

УДК 519.876.5

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ В MATLAB SIMULINK ДЛЯ
ИЗУЧЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ
В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Малышев Ярослав Владимирович¹, студент

e-mail: malyshev1902@mail.ru

Гордяскина Татьяна Вячеславовна¹, доцент кафедры радиоэлектроники

e-mail: klimtat@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе рассматривается методика исследования процесса формирования радиоизлучения с частотной и фазовой модуляцией в судовых системах связи в программном пакете Matlab Simulink.

Ключевые слова: программная модель, Matlab Simulink, частотная модуляция, фазовая модуляция, судовые системы связи, освоение компетенций.

**DEVELOPMENT OF A PROGRAM MODEL IN MATLABSIMULINK FOR
STUDYING FREQUENCY AND PHASE MODULATION IN VESSEL
COMMUNICATION SYSTEMS**

Yaroslav V. Malyshev¹, Student

e-mail: malyshev1902@mail.ru

Tatyana V. Gordyaskina¹, Associate Professor of the Department of Radio Electronics

e-mail: klimtat@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper discusses the methodology for studying the process of forming radio emissions with frequency and phase modulation in ship communication systems using the Matlab Simulink software package.

Keywords: software model, Matlab Simulink, frequency modulation, phase modulation, ship communication systems, competence development.

В современных судовых системах связи широко используется аналоговая модуляция радиосигналов, поэтому при подготовке специалистов по технической эксплуатации транспортного радиооборудования необходимо детально исследовать математические модели радиосигналов (высокочастотных модулированных сигналов), которые позволят студентам:

- изучить теоретические основы формирования радиоизлучений в судовых системах связи,
- приобрести навыки компьютерного моделирования процессов, происходящих в оборудовании канала связи.

Наиболее эффективным является изучение радиосигналов с использованием программной модели процесса формирования частотной и фазовой модуляции в программном пакете Matlab Simulink в судовых системах связи.

В процессе изучения радиоизлучений судовых систем связи учитываются требования Российского Морского Регистра судоходства (РМРС) и Российского Классификационного Общества (РКО) к формированию радиосигналов в заданном диапазоне частот (длин волн), ширине канала связи и класса излучения (см. Таблица 1) [1, 2].

Таблица 1. Требования РМРС и РКО к формированию радиоизлучений

Диапазон длин волн	Частотный диапазон МГц		Номер канала/частота	Ширина канала, кГц	Класс излучения
	РКО, МГц	РМРС, МГц			
ПВ	1,5 – 3	1,607 – 4	2182 кГц	3	J3E, H3E
КВ	3 – 30	4 – 27,5	4125 кГц	3	J3E
			6215 кГц		J3E
			8291 кГц		J3E
			12290 кГц		J3E, H3E
			16420 кГц		A3E
УКВ	300 – 336	–	3 (300,100 МГц)	25	F3E
			5 (300,200 МГц)		
			22 (336,050 МГц)		
			25 (336,200 МГц)		
УКВ	–	156 – 174	6 (156,300 МГц)	25	G3E
			9 (156,450 МГц)		
			13 (156,650 МГц)		

Рассмотрим подробнее формирование радиоизлучения классов:

- **F3E** – частотная модуляция (ЧМ) одного аналогового телефонного канала,
- **G3E** – фазовая модуляция (ФМ) одного аналогового телефонного канала [3].

Исследование радиоизлучений начинается с теоретического изучения математических моделей (ММ) модулированных сигналов: аналитического представления, осциллограмм (временное представление) и спектров (преобразование Фурье от функции сигнала $U(t)$).

В качестве примера рассмотрим формирование однотоновых модулированных сигналов, то есть управляющий низкочастотный сигнал – гармоническое колебание (детерминированный сигнал), что наглядно демонстрирует процесс угловой модуляции,



позволяя рассчитать параметры радиосигнала. В реальных судовых системах связи управляющие информационные сигналы являются случайными, но их спектральная плотность (частотный спектр) содержит бесконечное множество гармонических сигналов, поэтому изучение процесса модуляции с однотоновым управляющим воздействием можно представить как частный случай информационного сигнала.

Аналитическое представление:

несущего колебания:

$$U_{\text{нес}}(t) = U_m * \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

управляющего воздействия:

$$U_{\text{упр}}(t) = U_{m_y} * \cos(\Omega t), \quad (2)$$

частотно-модулированного сигнала:

$$U_{\text{чм}}(t) = U_m * \cos(\omega_0 * t + \int S(t)dt), \quad (3)$$

ЧМ сигнала с однотоновой модуляцией:

$$U_{\text{чм}}(t) = U_{m_n} * \cos(\omega_0 * t + m * \sin(\Omega t)), \quad (4)$$

фазо-модулированного сигнала:

$$U_{\text{фм}}(t) = U_{m_n} * \cos(\omega_0 * t + S(t)dt), \quad (5)$$

ФМ сигнала с однотоновой модуляцией:

$$U_{\text{фм}}(t) = U_m * \cos(\omega_0 t + m * \cos(\Omega t)). \quad (6)$$

Примеры осциллограмм и спектров несущего, управляющего и частотно-модулированного сигналов приведены на рисунке 1.

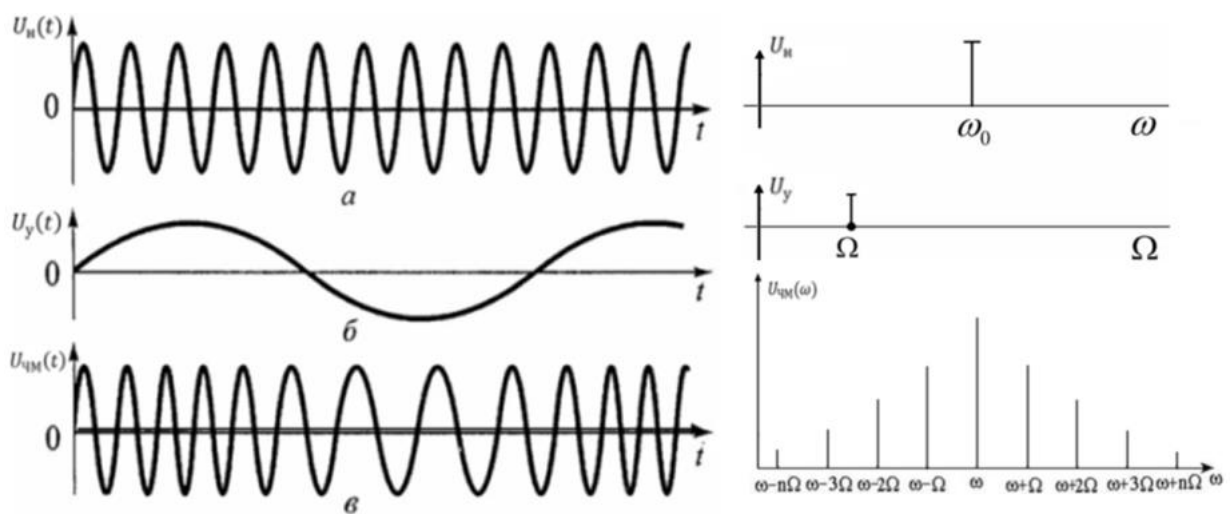


Рисунок 1 – Осциллограммы и спектры сигналов при формировании ЧМ сигнала

Из анализа аналитических представлений однотоновых ЧМ и ФМ сигналов (выражения 3-6) следует: управляющий сигнал в фазовой модуляции непосредственно влияет на полную фазу несущего колебания, а в частотной модуляции на фазу несущего сигнала воздействует интеграл от управляющего воздействия. Но так как управляющий сигнал выбран гармоническим, то и интеграл от него – гармоническая функция, поэтому вид осциллограммы однотонового ЧМ и ФМ сигналов идентичен [4, 5].

Однако, при теоретическом представлении ММ (осциллограмм и спектров) ЧМ и ФМ сигналов рассматриваются общие принципы формирования радиосигнала, не учитывая параметры сигналов (частоты) в реальных судовых системах связи. Поэтому для формирования у обучающихся профессиональных компетенций по технической диагностике судового приемо-передающего оборудования, нужно уже в рамках учебного процесса исследовать ММ сигналов максимально приближенных к реальным.

Разработка программных моделей процесса угловой (ЧМ и ФМ) модуляции в программном пакете Matlab Simulink в соответствии с требованиями РМРС и РКО позволяет использовать реальные параметры радиоизлучений судовых систем связи (например, радиоизлучение F3E 3 канал: $F_{\text{нес}} = 300,1\text{MHz}$, $F_{\text{упр}} = 0,001\text{MHz}$). На рисунке 2 представлена схема с частотной однотоновой модуляцией. Где источник управляющего сигнала – генератор гармонического сигнала на частоте 1 кГц, модулятор FM с несущим колебанием на частоте 300,1МГц, анализаторы спектра, осциллограф.

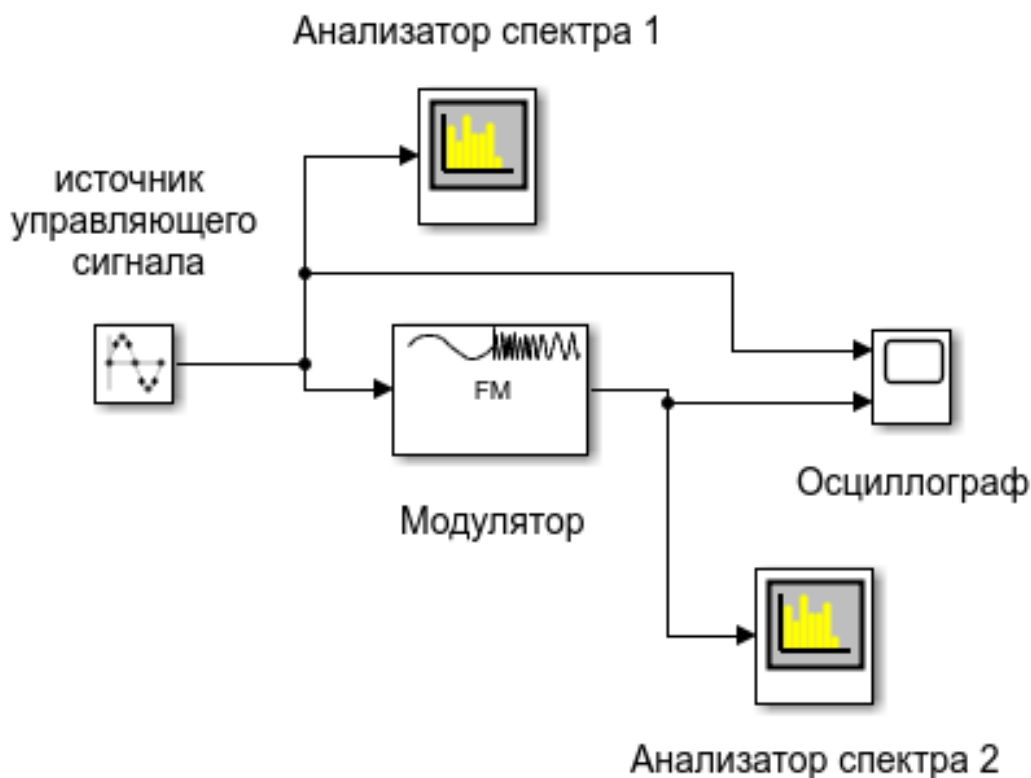


Рисунок 2 – Схема формирования однотонового ЧМ сигнала

На рисунке 3 представлены спектры и осциллограммы управляющего и ЧМ сигналов.

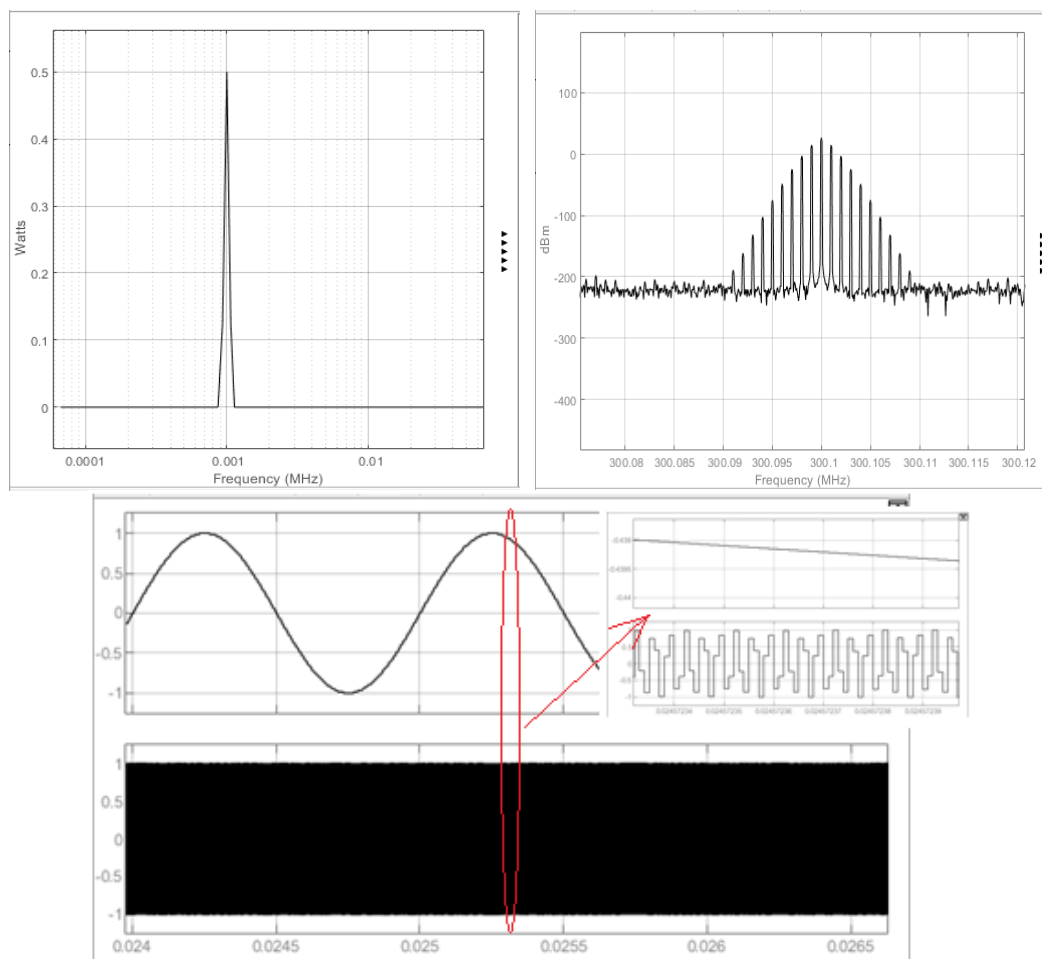


Рисунок 3 – Спектры и осциллограммы управляющего и ЧМ сигналов

Осциллограмма ЧМ сигнала во временном масштабе управляющего воздействия представляет «сплошную черную заливку». Этот эффект связан с реальными параметрами частот сигналов, то есть на одном периоде управляющего воздействия ($T_{упр} = 1\text{мс}$) располагаются 300100 периодов несущего колебания ($T_{нес} = 3,3\text{нс}$). В правом верхнем углу приведены в режиме увеличения осциллограммы управляющего и ЧМ сигналов.

Программная модель процесса формирования ФМ сигнала в программном пакете Matlab Simulink представлена на рисунке 4.

Схема аналогична исследованию процесса формирования ЧМ, за исключением фазового модулятора – РМ. На рисунке 5 представлены спектры и осциллограммы полученных результатов модулирования ФМ сигнала на 6 канале ($F_{нес} = 156,3\text{MHz}$, $F_{упр} = 0,001\text{MHz}$).

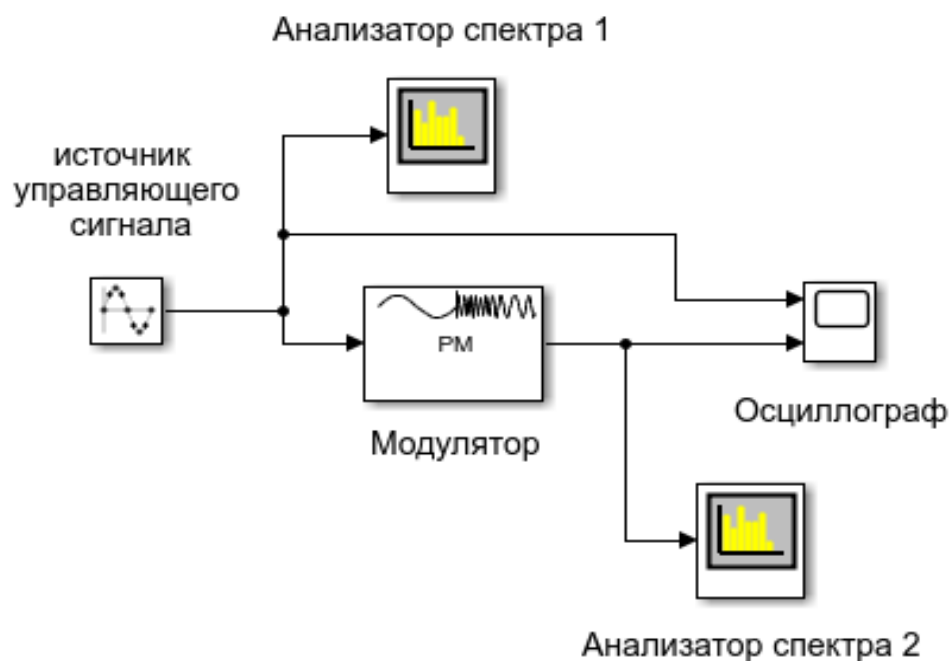


Рисунок 4 – Схема формирования однотонового ФМ сигнала

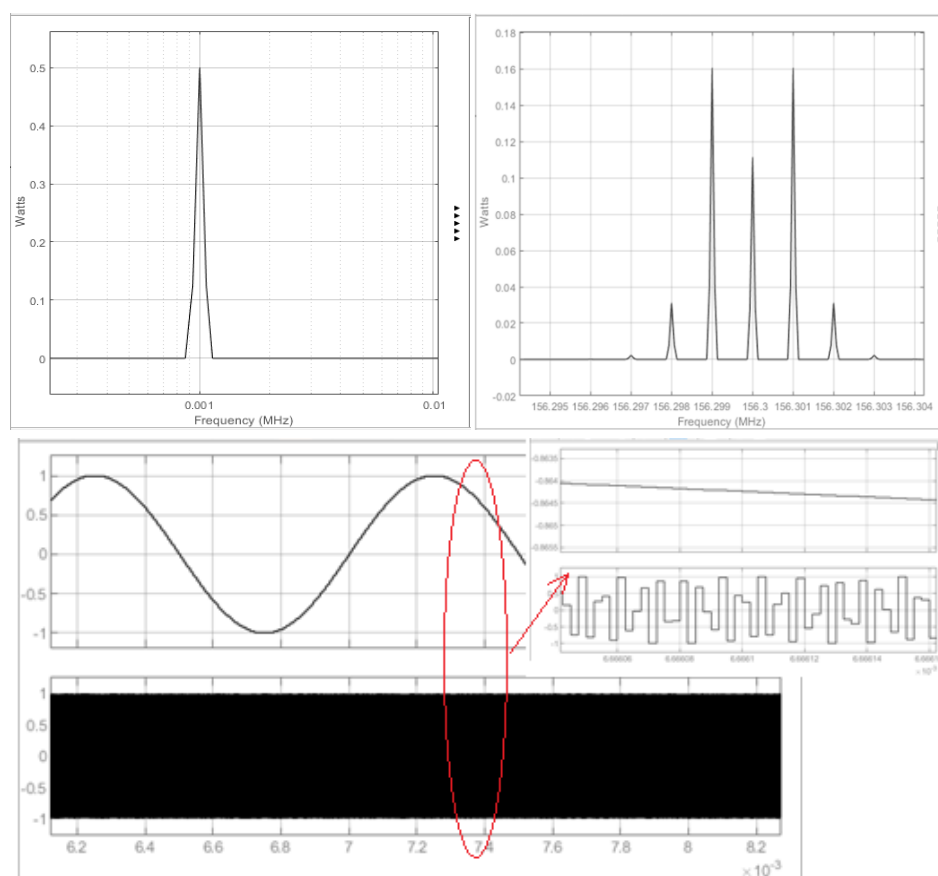


Рисунок 5 – Спектры и осциллограммы управляющего и ФМ сигналов

Параметры полученных осциллограмм и спектров ФМ сигнала соответствуют параметрам радиосигналов в реальных судовых системах связи. Также следует акцентировать внимание на осциллограмму ФМ сигнала: «сплошная черная заливка»

объясняется тем, что на одном периоде управляющего сигнала ($T_{упр} = 1\text{мс}$) располагаются 156300 периодов несущего колебания ($T_{нес} = 6,4\text{нс}$). В правом верхнем углу приведены осциллограммы управляющего и ФМ сигналов в режиме увеличения.

Рассмотренные программные модели процессов формирования ЧМ и ФМ сигналов в судовых системах связи в Matlab Simulink являются базовыми для разработки методического обеспечения лабораторных работ. В дальнейшем разработку планируется внедрить в учебный процесс на специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Список литературы:

1. Российский морской регистр судоходства. Правила по оборудованию морских судов. Часть IV. Радиооборудование. – 2018г. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293741/4293741687.pdf?ysclid=minbn36hns972949968> (дата обращения: 05.02.2026)
2. Российское классификационное общество. Правила по оборудованию морских судов. Часть IV. Радиооборудование. – 2020г. – URL: https://rfclass.ru/uploads/pravila_po_oborudovaniyu_morski_kh_sudov-4.pdf (дата обращения: 05.02.2026)
3. Классификация излучений. Классификация излучений радиопередающих устройств. – 2013г. – URL: <https://hard-wired.ru/spravochn/45369-waveclass.pdf?ysclid=mif3polnof533351126> (дата обращения: 15.02.2026)
4. Бочаров М.И. ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». Формирование радиосигналов. Часть 1. Аналоговые виды модуляции. Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия. – 2010 г. – URL: https://cchgeu.ru/upload/iblock/e2d/8ya6p44vjtr0klchr8j2pyoi8dfuttf/UP_RPDU_AVM.CH.1..pdf?ysclid=mif1b0987e299948779 (дата обращения: 15.02.2026)
5. Березовский П.П. Министерство образования и науки Российской Федерации. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Основы радиотехники и связи. Учебное пособие. – 2017г. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/48972/1/978-5-7996-2093-6_2017.pdf?ysclid=mif1fw3but463578196 (дата обращения: 15.02.2026)

