времени:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \frac{db}{dt}.$$

Тогда полная фаза [4, с. 525]:

$$\theta = \int \omega(t) dt.$$

Фазовая модуляция (ФМ). ФМ является прямым нелинейным видом модуляции сдвиг фазы φ изменяется от начального значения φ_0 пропорционально модулирующему сигналу b (находится под знаком тригонометрической функции):

$$\varphi_H = \varphi_0 + kb(t),$$

где k – размерный постоянный коэффициент пропорциональности, $b(t)$ – модулирующий сигнал.

$$b(t) = U \sin(\Omega t + \varphi_M),$$

$$\varphi_H = \varphi_0 + k(U \sin(\Omega t + \varphi_M)),$$

$$a_{ФМ} = U_H \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + k(U \sin(\Omega t + \varphi_M))),$$

$m = kU$ – индекс ФМ, равен максимальному отклонению начальной фазы колебания от среднего значения φ_0 . При фазе $\varphi_0 = 0$.

$$a_{ФМ} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin(\Omega t + \varphi_M)).$$

Частотная модуляция (ЧМ). При ЧМ частота $\omega(t)$ изменяется относительно среднего значения (ω_0), пропорционально модулирующему сигналу $b(t)$. ЧМ является нелинейным интегральным видом модуляции, т.к. её можно представить, как ФМ, у которого фаза изменяется пропорционально не модулирующему сигналу, а интегралу от него.

В ЧМ частота изменяется по закону:

$$\omega(t) = \omega_0 + kb(t),$$

где k – размерный постоянный коэффициент пропорциональности, $b(t)$ – модулирующий сигнал.

$$b(t) = U \cos(\Omega t + \varphi_M)$$

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin \int \omega(t) dt = U_m \sin \int (\omega_0 + kb(t)) dt = U_H \sin(\omega_0 t + C + \int kb(t) dt),$$

где $C = \varphi_0$ – постоянная интегрирования, играет роль начальной фазы [5, с. 13].

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \int U \cos(\Omega t + \varphi_M)) dt = U_H \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{kU}{\Omega} \sin(\Omega t + \varphi_M)),$$

$$m = \frac{kU}{\Omega} = \frac{\omega_D}{\Omega} - \text{девиация частоты (индекс ЧМ)}.$$

При фазовом угле $\varphi_0 = 0$:

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin(\Omega t + \varphi_M)),$$

где ω_0 – средняя частота колебания (немодулированная частота), Ω – частота модуляции [4, с. 75].

Для краткости положим, что $\varphi_M = 0$, тогда уравнения для ЧМ и ФМ имеют вид:

$$a_{\text{ФМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t),$$

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t).$$

Уравнения для ФМ и ЧМ, аналитическая форма аналогична [6, с. 102], отличаясь только индексом модуляции m .

Ортогональная кодово-частотная модуляция (ОКЧМ). Способ ортогонально кодово-частотной модуляции предложен в диссертационной работе А.В. Авсиевичем. В отличие от стандартной ЧМ в ОКЧМ происходит изменение частоты $\Delta\omega(t) \sin \Omega t$ относительно среднего значения ω_0 .

Несущее колебание:

$$y(t) = U_m \sin(\omega_H t + \varphi_H).$$

У которого частота изменяется по закону:

$$\omega_H = \omega_0 + b(t),$$

где $\Delta\omega(t)$ – значения девиации частоты, $b(t)$ – модулирующий сигнал.

$$b(t) = \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M).$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \omega_H &= (\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M))t, \\ y_{\text{ЧМ}} &= U_m \sin((\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M))t + \varphi_0). \end{aligned}$$

При фазе $\varphi_0 = \varphi_M = 0$ уравнение принимает вид:

$$y_{\text{ЧМ}} = U_m \sin((\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin \Omega t)t).$$

Раскрыв скобки получим уравнение, частотной модуляция с синусоидальной модулирующей частотной:

$$y_1 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t).$$

Аналогично формируется частотная модуляция с косинусоидальной модулирующей частотной, итоговое уравнение которой:

$$y_2 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t)t \cos \Omega t),$$

Ортогональный кодово-частотный модулятор описывается уравнением:

$$y = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t) + U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t)t \cos \Omega t),$$

где ω_0 – средняя частота, U_m – амплитуда модулируемого сигнала, Ω – частота модулирующего сигнала, $\Delta\omega_\alpha(t)$ и $\Delta\omega_\beta(t)$ – значения девиации частоты [7, с. 38].

Модель генератора для формирования фазово-модулированного сигнала

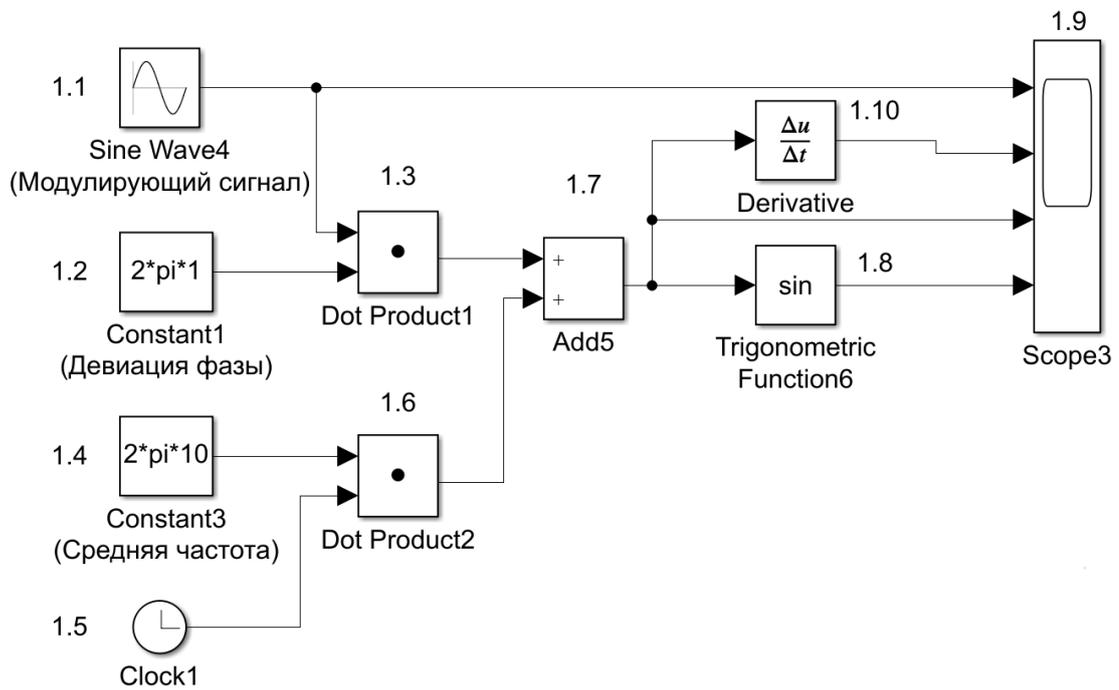


Рис. 1. Модель генератора ФМ сигнала

блок 1.1 «Sine Wave» – генератор синусоидального сигнала (генерирует модулирующий синусоидальный сигнал $\sin \Omega t$); блок 1.2 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант девиации фазы (m); блок 1.3 «Product» – блок умножения ($m \sin \Omega t$); блок 1.4 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант средней частоты ($\omega_0 t$); блок 1.5 «Clock» – источник текущего времени служит для генерации чисел, которые являются значениями текущего времени моделирования (t); блок 1.6 «Product» –

блок умножения ($\omega_0 t$); блок 1.7 «Add» – блок сложения для вычисления полной фазы несущего колебания ($\omega_0 t$ и $m \sin \Omega t$); блок 1.8 «Trigonometric Function» – блок вычисления тригонометрических функций от полной фазы ($\omega_0 t + m \sin \Omega t$); блок 1.9 «Scope» – осциллограф для наблюдения временных и иных зависимостей; блок 1.10 «Derivative» – дифференцирующий блок для вычисления $\omega(t)$.

На рисунке 2 представлен результат работы модели генератора ФМ сигнала, графики: 1) несущий сигнал $U_H \sin(\omega_H t)$; 2) модулирующий сигнал $\sin \Omega t$; 3) изменение мгновенной частоты $\omega(t) = \omega_0 + \frac{db}{dt}$; 4) изменение мгновенной фазы $\varphi_H = \varphi_0 + kb(t)$; 5) итоговый ФМ сигнал $U_m \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t)$.

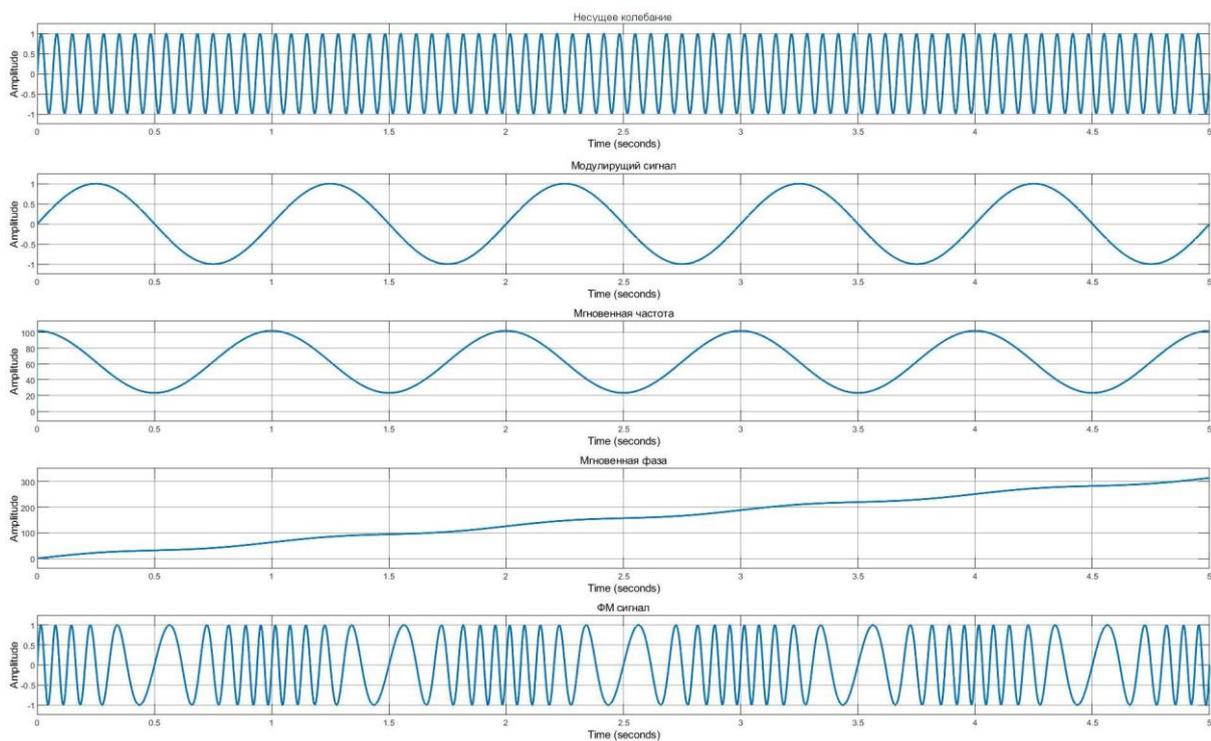


Рис. 2. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной ФМ сигнала

Изменение мгновенной фазы несущего колебания повторяет закон изменения модулирующего колебания (линейное изменение фазы накладывает переменное приращение). Изменения мгновенной частоты несущего колебания определяется производной [8, с. 72].

Модель генератора для формирования частотно-модулированного сигнала

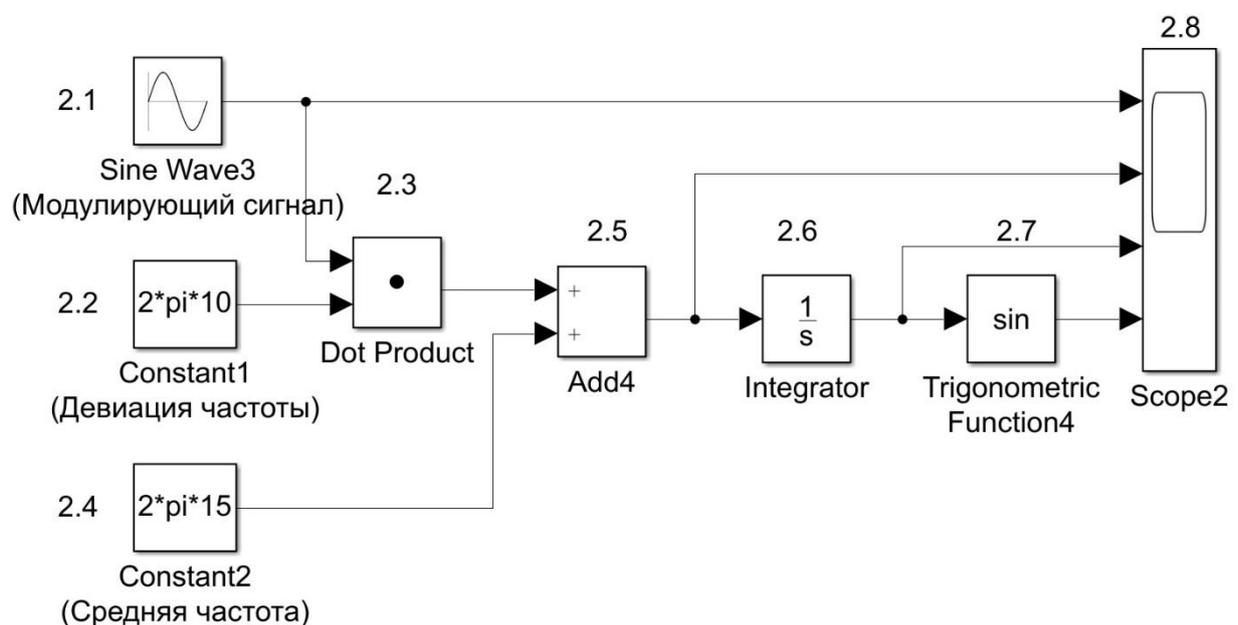


Рис. 3. Модель генератора ЧМ сигнала

Для формирования модулированного сигнала разработаны в ПП Matlab Simulink блоки генератора ЧМ (рисунок 3):

блок 2.1 «Sine Wave» – генератор синусоидального сигнала (генерирует модулирующий косинусоидальный сигнал $\cos \Omega t$); блок 2.2 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант (k); блок 2.3 «Product» – блок умножения $k \cos \Omega t$; блок 2.4 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант средней частоты (ω_0); блок 2.5 «Add» – блок сложения

средней частоты и модулирующего сигнала (ω_0 и $k \cos \Omega t$); блок 2.6 «Integrator» – блок интегрирования входных данных волной фазы $\int (\omega_0 + kb(t)) dt$; блок 2.7 «Trigonometric Function» – блок вычисления тригонометрических функций от результат интегрирования ($\omega_0 t + m \sin \Omega t$); блок 2.8 «Scope» – осциллограф для наблюдения временных и иных зависимостей.

На рисунке 4 (результат работы модели генератора ЧМ сигнала) представлены графики: 1) несущий сигнал $U_m \sin(\omega_0 t)$; 2) модулирующий сигнал $\sin \Omega t$; 3) изменение мгновенной частоты ω ; 4) произведение индекса и модулирующего сигнала: $\Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t$; 5) итоговый частотно модулированный сигнал $U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t)$.

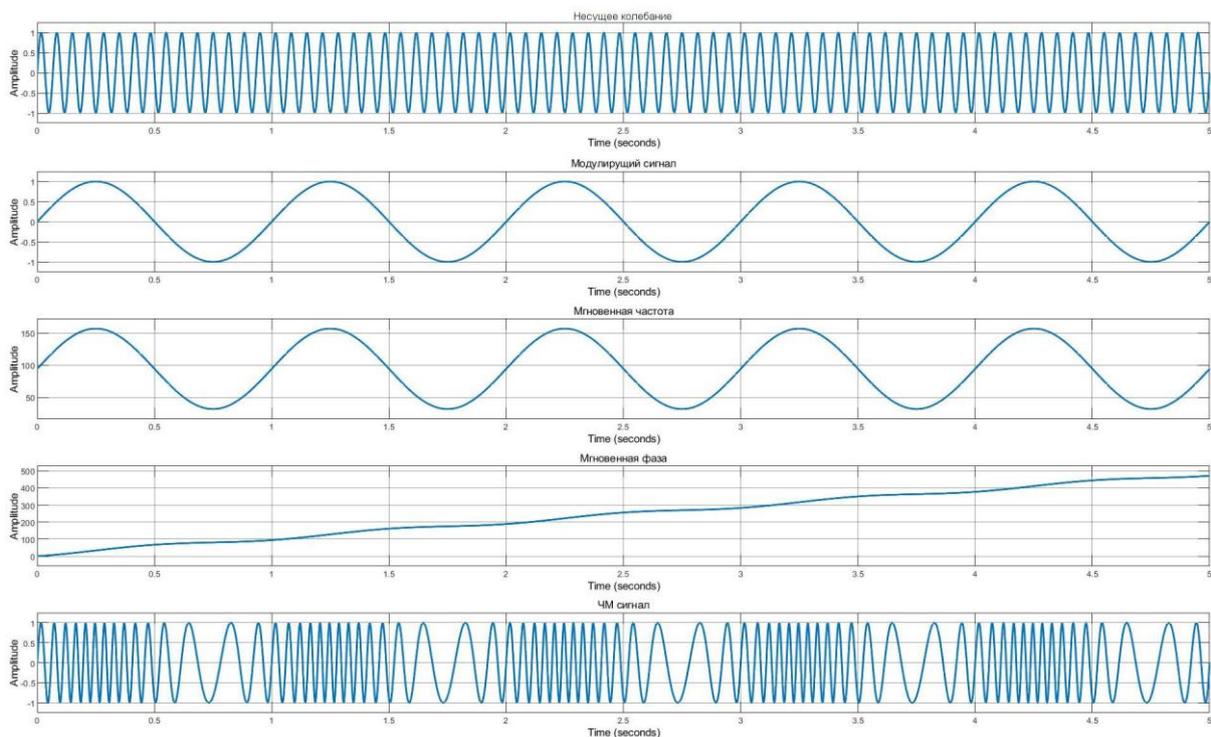


Рис. 4. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной ЧМ сигнала

Изменения мгновенной частоты несущего колебания повторяет изменения модулирующего сигнала. Девияция частоты пропорциональна амплитуде модулирующего колебания. Изменения мгновенной фазы несущего колебания определяется интегрированием [8, с. 73].

Модель генератора для формирования ортогонально кодово-частотного модулированного сигнала

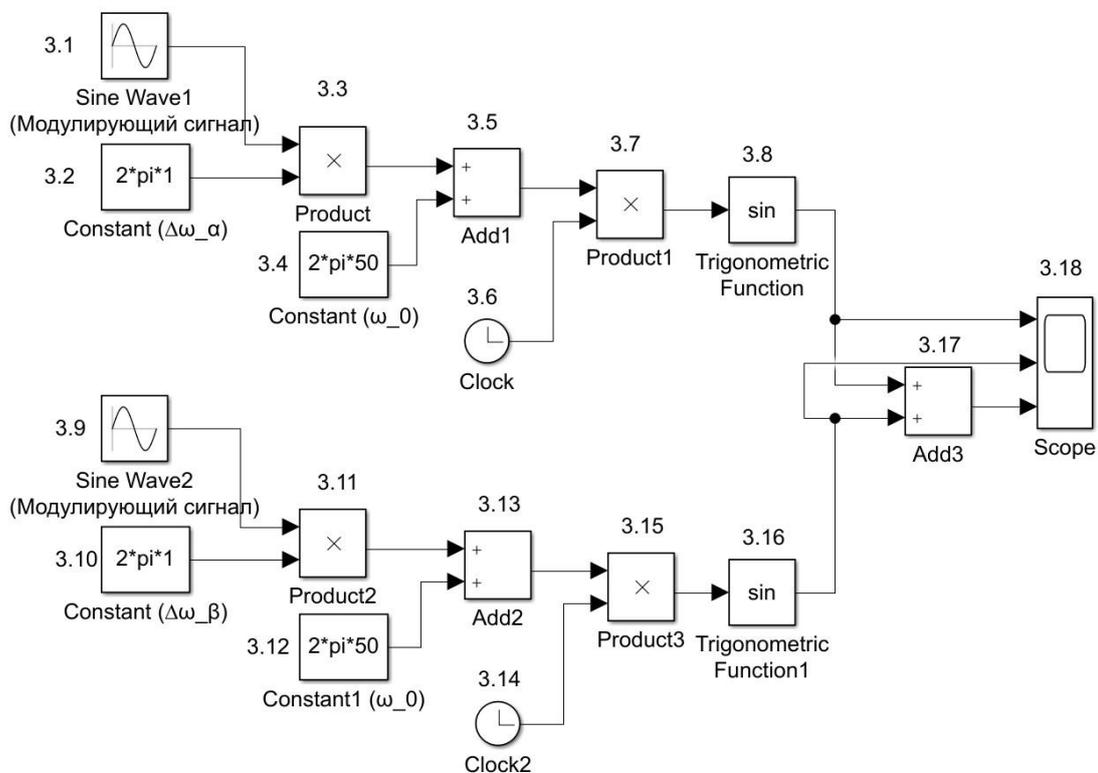


Рис. 5. Модель генератора ОКЧМ сигнала

Для формирования модулированного сигнала разработаны в ПП Matlab Simulink блоки генератора ОКЧМ (рисунок 5):

блок 3.1 «Sine Wave» – генератор синусоидального сигнала ($\sin \Omega t$, $\cos \Omega t$, генерирует модулирующий синусоидальный или косинусоидальный сигнал); блок 3.2 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант для $(\Delta\omega_\alpha(t), \Delta\omega_\beta(t))$,

ω_0); блок 3.3 «Product» – блок умножения; блок 3.4 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант для (ω_0); блок 3.4 «Constant» – источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант величины (ω_0); блок 3.5 «Add» – блок сложения ω_0 и $\Delta\omega_\alpha(t) \sin \Omega t$; блок 3.6 «Clock» – источник текущего времени служит для генерации чисел, которые являются значениями текущего времени моделирования (t); блок 3.8 «Trigonometric Function» – блок вычисления тригонометрических функций от ($\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t$) или ($\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t)t \cos \Omega t$); блок 3.17 «Add» – блок сложения синусоидальной и косинусоидальной составляющей ОКЧМ сигнала; блок 3.18 «Scope» – осциллограф для наблюдения временных и иных зависимостей.

Для упрощения исследования примем произведение девиации частоты и времени равной m : $\Delta\omega_\alpha(t)t = m$. Рассмотрим процесс формирования синусоидальной составляющей (по аналогии с процессом формирования угловой модуляцией) сигнала ОКЧМ.

На рисунке 6 (результат работы модели генератора ОКЧМ сигнала) представлены графики: 1) несущее колебание $U_m \sin(\omega_0 t)$; 2) модулирующий сигнал $\sin \Omega t$; 3) изменение частоты $\Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t$; 4) полная ваза модулированного колебания $\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t$; 5) итоговый частотно модулированный сигнал $U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t)$.

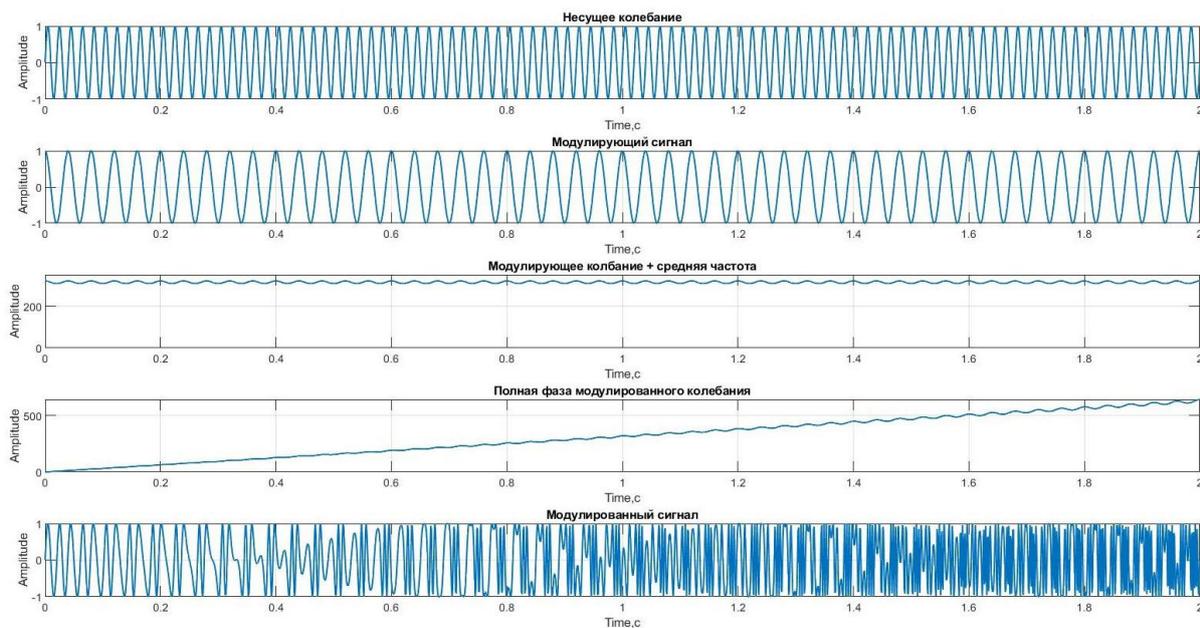


Рис. 6. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной составляющей ОКЧМ сигнала

Наглядно отличие ЧМ от ОКЧМ можно увидеть на рисунке 7, амплитуда колебания полной фазы ОКЧМ сигнала постоянно возрастает со временем, амплитуда мгновенной фазы ЧМ остается постоянной. Графики 1) полная фаза ОКЧМ сигнала; 2) мгновенная фаза ЧМ сигнала.

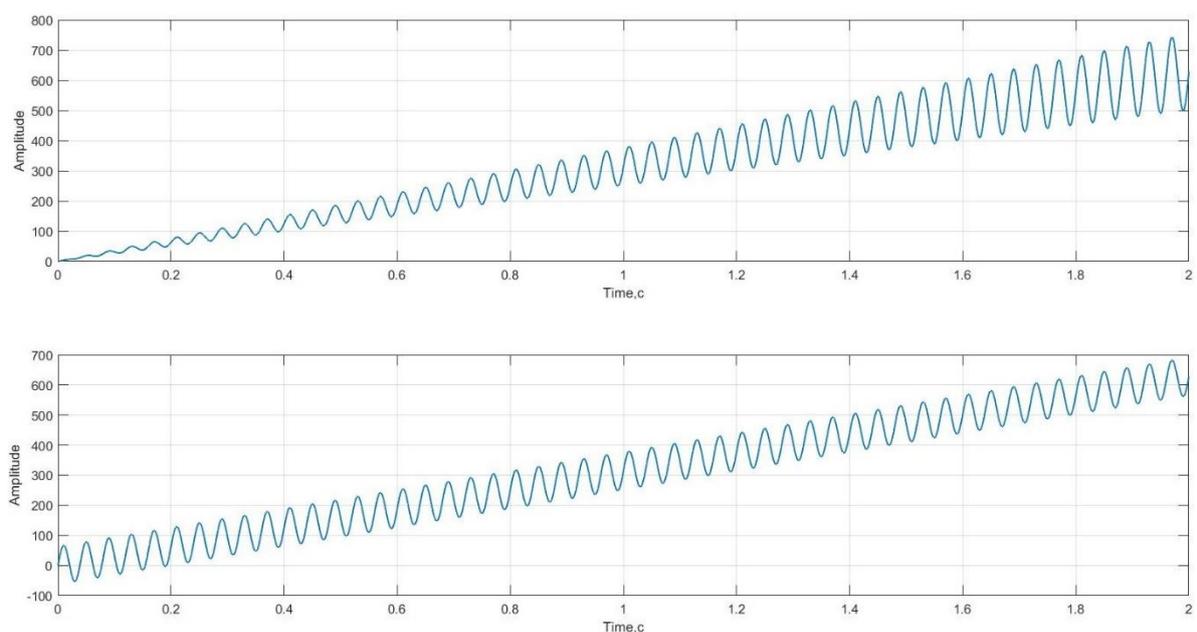


Рис. 7. Временные диаграммы процесса изменения полной фазы несущего колебания

В отличие от стандартной ЧМ в ОКЧМ происходит изменение частоты $\Delta\omega_\alpha(t) \sin \Omega t$ около среднего значения ω_0 . Рассмотрим трансформацию сигнала в этом случае.

Сигнал с косинусоидальной модулирующей частотой $y_2 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t) t \cos \Omega t)$. После преобразования уравнение принимает вид $U_m \sin(\omega_0 + \Delta\omega_\beta(t) \cos \Omega t)t$. В таком случае графики процесса формирования косинусоидальной составляющей ОКЧМ сигнала будут принимать вид, представленный на рисунке 7: 1) несущее колебание $U_m \sin(\omega_0 t)$; 2) модулирующий сигнал $\cos \Omega t$; 3) сумма модулирующего колебания и средней частоты (колебание около среднего значения): $\omega_0 + \Delta\omega_\alpha(t) t \cos \Omega$; 4) полная фаза модулированного колебания $(\omega_0 + \Delta\omega_\alpha(t) t \cos \Omega)t$; 5) итоговый частотно модулированный сигнал $U_m \sin(\omega_0 + \Delta\omega_\beta(t) \cos \Omega t)t$.

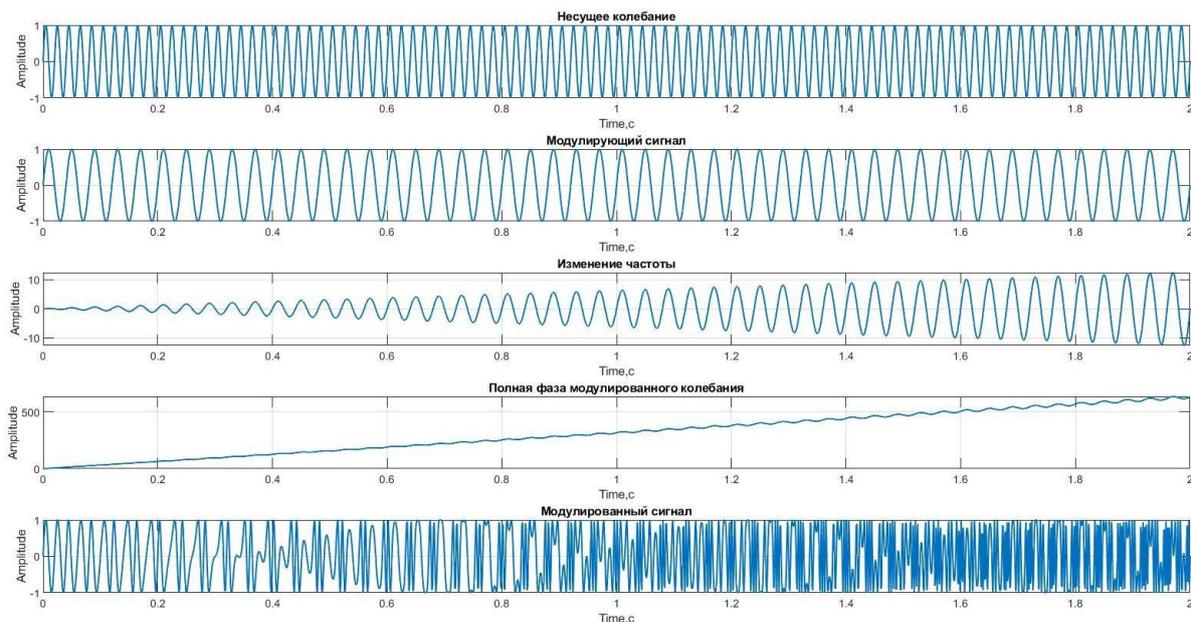


Рис. 7. Временные диаграммы процесса формирования косинусоидальной составляющей ОКЧМ сигнала

Итоговый график ортогонального кодово-частотного сигнала, который представляет собой аддитивную смесь представлен на рисунке 8.

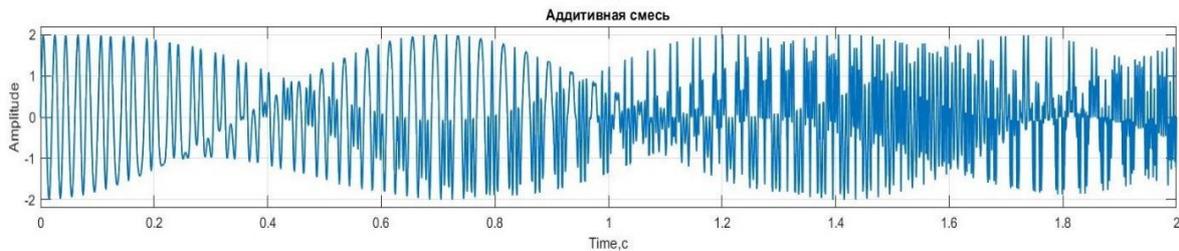


Рис. 8. Временные диаграммы процесса формирования ОКЧМ сигнала

Заключение

Результатом проделанной работы является исследование процесса формирования ортогонального кодово-частотно модулированного сигнала, сравнение с частотной модуляцией и фазовой модуляцией. Представлены временные диаграммы изменения параметров несущего колебания в процессе его формирования с помощью программного комплекса Matlab Simulink. Наглядно приведены отличия ОКЧМ от стандартной ЧМ, выражаемой в законе изменения мгновенной фазы колебания при ФМ (ЧМ) и частоты при ОКЧМ.

Использованные источники:

1. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК_Пресс, 2008. – 784 с.
2. Рид Р. Основы теории передачи информации. М: Вильямс, 2004. 304 с.
3. Горелов Г. В. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте: учебник. М.: УМЦ ЖДТ, 2013. – 532 с.

4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. — 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с
5. Гоноровский И. С. Частотная модуляция и ее применения. М: Связьиздат, 1948. — 285 с.
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов по специальности "Радиотехника" / С.И. Баскаков. - Изд. 5-е, стер. - М.: Высш. школа, 2005. - 462 с.
7. Авсиевич А. В. Разработка метода идентификации нестационарных процессов с ортогональной кодово-частотной модуляцией: диссертация кандидата технических наук: Братск, 2002. — 118 с.
8. Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. - 452 с.