



УДК 519.876.5

**Волостнов Алексей Львович**, 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 ДЕТЕКТОРОВ) В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATHCAD

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

*Ключевые слова:* нелинейные аналоговые цепи, амплитудный детектор, фильтр низкой частоты, радиотехнические сигналы, математические модели, программный пакет Mathcad, компьютерное моделирование.

Студенты и выпускники специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» должны уметь эксплуатировать оборудование Глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ) – одного из объектов профессиональной деятельности, а для этого необходимо знать его структуру и принципы работы входящих в его состав систем.

Оборудование ГМССБ состоит из нескольких элементов: система спутниковой связи, система спутниковой связи COSPAS-SARSAT, система наземной радиосвязи Морской подвижной службы в диапазонах ультракоротких волн, сантиметровых/промежуточных волн и коротких волн, система передачи навигационных и метеорологических извещений, предупреждений и другой срочной информации в режиме узкополосной буквопечатающей связи (NAVITEX). [1, 2]

Упрощенная структура системы связи ГМССБ представляет собой радиотехнический канал связи (Рис. 1). [3]

Изучение основ физических процессов преобразования сигналов в приемо-передающей аппаратуре канала связи начинается с разработки простейших математических моделей (ММ) сигналов и цепей.



Рис.1. Структура радиотехнического канала связи

Рассмотрим пример исследования процесса преобразования сигналов в аналоговом приемном устройстве, упрощенная структура которого приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структура приемного устройства.

Принятый радиосигнал проходит частотную селекцию во входном устройстве и после усиления поступает на вход детектора для выделения низкочастотного передаваемого сообщения из принятого высокочастотного модулированного сигнала. Низкочастотное сообщение (управляющий сигнал) с выхода детектора усиливается в усилителе низкой частоты до уровня, достаточного для восприятия регистрирующим устройством.

В качестве примера исследования ММ аналоговых радиотехнических цепей рассмотрим модель нелинейной цепи – амплитудного детектора – одной из основных цепей приемной аппаратуры связи. [4]

Методика исследования ММ радиотехнических цепей и сигналов содержит:

1) Теоретическое изучение

Упрощенная схема амплитудного детектора (АД) приведена на рис.3.



Рис. 3. Схема амплитудного детектора, где НЭ – нелинейный элемент (диод), ФНЧ – фильтр низких частот (R, C - цепь).

Технические характеристики: вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра низкой частоты приведены на рис. 4.

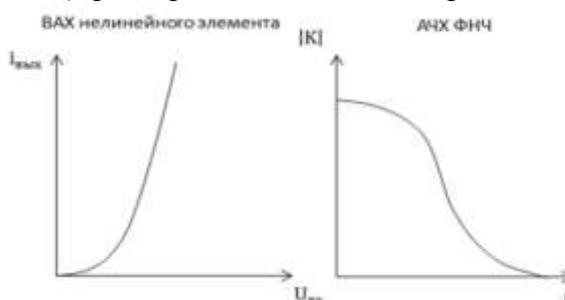


Рис. 4. ВАХ нелинейного элемента и АЧХ ФНЧ.

На вход АД поступает амплитудно-модулированный сигнал, ММ которого приведена в (1) и рис. 5.

$$U_{вх} = U_{АМ} = U_{mн} \cos \omega_n t + \frac{U_{mу}}{2} \cos(\omega_n + \omega_y) t + \frac{U_{mу}}{2} \cos(\omega_n - \omega_y) t \quad (1)$$

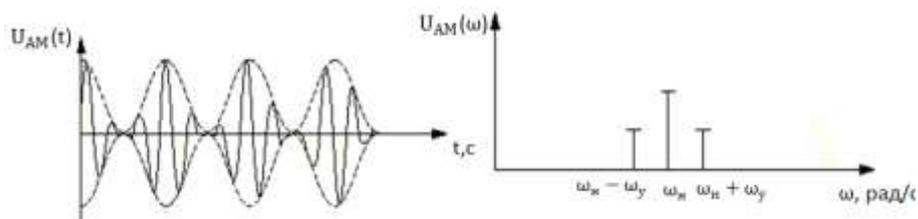


Рис. 5. Осциллограмма и спектр АМ – сигнала на входе детектора.

Однотональный АМ-сигнал проходит через нелинейный элемент (НЭ) - диод, ВАХ которого в ММ представлена полиномом второй степени:

$$I_{\text{ВЫХ}} = a_0 + a_1 U_{\text{ВХ}} + a_2 U_{\text{ВХ}}^2 \quad (2)$$

ММ сигнала на выходе диода:

$$\begin{aligned} i_{\text{вых}} = & a_0 + a_1(0.5U_{mH}M \cos((\omega_H + \omega_y)t) + 0.5U_{mH}M \cos((\omega_H - \omega_y)t) + U_{mH} \cos(\omega_H t)) + \\ & + a_2(0.125U_{mH}^2 M^2 \cos((2\omega_H + 2\omega_y)t) + 0.125U_{mH}^2 M^2 \cos((2\omega_H - 2\omega_y)t) + 0.5U_{mH}^2 \cos(2\omega_H t) + \\ & + 0.25U_{mH}^2 M^2 (\cos(2\omega_H t) + \cos(2\omega_y t)) + 0.5U_{mH}^2 M (\cos(\omega_y t) + \cos((2\omega_H + \omega_y)t)) + \\ & + 0.5U_{mH}^2 M (\cos(\omega_y t) + \cos((2\omega_H - \omega_y)t))). \end{aligned} \quad (3)$$

Осциллограмма и спектр полигармонического сигнала на выходе нелинейного элемента приведены на рис. 6.

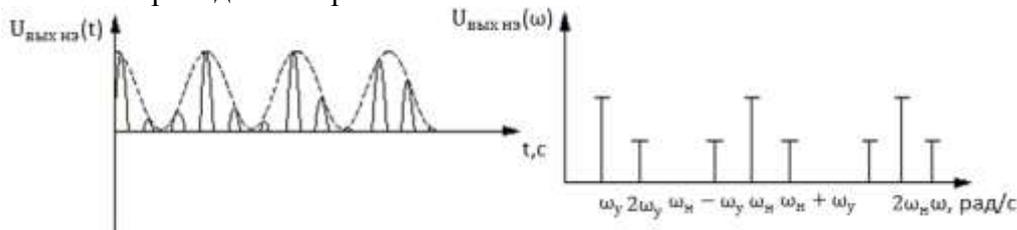


Рис. 6. Осциллограмма и спектр сигнала после НЭ амплитудного детектора.

Анализируя спектр сигнала на выходе диода следует отметить, что в сигнале появились гармонические составляющие, отсутствующие на входе, что подтверждает нелинейность преобразований сигнала в детекторе.

Полигармонический сигнал после прохождения диода необходимо отфильтровать с помощью ФНЧ и выделить полезный управляющий сигнал, расположенный на частоте  $\omega_y$ . Процесс корректной фильтрации низкочастотного передаваемого сообщения заключается в правильном выборе частоты среза  $R, C$  – цепи ( $f_{\text{нec}} \gg f_{\text{ср}} \geq f_{\text{упр}}$ ). Осциллограмма и спектр управляющего сигнала на выходе детектора представлены на рис. 7.

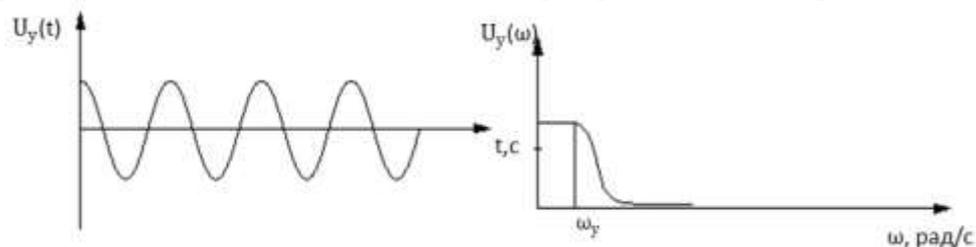


Рис. 7. Осциллограмма и спектр сигнала с АЧХ ФНЧ на выходе амплитудного детектора.

Проведенное теоретическое исследование процесса преобразования радиосигнала (на примере ММ однотонального АМ – сигнала) в нелинейной аналоговой радиотехнической цепи – амплитудном детекторе достаточно подробно демонстрирует физические процессы в приемной аппаратуре канала связи.

## 2) Компьютерное моделирование в программном пакете Mathcad.

С целью визуализации влияния параметров радиотехнических цепей на характеристики преобразуемого сигнала студентам предлагается провести компьютерное моделирование исследуемых процессов в программном пакете Mathcad. В Mathcad имеется возможность варьировать все технические характеристики и параметры ММ

цепей и сигналов, постепенно переходя от исследования простейших моделей к ММ, описывающим «реальные» нелинейные цепи (диоды и транзисторы) и сложные негармонические управляющие сигналы.

Проведем компьютерное моделирование процесса преобразования однотонового АМ-сигнала в амплитудном детекторе, используя параметры разрабатываемого на кафедре радиоэлектроники лабораторного стенда по исследованию нелинейных преобразований сигналов в аналоговых радиотехнических цепях. Передаваемый сигнал имеет параметры:  $f_{\text{нес}} = 5000$  Гц,  $f_{\text{упр}} = 400$  Гц.

Модель сигнала на входе детектора в пакете Mathcad представлена на рис. 8.

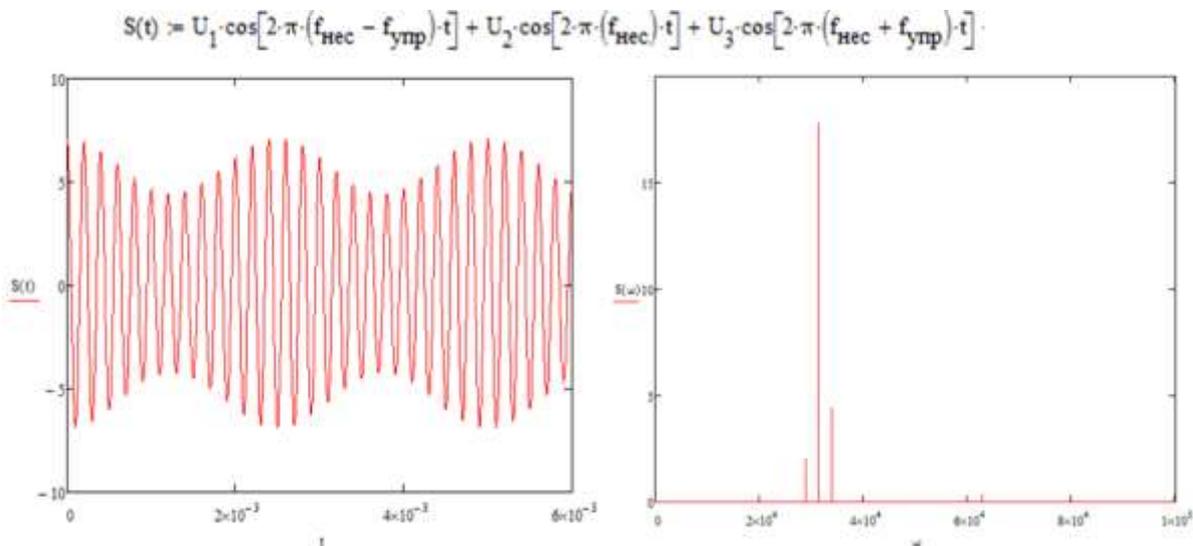


Рис. 8. ММ сигнала на входе амплитудного детектора в Mathcad.

Следует отметить, что при моделировании спектра использована специальная функция программы Mathcad – «fourier» (Рис. 9.):

$$S(t) \text{ fourier} \rightarrow 2.1968214948757347179 \cdot \Delta(\omega - 33929.200658769766975) + 2.1968214948757347179 \cdot \Delta(\omega + 33929.200658769766975) +$$

$$\Delta(a) := \begin{cases} 1 & \text{if } a = 0 \\ 0 & \text{if } a \neq 0 \end{cases}$$

$$S(\omega) := 2.1968214948757347179 \cdot \Delta(\omega - 33929) + 2.1968214948757347179 \cdot \Delta(\omega + 33929) + 2.0249449607978371298 \cdot \Delta(\omega - 28902) +$$

$$+ 0.32920749416967443346 \cdot \Delta(\omega - 62831) + 17.794609108463306861 \cdot \Delta(\omega - 31415)$$

Рис. 9. Формирование спектрального представления входного сигнала в Mathcad.

Рассмотренная выше ММ сигнала воздействует на нелинейный элемент детектора – диод, ВАХ которого представлена полиномом второго порядка на рис. 10.

$$a_0 := 0$$

$$a_1 := 1$$

$$a_2 := 0.5$$

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

Рис. 10. Выбор параметров ВАХ диода в Mathcad.

Модель сигнала на выходе нелинейного элемента (диода) в Mathcad приведена на рис. 11.

В данной модели при построении спектра воспользовались встроенной функцией «fourier», преобразующей сигнал из временной области в область частот. Однако полученное в Mathcad выражение имеет мнимые значения, которые не имеют физического смысла, а обусловлены комплексной формой представления, поэтому перейдем к уравнению «реального» сигнала (удваивая амплитуды комплексно сопряженных гармонических составляющих, расположенных на «реальных» частотах) (Рис. 12).

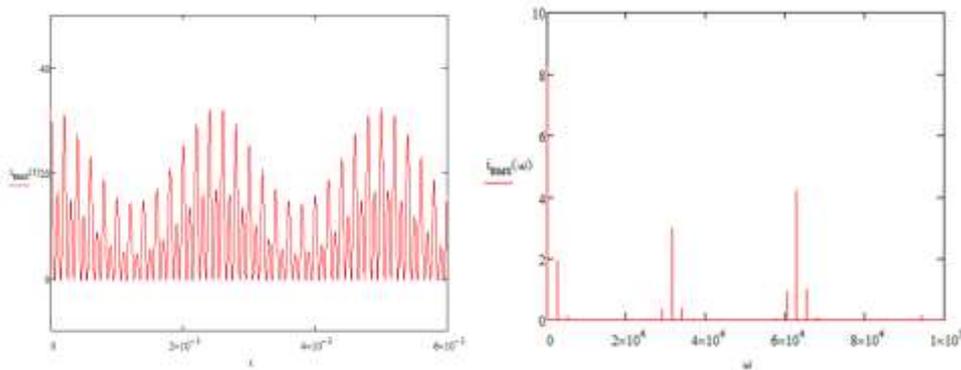


Рис. 11. Осциллограмма и спектр сигнала после НЭ амплитудного детектора.

$$i_{\text{ввых}}(t) \text{ fourier} \rightarrow 0.38404284168043875404 \cdot \Delta(\omega - 67858.40131753953395) + 2.3029184860967373943 \cdot \Delta(\omega - 33929.200658769766975) +$$

$$i_{\text{ввых}}(\omega) := (0.38404284168043875404 \cdot \Delta(\omega - 67858) + 2.3029184860967373943 \cdot \Delta(\omega - 33929) + 51.834046228062755912 \cdot \Delta(\omega) +$$

Рис. 12. Формирование спектрального представления сигнала на выходе диода в Mathcad.

Проведенное моделирование показывает, что после прохождения сигнала через нелинейный элемент детектора спектр «окрашивается», то есть появляется несколько новых гармонических составляющих, в том числе на нулевой частоте и на частоте, в 2 раза превышающей частоту входного сигнала (подтверждаются свойства нелинейного преобразования сигналов).

В соответствии с теоретическим исследованием из полученного полигармонического сигнала нужно выделить «полезное» передаваемое сообщение – управляющий сигнал.

Влияние RC – цепи (ФНЧ) на сигнал можно рассмотреть в частотной области с помощью моделирования АЧХ, задавая параметры фильтра в Mathcad (рис. 13):

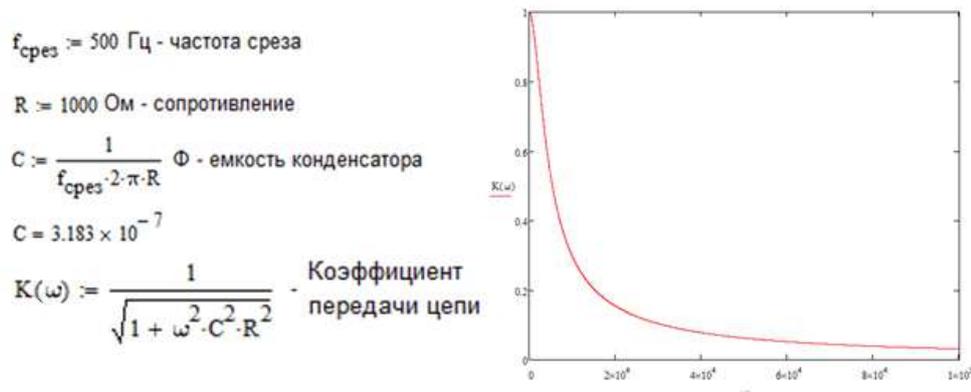


Рис. 13. Выбор параметров RC-цепи и АЧХ ФНЧ в Mathcad.

Определим спектр сигнала на выходе ФНЧ детектора в соответствии с выражением:

$$S(\omega) = i_{\text{ввых}}(\omega) \cdot K(\omega). \quad (4)$$

Осциллограмма и спектр сигнала на выходе амплитудного детектора представлены на рис. 14.

По полученному спектру  $S(\omega)$  восстанавливается осциллограмма  $S(t)$  сигнала с помощью встроенной функции обратного преобразования Фурье:

$$S(\omega) \text{ invfourier} \rightarrow \text{invfourier}(i_{\text{ввых}}(\omega) \cdot K(\omega)) \quad (5)$$

Итак, после прохождения сигнала по каналу связи и преобразования его в амплитудном детекторе видно, что гармоники, порожденные нелинейным элементом, подавляются фильтром низкой частоты, в регистрирующее устройство будет передан полезный управляющий сигнал, несущий информацию.

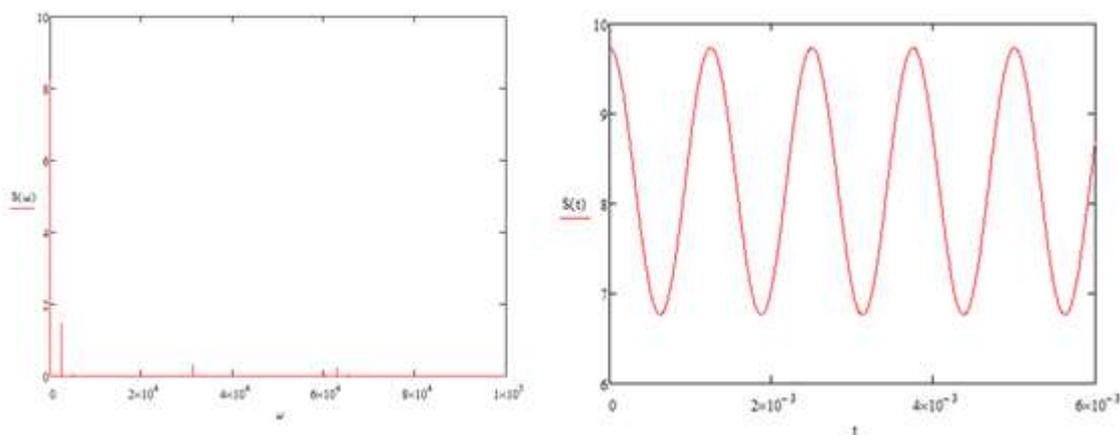


Рис.14. ММ сигнала на выходе амплитудного детектора в Mathcad.

Предложенная методика теоретического изучения и компьютерного моделирования процессов преобразования радиосигналов в аналоговых нелинейных радиотехнических цепях позволит студентам приобрести профессиональные компетенции и в дальнейшей профессиональной деятельности эффективно проводить техническую диагностику оборудования радиотехнического канала связи.

#### Список литературы:

1. Плющев В.И. Система контроля и передачи судовых технологических параметров береговым службам. - Автоматизация и современные технологии, Москва, №2, 2012. С. 37-39.
2. Мерзляков В.И., Перевезенцев С.В., Плющев 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.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник. – М. : Высш. Школа, 2000. – 462 с.
4. Панков Е.А., Гордяскина Т.В., Исследование нелинейных аналоговых радиотехнических цепей (амплитудных детекторов) в программном пакете Multisim. // Великие реки 2019: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2019. – Режим доступа: <http://vf-река-море.pf/> (0,3 печ.л.).

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

Aleksey L. Volostnov., Tatyana V. Gordyaskina.

*Annotation. The paper discusses the method of researching the process of amplitude detection 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, C elements on the generated low-frequency signal is taken into account.*

*Keywords: nonlinear analog circuits, amplitude detector, lowpass filter, radio technical signal. mathematical models, Mathcad software package, computer simulation.*