

# ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО КОДОВО-ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK

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

A. Gumarov

*Summary.* In the article, the model of generators for building: a frequency-modulated signal, a phase-modulated signal, an orthogonal code-frequency modulated signal, in the Matlab Simulink software package. The process of forming an orthogonal code-frequency signal is considered, a comparison is made with frequency and phase modulation. The key difference with orthogonal frequency code modulation is the increase in frequency over time, as a consequence of the expansion of the parameter signal.

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

Гумаров Андрей Рашитович

Аспирант, ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара  
nibelheim@inbox.ru

*Аннотация.* Целью работы является исследование ортогональной кодово-частотной модуляции. В статье представлены модели генераторов для построения: частотно-модулированного сигнала, фазово-модулированного сигнала, ортогонального кодово-частотно модулированного сигнала, в программном комплексе Matlab Simulink. Рассмотрен процесс формирования ортогонального кодово-частотного сигнала, произведено сравнение с частотной и фазовой модуляцией. Ключевым отличием ортогональной кодово-частотной модуляции является увеличение частоты со временем, как следствие расширение спектра сигнала.

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

### Введение

Во многих областях промышленности от правильного приема сигналов телемеханики и телеуправления зависит безопасность человека и с каждым годом сферы применения систем электросвязи расширяются. Необходимость повышать надежность передачи информации возрастает. В работе исследуется процесс формирования ортогональных кодово-частотно модулированных сигналов, рассматривается процесс формирования сигналов с угловой модуляцией. Исследование проводится с помощью программного комплекса Matlab Simulink — блочного имитационного моделирования различных систем [1, с. 30]. Программный комплекс Matlab с расширением Simulink является эффективной системой моделирования. Имитационное моделирование — это моделирование с использованием математической модели для имитации реального объекта [1, с. 39].

### Теоретические сведения

Модуляция — процесс наложения информации, которая имеет вид сигнала сообщения на другой сигнал

с более высокой частотой (несущей) [2, с. 136]. Мгновенное значение электрической величины, изменяющейся во времени по гармоническому закону, определяется уравнением:

$$U_{\ast} \sin \theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  — полная фаза колебания.

$$\theta = (\omega_{\ast} t + \varphi_{\ast}). \quad (2)$$

Тогда:

$$a(t) = U_{\ast} \sin(\omega_{\ast} t + \varphi_{\ast}), \quad (3)$$

где  $U_{\ast}$  — амплитуда колебания,  $\omega_{\ast}$  — круговая частота,  $\varphi_{\ast}$  — начальная фаза (при  $t = 0$ ).

**Угловая модуляция (УМ).** При УМ изменяется полный угол ( $\theta$ ) несущего колебания. УМ реализуется с помощью фазовой модуляции или частотной модуляции.

Полная фаза:

$$\theta = \omega_0 t + kb(t). \quad (4)$$

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

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \frac{db}{dt}. \quad (5)$$

Тогда полная фаза [4, с. 525]:

$$\theta = \int \omega(t) dt. \quad (6)$$

### Фазовая модуляция (ФМ)

ФМ является прямым нелинейным видом модуляции, сдвиг фазы  $\varphi$  изменяется от начального значения  $\varphi_0$  пропорционально модулирующему сигналу  $b$  (находится под знаком тригонометрической функции):

$$\varphi_H = \varphi_0 + kb(t), \quad (7)$$

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

$$b(t) = U \sin(\Omega t + \varphi_M), \quad (8)$$

$$\varphi_H = \varphi_0 + k(U \sin(\Omega t + \varphi_M)), \quad (9)$$

$$a_{\text{ФМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + k(U \sin(\Omega t + \varphi_M))), \quad (10)$$

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

$$a_{\text{ФМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin(\Omega t + \varphi_M)). \quad (11)$$

### Частотная модуляция (ЧМ)

При ЧМ частота  $\omega(t)$  изменяется относительно среднего значения ( $\omega_0$ ), пропорционально модулирующему сигналу  $b(t)$ . ЧМ является нелинейным интегральным видом модуляции. ЧМ можно представить, как ФМ, у которого фаза изменяется пропорционально интегралу от модулирующего сигнала.

В ЧМ частота изменяется по закону:

$$\omega(t) = \omega_0 + kb(t), \quad (12)$$

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

$$b(t) = U \cos(\Omega t + \varphi_M), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a_{\text{ЧМ}} &= U_H \sin \int \omega(t) dt = U_m \sin \int (\omega_0 + kb(t)) dt = \\ &= U_H \sin \left( \omega_0 t + C + \int kb(t) dt \right), \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} a_{\text{ЧМ}} &= U_H \sin \left( \omega_0 t + \varphi_0 + \int U \cos(\Omega t + \varphi_M) dt = \right. \\ &= U_H \sin \left( \omega_0 t + \varphi_0 + \frac{kU}{\Omega} \sin(\Omega t + \varphi_M) \right), \end{aligned} \quad (15)$$

$m = \frac{kU}{\Omega} = \frac{\omega_d}{\Omega}$  — девиация частоты (индекс ЧМ).

При фазовом угле  $\varphi_0 = 0$ :

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin(\Omega t + \varphi_M)), \quad (16)$$

где  $\omega_0$  — средняя частота колебания (немодулированная частота),  $\Omega$  — частота модуляции [4, с. 75].

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

$$a_{\text{ФМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \quad (17)$$

$$a_{\text{ЧМ}} = U_H \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t). \quad (18)$$

Аналитическая форма записи уравнений для ФМ и ЧМ аналогична [6, с. 102], отличие в части касающегося индекса 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  $\omega_0$ .

Несущее колебание:

$$y(t) = U_m \sin(\omega_H t + \varphi_H). \quad (19)$$

У которого частота изменяется по закону:

$$\omega_H = \omega_0 + b(t) \quad (20)$$

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

$$b(t) = \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M). \quad (21)$$

Тогда:

$$\omega_H = (\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M))t, \quad (22)$$

$$y_{\text{ЧМ}} = U_m \sin((\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin(\Omega t + \varphi_M))t + \varphi_0). \quad (23)$$

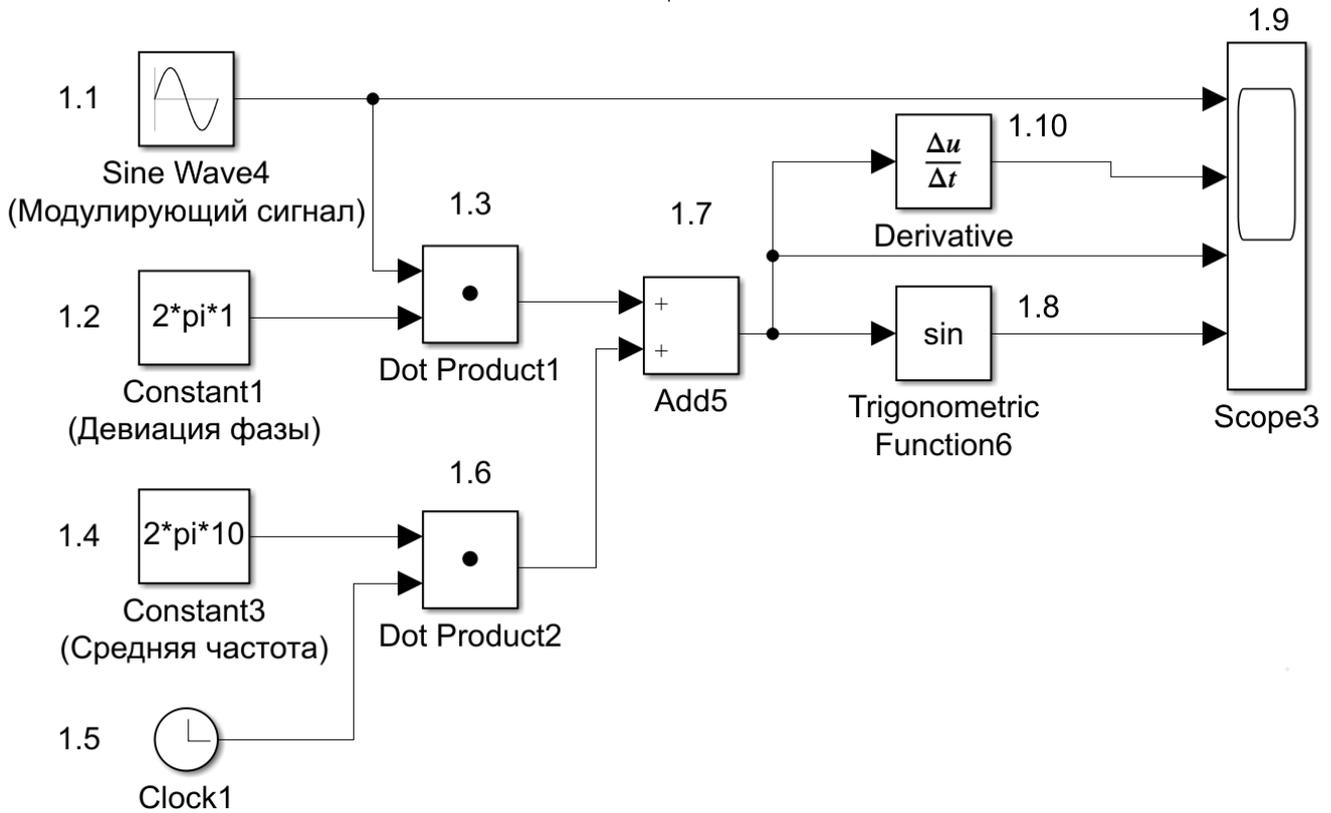


Рис. 1. Модель генератора ФМ сигнала

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

$$y_{чм} = U_m \sin((\omega_0 + \Delta\omega(t) \sin \Omega t)t). \quad (24)$$

Раскрыв скобки получим уравнение, частотной модуляции с синусоидальной модулирующей частотой:

$$y_1 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t). \quad (25)$$

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

$$y_2 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t)t \cos \Omega t). \quad (26)$$

Ортогональный кодово-частотный модулятор описывается уравнением:

$$y = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\alpha(t)t \sin \Omega t) + U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_\beta(t)t \cos \Omega t), \quad (27)$$

где  $\omega_0$  — средняя частота,  $U_m$  — амплитуда модулируемого сигнала,  $\Omega$  — частота модулирующего сигнала,  $\Delta\omega_\alpha(t)$  и  $\Delta\omega_\beta(t)$  — значения девиации частоты [7, с. 38]. В работе рассматривается только синусоидальная составляющая.

Модель генератора для формирования фазово-модулированного 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

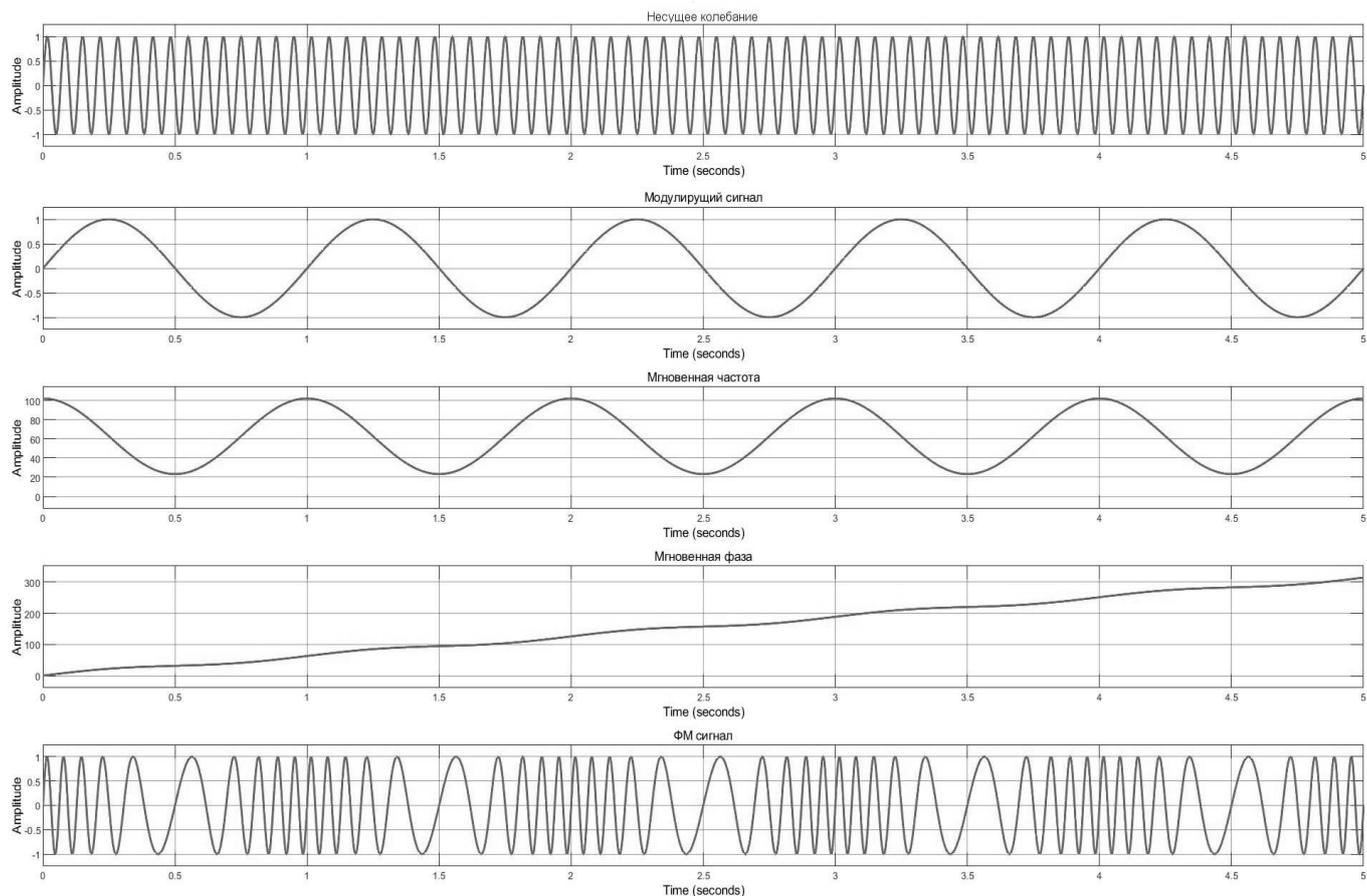


Рис. 2. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной ФМ сигнала

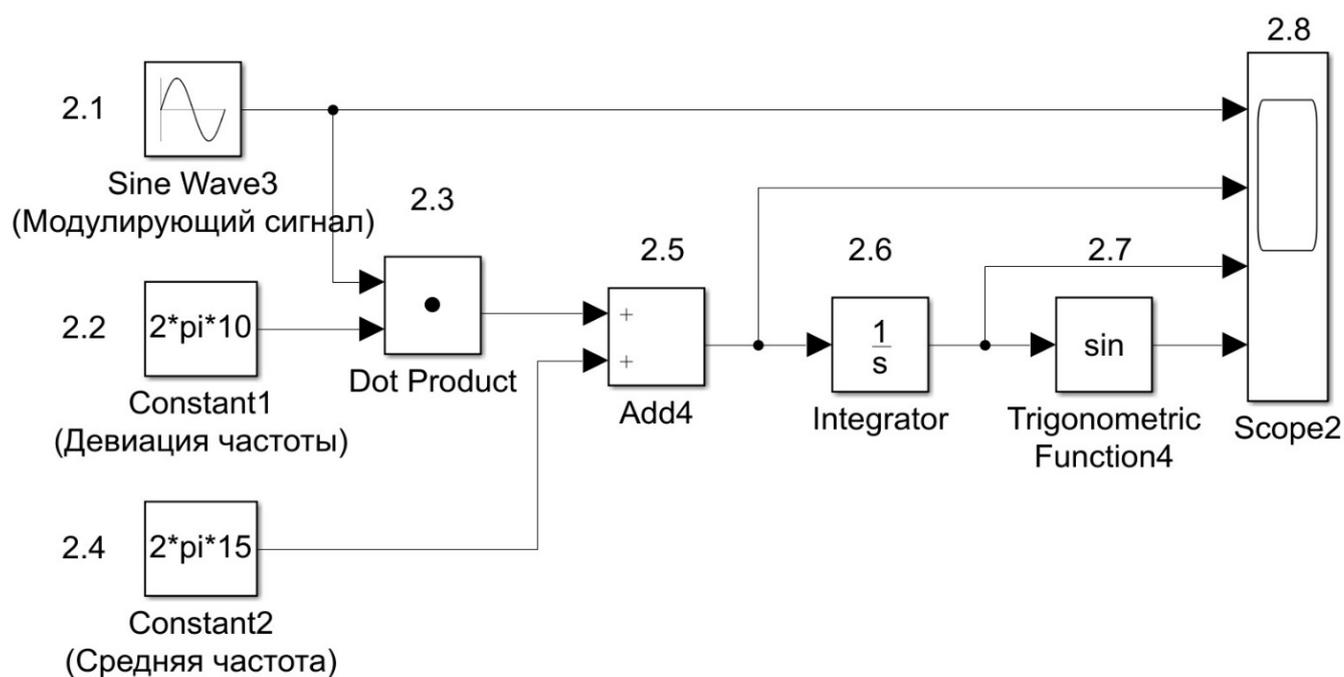


Рис. 3. Модель генератора ЧМ сигнала

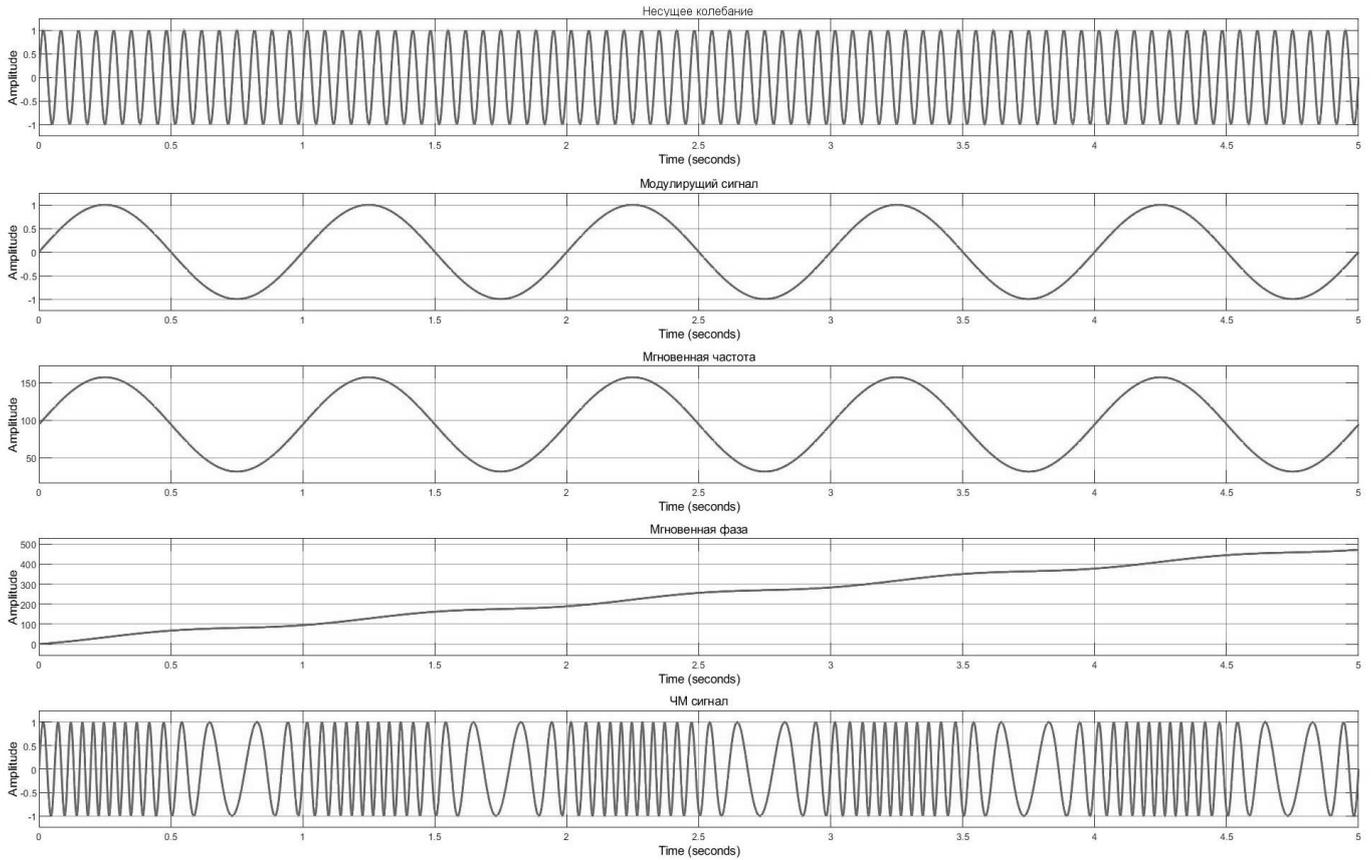


Рис. 4. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной ЧМ сигнала

$U_H \sin(\omega_H t)$ ; 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  $U_m \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t)$ .

Изменение мгновенной фазы несущего колебания повторяет закон изменения модулирующего колебания. Мгновенная частота несущего колебания изменяется в соответствии с производной [8, с. 72].

Модель генератора для формирования частотно-модулированного 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 ( $\omega_0$ ); блок 2.5 «Add» — блок сложения средней частоты и модулирующего сигнала ( $\omega_0$  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  $\omega$ ; 4) произведение индекса и модулирующего сигнала:  $\Delta \omega_\alpha(t) t \sin \Omega t$ ; 5) итоговый частотно модулированный сигнал  $U_m \sin(\omega_0 t + \Delta \omega_\alpha(t) t \sin \Omega t)$ .

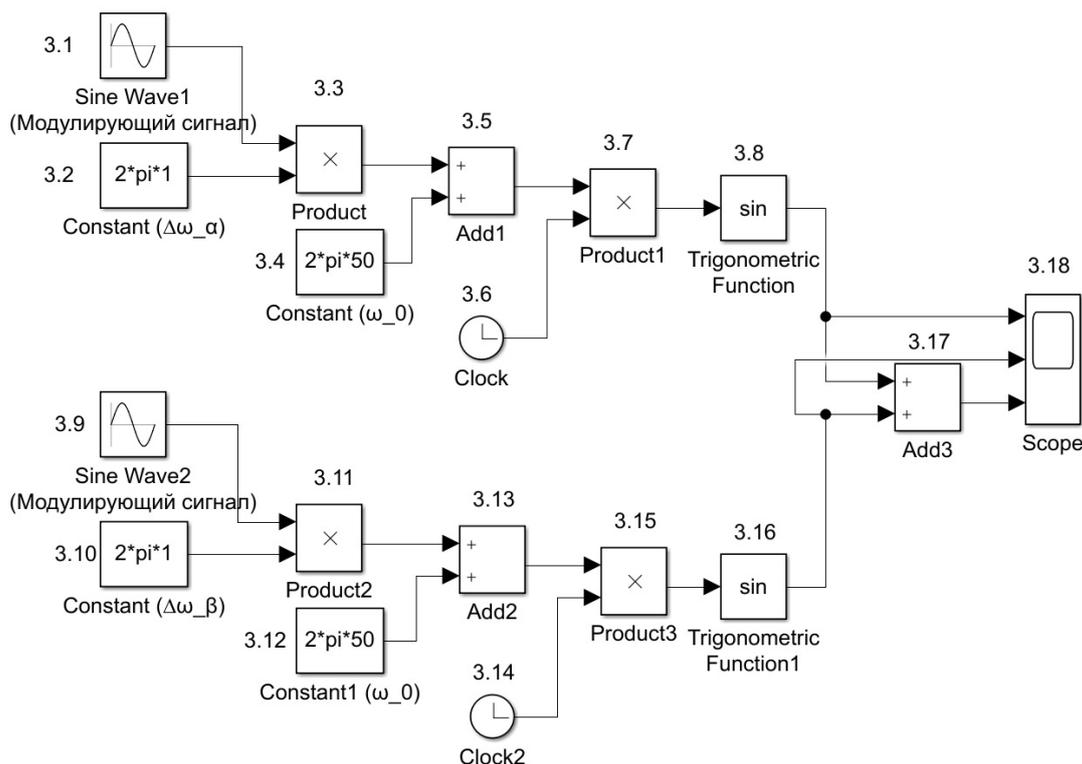


Рис. 5. Модель генератора ОКЧМ сигнала

Изменения мгновенной частоты несущего колебания повторяет изменения модулирующего сигнала. Мгновенной фазы несущего колебания изменяется в соответствии с интегрированием [8, с. 73].

Модель генератора для формирования ортогонально кодово-частотного модулированного 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 ( $\Delta \omega_\alpha(t)$ ,  $\Delta \omega_\beta(t)$ ,  $\omega_0$ ); блок 3.3 «Product» — блок умножения; блок 3.4 «Constant» — источник постоянного воздействия задает константу или вектор констант для ( $\omega_0$ ); блок 3.5 «Add» — блок сложения  $\omega_0$  и  $\Delta \omega_\alpha(t) \sin \Omega t$ ; блок 3.6 «Clock» — источник текущего времени служит для генерации чисел, которые являются значениями текущего вре-

мени 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 фаза модулированного колебания  $\omega_0 t + \Delta \omega_\alpha(t) t \sin \Omega t$ ; 5) итоговый частотно модулированный сигнал  $U_m \sin(\omega_0 t + \Delta \omega_\alpha(t) t \sin \Omega t)$ .

Наглядно отличие ЧМ от ОКЧМ проиллюстрировано 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.

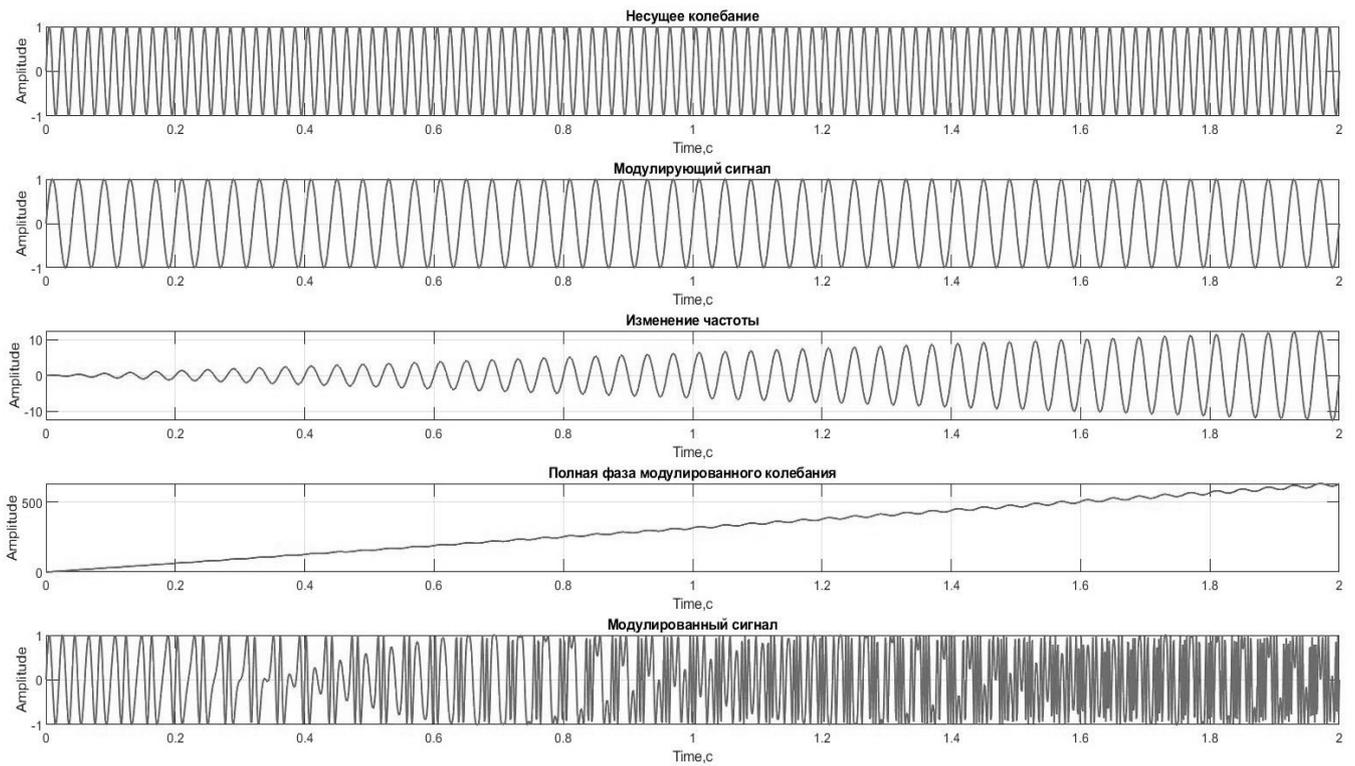


Рис. 6. Временные диаграммы процесса формирования синусоидальной составляющей ОКЧМ сигнала

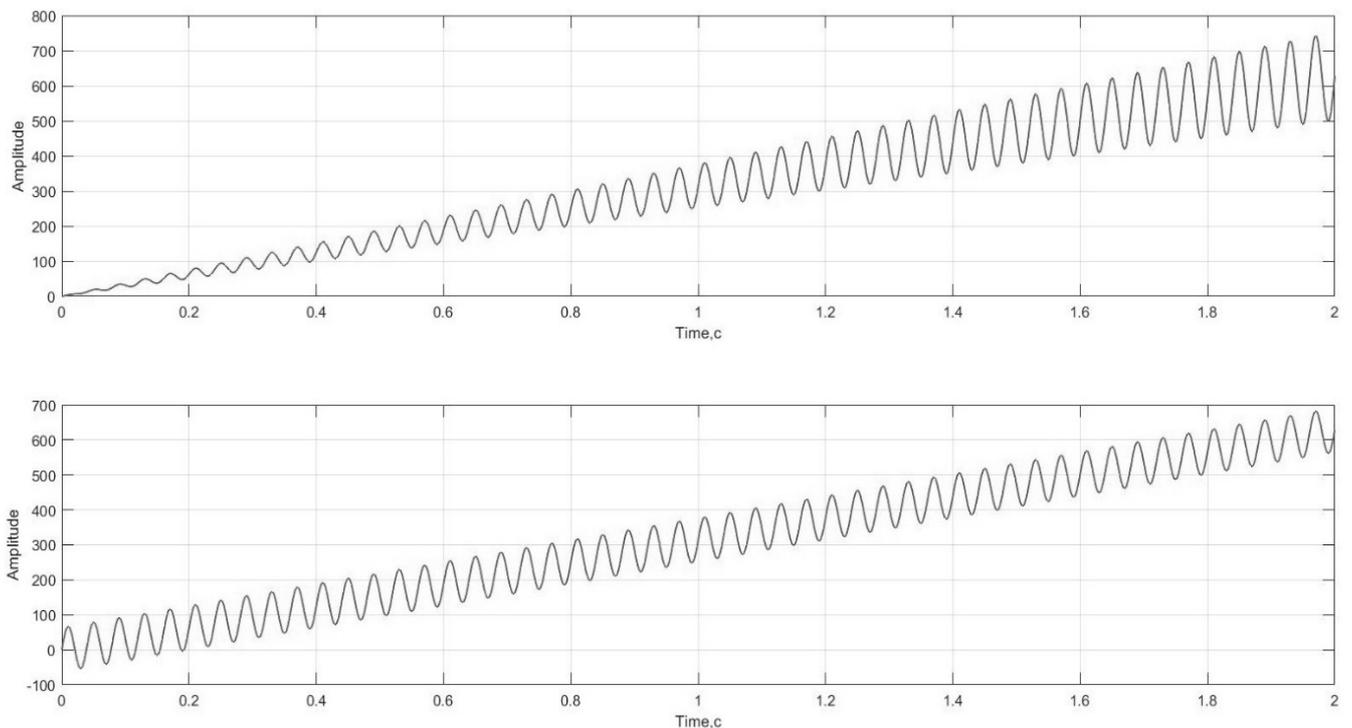


Рис. 7. Временные диаграммы процесса изменения полной фазы несущего колебания

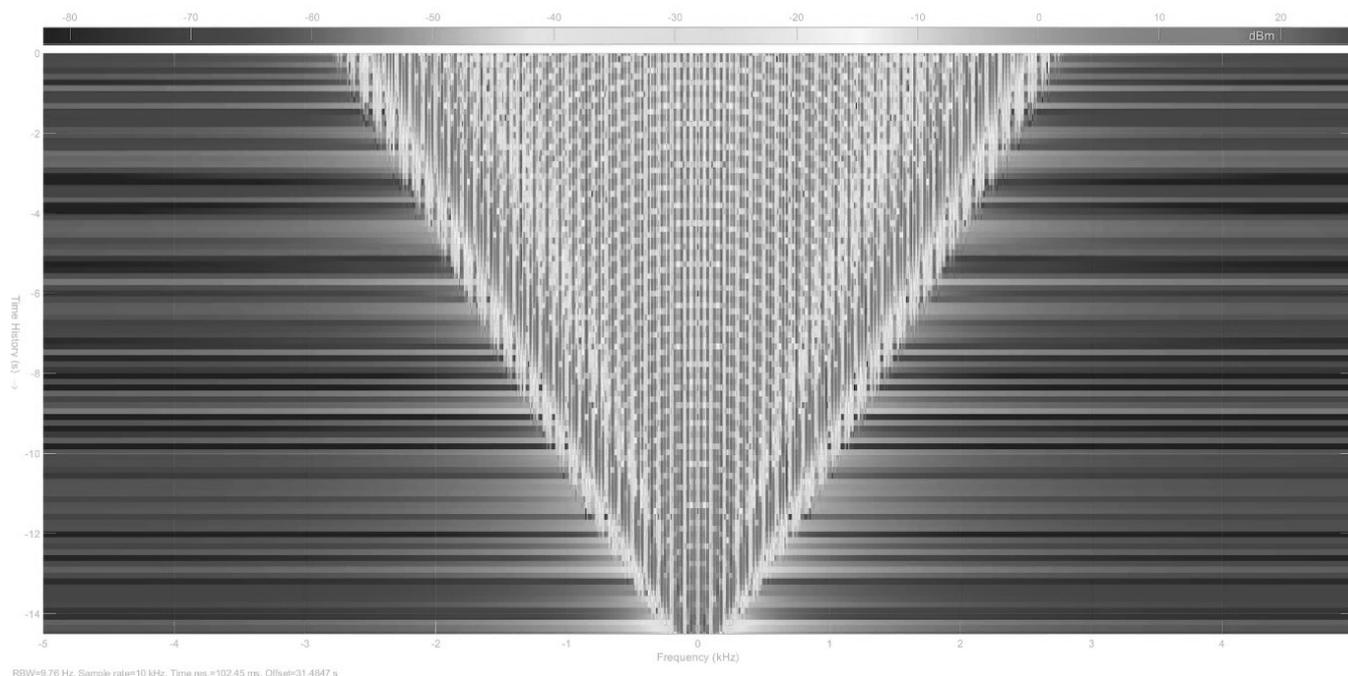


Рис. 8. Спектрограмма сигнала на выходе генератора ОКЧМ

В связи с возрастающей частотой со временем, спектр ОКЧМ сигнала расширяется. На рисунке 8 изображена спектрограмма, на которой можно наблюдать увеличение ширины спектра сигнала со временем.

### Заключение

В статье представлены временные диаграммы изменения параметров несущего колебания ортогонально кодово-частотного сигнала в процессе его формирования с помощью программного комплекса Matlab Simulink.

Результатом проделанной работы является исследование процесса формирования ортогонального кодово-частотно модулированного сигнала, сравнение её с существующими способами аналоговой модуляции: частотной и фазовой. Приведены отличия ОКЧМ от стандартной ЧМ, выражаемой в законе изменения фазы колебания при ФМ (ЧМ) и частоты при ОКЧМ. Главным отличием ОКЧМ — это увеличение частоты модулированного сигнала со временем и как следствие расширением его спектра.

### ЛИТЕРАТУРА

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.

© Гумаров Андрей Рашитович (nibelheim@inbox.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»