



УДК 519.876.5

**Мельников Михаил Алексеевич** – студент,  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Гордяскина Татьяна Вячеславовна** – доцент, к.ф.-м.н., доцент кафедры  
радиоэлектроники  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ АНАЛОГОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (АМПЛИТУДНЫХ МОДУЛЯТОРОВ) В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATHCAD**

*Аннотация. В работе рассматривается методика исследования процесса амплитудной модуляции радиотехнических сигналов с помощью нелинейных аналоговых радиотехнических цепей в программном пакете Mathcad. Учитывается влияние параметров вольт-амперной характеристики нелинейного элемента и номинальных значений  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов на формируемый высокочастотный сигнал.*

*Ключевые слова: нелинейные аналоговые цепи, амплитудный модулятор, полосовой фильтр, радиотехнические сигналы, компьютерное моделирование, программный пакет Mathcad.*

Студенты специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного оборудования» должны обладать определённым набором профессиональных компетенций, в которые входят:

- способность генерирования идей, решения задач по созданию теоретических моделей, позволяющих исследовать свойства объектов профессиональной деятельности;
- способность осуществлять передачу и получение информации с использованием подсистемы и оборудования ГМССБ (Глобальная морская система связи при бедствии), а также выполнять функциональные требования ГМССБ.

Выпускники специальности 25.05.03 должны уметь эксплуатировать оборудование ГМССБ – объект профессиональной деятельности, а для этого необходимо обладать знаниями базовых физических принципов функционирования входящих его состав радиотехнических систем.

Упрощенная структура канала связи (например, ГМССБ) включает передающее и приемное устройства, физически разнесенные на некоторое расстояние, и среда распространения передаваемого сигнала (Рис. 1). Передающее устройство принимает сообщение от источника информации, преобразует его в электрический сигнал, который модулируется и усиливается аппаратурой. Затем модулированный сигнал транслируется через среду распространения и принимается приемником, передаваемая информация доставляется получателю. [1]



Рис.1. Структурная схема радиотехнического канала связи.

Методика освоения профессиональных компетенций студентами начинается на младших курсах ВУЗа, что позволяет привить будущим специалистам навыки генерирования упрощенных математических моделей (ММ) сложных объектов профессиональной деятельности. [2, 3] Рассмотрим элементы методики обучения на примере генерации упрощенной ММ физических процессов преобразования сигналов в радиотехническом канале связи. Наиболее сложным для изучения является процесс нелинейных преобразований сигналов в приеме-передающей аппаратуре, поэтому остановимся подробнее на одном из основных процессов – процессе амплитудной модуляции в передающем устройстве (см. Рис. 1). [4]

**1) Теоретические исследования процесса амплитудной модуляции в аналоговых радиотехнических цепях.**

Процесс модуляции, то есть воздействия управляющего низкочастотного сигнала на амплитуду несущего высокочастотного колебания, проводится в амплитудном модуляторе (АМ), в состав которого входят: нелинейный элемент (диод или транзистор) и частотно избирательная система (R, L, C - колебательный контур или полосовой фильтр). Структурная схема аналогового АМ приведена на рисунке 2.

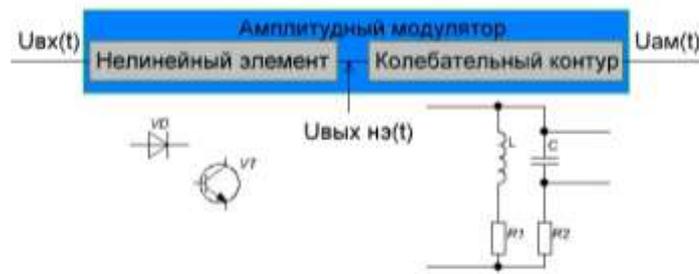


Рис.2. Структурная схема аналогового амплитудного модулятора.

На вход нелинейного элемента АМ подается полигармонический сигнал – сумма несущего гармонического колебания и управляющего гармонического воздействия, в котором содержится информация сообщения. На рисунке 3 приведена ММ сигнала на входе нелинейного элемента АМ.

$$U(t) = U_{M \text{ упр}} \cdot \cos(\Omega_{\text{упр}} \cdot t) + U_{M \text{ нес}} \cdot \cos(\omega_{\text{нес}} \cdot t)$$

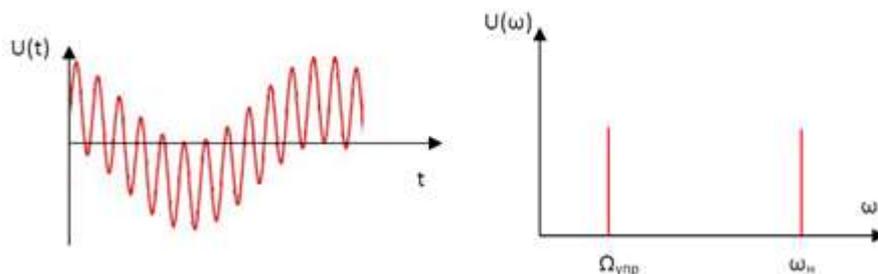
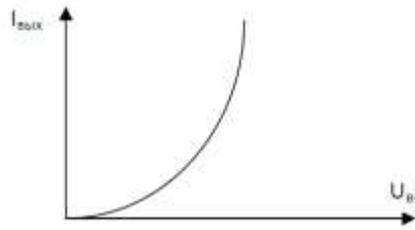


Рис. 3. Математическая модель входного сигнала.

Для расчета ММ сигнала на выходе нелинейного элемента, рассмотрим его вольт-амперную характеристику (ВАХ), которую можно аппроксимировать в виде полиномиальной зависимости. Пример аппроксимации ВАХ диода полиномом второго порядка приведен на рисунке 4.



$$S(t) = a_0 + a_1 \cdot U_{\text{вх}} + a_2 \cdot U_{\text{вх}}^2 + \dots$$

Рис. 4. Представление ВАХ нелинейного элемента (диода).

Проходя через нелинейный элемент, в спектре сигнала появляются дополнительные гармоники на комбинационных частотах.

$$U_{\text{вх}} = U_{M_y} \cos(\Omega_{\text{упр}} t) + U_{M_H} \cos(\omega_H t) \quad (1)$$

$$U_{\text{нэ}} = a_0 + a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + \dots \quad (2)$$

$$U_{\text{нэ}} = a_0 + a_1 U_{M_y} \cos(\Omega_y t) + a_1 U_{M_H} \cos(\omega_H t) + \frac{a_2}{2} U_{M_y}^2 + \frac{a_2}{2} U_{M_y}^2 \cos(2\Omega_y t) + a_2 U_{M_y} U_{M_H} [\cos(\omega_H + \Omega_y)t + \cos(\omega_H - \Omega_y)t] + \frac{a_2}{2} U_{M_H}^2 + \frac{a_2}{2} U_{M_H}^2 \cos(2\omega_H t) \quad (3)$$

Это связано с нелинейностью вольтамперной характеристики нелинейного элемента. В том числе появляется комбинация гармоник, образующая амплитудно-модулированный сигнал (Рис. 5).

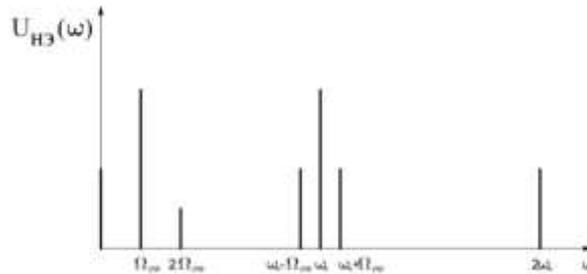


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе нелинейного элемента.

Выход нелинейного элемента нагружен на колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту несущего колебания, который из полученного спектра выделяет спектр амплитудно-модулированного сигнала. Характеристика колебательного контура описывается амплитудно-частотной характеристикой цепи. Рис. 6.

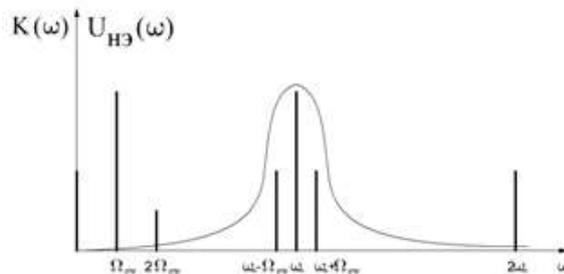


Рис. 6. АЧХ контура и спектр сигнала на выходе НЭ.

ММ однотонового амплитудно-модулированного сигнала на выходе колебательного контура АМ представлена на рисунке 7.

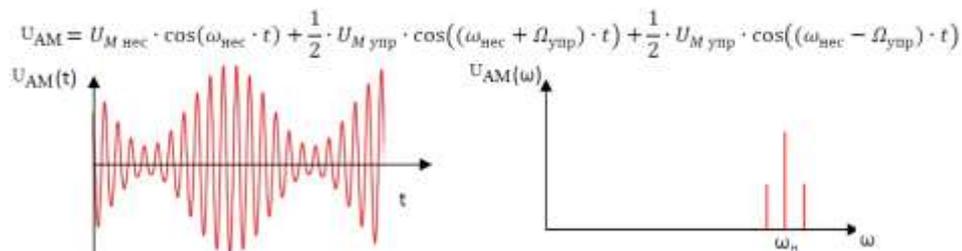


Рис. 7. Математическая модель амплитудно-модулированного сигнала на выходе АМ.

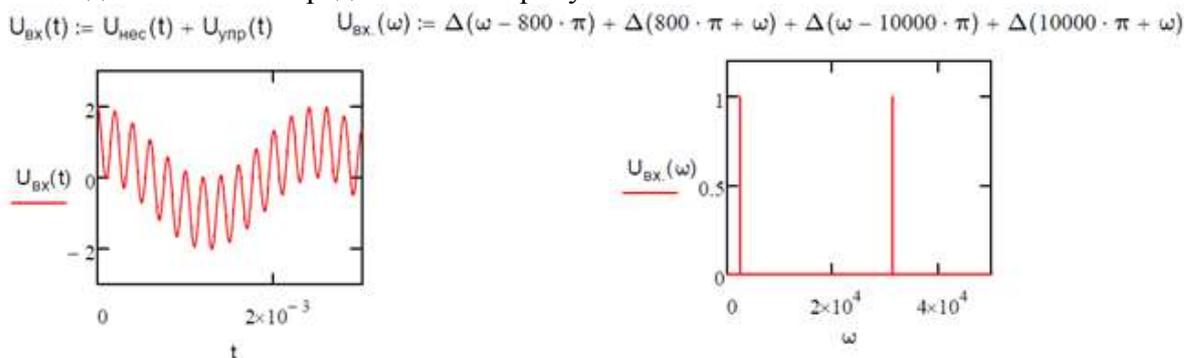
В результате проведенного теоретического исследования на выходе амплитудного модулятора сформирован высокочастотный информационный сигнал – радиосигнал, который после усиления будет направлен в антенно-фидерное устройство передатчика и излучен в среду распространения.

Для более детального и наглядного исследования процесса нелинейных преобразований сигнала в модуляторе, изучения влияния параметров радиотехнической цепи (ВАХ диода; номинальных значений R, L, C элементов контура) на формируемый амплитудно-модулированный сигнал необходимо провести компьютерное моделирование.

В качестве программной среды выбран пакет Mathcad, позволяющий исследовать радиотехнические цепи и сигналы, задавая параметры соответствующей ММ.

**2) Компьютерное моделирование процесса амплитудной модуляции в аналоговых радиотехнических цепях в программном пакете Mathcad.**

Рассмотрим ММ несущего колебания и управляющего сигнала в программном пакете Mathcad. Параметры сигналов и цепей выбраны в соответствии с параметрами лабораторного стенда по исследованию нелинейных преобразований сигналов в аналоговых радиотехнических цепях, разрабатываемого на кафедре радиоэлектроники: частоты сигналов несущего –  $f_n=5\text{кГц}$ , – управляющего  $f_y=400\text{Гц}$ , амплитуды несущего –  $U_{M_n} = 1\text{ В}$ , управляющего –  $U_{M_{упр}} = 1\text{ В}$ . На вход нелинейного элемента АМ подается полигармонический сигнал – сумма несущего колебания и управляющего воздействия. ММ входного сигнала представлена на рисунке 8.



*Рис. 8. Математическая модель входного сигнала в программном пакете Mathcad.*

Для построения частотного представления используется встроенная функция прямого преобразования Фурье.

Моделирование нелинейного элемента проводится с полиномиальной аппроксимацией вольтамперной характеристики элемента (полином второго порядка). Коэффициенты в формуле аппроксимации играют роль проводимостей. Модель ВАХ диода приведена на рисунке 9.

Примем коэффициенты равными:

$$a_0 := 0$$

$$a_1 := 1$$

$$a_2 := 0.5$$

$$i_{\text{вых}}(t) := a_0 + a_1 \cdot U_{\text{вх}}(t) + a_2 \cdot U_{\text{вх}}(t)^2$$

*Рис. 9. Модель аппроксимации нелинейного элемента полиномиальной зависимостью в программном пакете Mathcad.*

При прохождении сигнала через нелинейный элемент на выходе получим сигнал, осциллограмма и спектр которого приведены на рисунке 10.

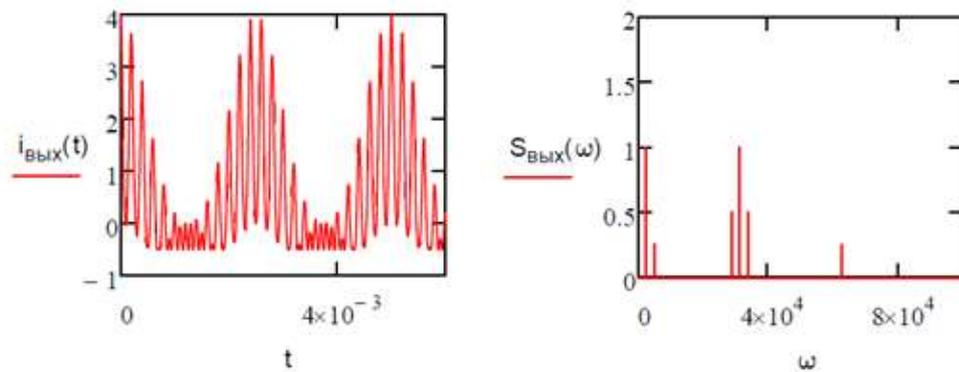


Рис. 10. Осциллограмма и спектр сигнала на выходе нелинейного элемента.

Выход нелинейного элемента в АМ нагружен на частотно-избирательную систему, частота резонанса которой настроена на частоту несущего колебания, ширина полосы пропускания  $\Pi_{0,7} \geq 2\Omega$ . Проведем моделирование частотно-избирательной системы – колебательного контура, по заранее рассчитанным параметрам, определяющим резонансную частоту контура и его добротность, достаточные для прохождения амплитудно-модулированного сигнала. Для этого рассчитаем зависимость модуля коэффициента передачи от частоты. Пример расчета приведен на рисунке 11.

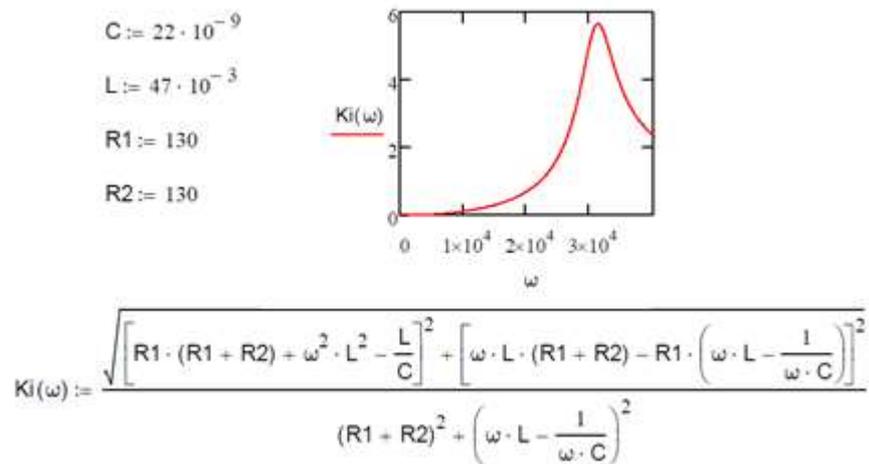


Рис. 11. Расчет АЧХ колебательного контура в программном пакете Mathcad.

Для получения аналитического представления и осциллограммы выходного сигнала аналогового АМ в программном пакете Mathcad, используется встроенная функция обратного преобразования Фурье. Математическая модель выходного сигнала представлена на рисунке 12.

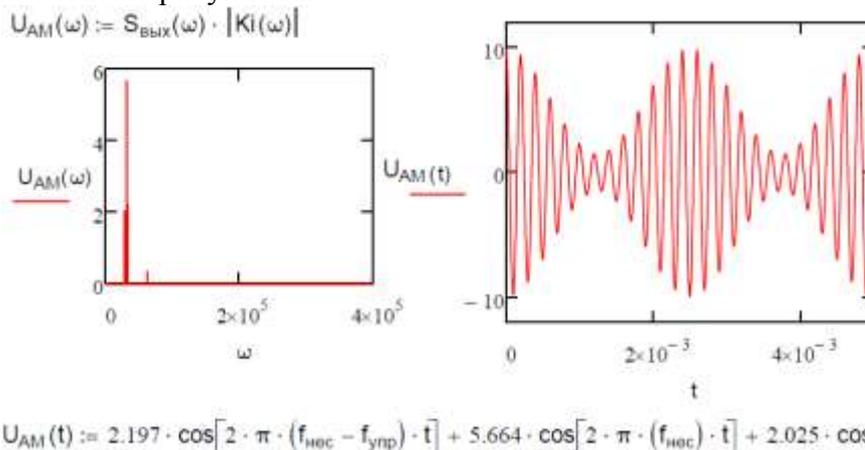


Рис.12. ММ выходного амплитудно-модулированного сигнала в программном пакете Mathcad.

Анализируя полученные результаты можно сказать, что полученный в результате моделирования сигнал является неидеальной моделью, так как в модели использовался

упрощенный вид аппроксимации вольтамперной характеристики нелинейного элемента, а так же в процессе вычислений вводились некоторые округления. Но, модель является достаточно точной для учебно-демонстрационной деятельности.

В продолжение развития данного направления моделирования в качестве нелинейного элемента, модель которого описывается, можно применить транзистор, получив схему модулятора с коэффициентом усиления больше единицы. По результатам дальнейшего моделирования планируется собрать учебный стенд для проведения лабораторных работ по изучению процесса амплитудной модуляции аналоговых сигналов.

#### **Список литературы:**

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник. – М. : Высш. Школа, 2000. – 462 с.
2. Плющаев В.И. Система контроля и передачи судовых технологических параметров береговым службам. - Автоматизация и современные технологии, Москва, №2, 2012. С. 37-39.
3. Мерзляков В.И., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И. Организация канала передачи данных волномерного буя на базе автоматической идентификационной системы. - Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 43. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – с.56-61.
4. Мартынов Н.С., Гордяскина Т.В. Исследование нелинейных аналоговых радиотехнических цепей (амплитудных модуляторов) в программном пакете Multisim. // Великие реки 2019: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2019. – Режим доступа: <http://вф-река-море.рф/> (0,3 печ.л.).

### **RESEARCH OF NONLINEAR ANALOG RADIO CIRCUITS (AMPLITUDE MODULATOR) IN THE SOFTWARE PACKAGE MATHCAD**

Mikhail A. Melnickow, Tatyana V. Gordyaskina.

*Annotation. The paper discusses the method of researching the process of amplitude modulation of radio signals using nonlinear analog radio technical circuits in the software package MathCAD. The influence of the parameters of the current-voltage characteristics of the nonlinear element and the nominal values of R, L, C elements on the generated high-frequency signal is taken into account.*

*Keywords: nonlinear analog circuits, amplitude modulator, pass – band filter, radio technical signal, computer simulation, software package MathCAD.*