



УДК 519.876.5

**Панков Евгений Андреевич** – студент ФГБОУ ВО ВГУВТ, 603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а

**Гордяскина Татьяна Вячеславовна** – доцент кафедры радиоэлектроники ФГБОУ ВО ВГУВТ, 603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ АНАЛОГОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (АМПЛИТУДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ) В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MULTISIM.

*Ключевые слова:* детектор, фильтр низкой частоты, нелинейный элемент, модулированный сигнал, управляющий сигнал.

*Аннотация.* В работе рассматривается методика детектирования сигнала с помощью нелинейных аналоговых радиотехнических цепей на примере амплитудного детектора в программном пакете Multisim.

В соответствии с ФГОС 3+ специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» выпускники должны быть способны генерировать идеи и решать задачи по созданию теоретических моделей, позволяющих исследовать свойства объектов профессиональной деятельности. Одним из таких объектов является оборудование ГМССБ (Глобальной морской системы связи при бедствии). Студенты должны уметь осуществлять передачу и получение информации с использованием подсистемы и оборудования ГМССБ, а также выполнять функциональные требования ГМССБ. Поскольку в состав упомянутого выше оборудования входят нелинейные радиотехнические системы, изучение их моделей, структуры, основ и принципов их функционирования является важной и актуальной задачей. В данной работе рассматривается одна из наиболее исследуемых в радиотехнике нелинейных систем, а именно аналоговый амплитудный детектор. На его основе проводится изучение нелинейных характеристик полупроводниковых элементов, а также изучение принципов нелинейных преобразований спектров сигналов. [1]

Амплитудная модуляция является самым простейшим видом модуляции, и в чистом виде в настоящее время встречается крайне редко в силу своих функциональных особенностей, таких как подверженность шумам и невыгодность в энергетическом плане. Тем не менее, амплитудную модуляцию удобно использовать в качестве примера, поскольку её законы и принципы просты для понимания. АМ-сигнал представляет собой информационный низкочастотный сигнал, перенесённый с помощью использования нелинейного элемента и высокочастотного (несущего) сигнала в область высоких частот. Спектр однотонального амплитудно-модулированного сигнала в таком случае представляет собой три гармоники: несущую и две боковых, расположенных

симметрично относительно несущей и отстоящей от неё на частоту управляющего сигнала. АМ-сигнал и его спектр представлены на рисунке 1. Задача амплитудного детектора, схемы которого представлены на рисунках 2 и 3, заключается в выделении из АМ-сигнала его огибающей – информационного низкочастотного сигнала. Это достигается путём использования нелинейного (квадратичного) участка вольт-амперной характеристики нелинейного элемента, такого как диод или транзистор. [1]

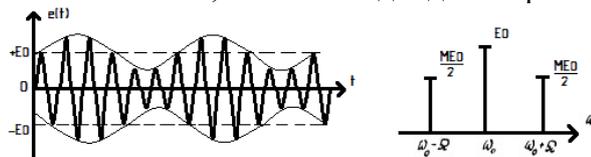


Рис. 1. Осциллограмма и спектр АМ-сигнала

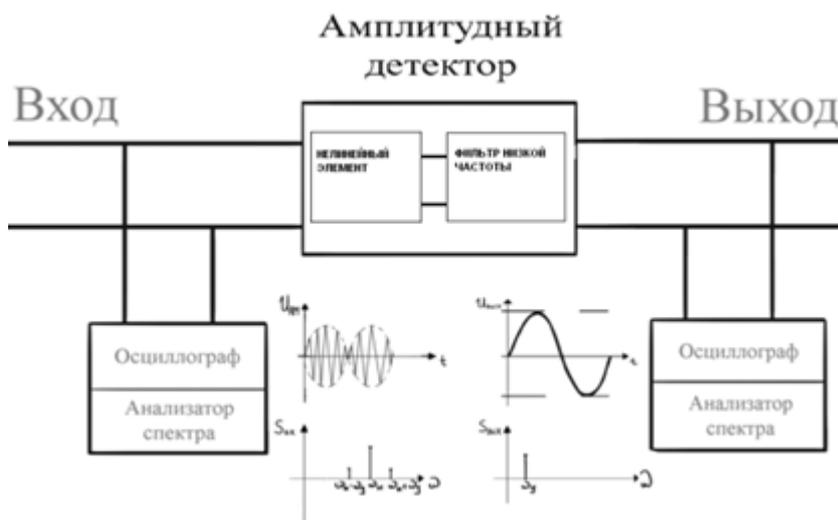


Рис. 2. Структурная схема амплитудного детектора

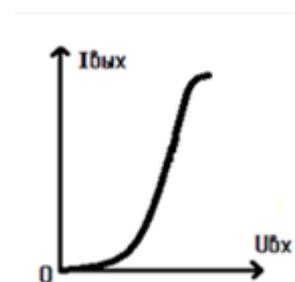


Рис. 3. ВАХ нелинейного элемента

Спектр сигнала, проходя через полупроводниковый элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), обогащается (появляются дополнительные комбинационные частоты). Нелинейность ВАХ элемента можно рассмотреть в виде аппроксимации степенным полиномом:

$$i_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + \dots + a_n U_n^2 \quad (1)$$

Входной АМ-сигнал можно представить в следующем виде:

$$U_{\text{АМ}} = 0.5 U_{\text{мн}} M \cos((\omega_H + \omega_y)t) + 0.5 U_{\text{мн}} M \cos((\omega_H - \omega_y)t) + U_{\text{мн}} \cos(\omega_H t). \quad (2)$$

В рассмотрении аппроксимации ВАХ для нашего случая ограничимся полиномом второй степени.

Согласно преобразованиям, приведённым в (1), для полинома второй степени ток на выходе будет определяться как:

$$i_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_{\text{АМ}} + a_2 U_{\text{АМ}}^2. \quad (3)$$

После проведения тригонометрических преобразований, выражение для выходного сигнала:

$$\begin{aligned} i_{\text{вых}} = & a_0 + a_1 (0.5 U_{\text{мн}} M \cos((\omega_H + \omega_y)t) + 0.5 U_{\text{мн}} M \cos((\omega_H - \omega_y)t) + U_{\text{мн}} \cos(\omega_H t)) + \\ & + a_2 (0.125 U_{\text{мн}}^2 M^2 \cos((2\omega_H + 2\omega_y)t) + 0.125 U_{\text{мн}}^2 M^2 \cos((2\omega_H - 2\omega_y)t) + 0.5 U_{\text{мн}}^2 \cos(2\omega_H t) + \\ & + 0.25 U_{\text{мн}}^2 M^2 (\cos(2\omega_H t) + \cos(2\omega_y t)) + 0.5 U_{\text{мн}}^2 M (\cos(\omega_y t) + \cos((2\omega_H + \omega_y)t)) + \\ & + 0.5 U_{\text{мн}}^2 M (\cos(\omega_y t) + \cos((2\omega_H - \omega_y)t))). \end{aligned} \quad (4)$$

Спектр данного сигнала содержит набор гармонических составляющих на различных частотах, в число которых входит как входной АМ-сигнал, несущая и

управляющая частоты, так и комбинационные частоты. Поскольку стоит задача детектирования, т.е. выделения информационного сигнала, необходимо использовать фильтр низкой частоты (ФНЧ), т.е. RC-цепь, с частотой среза больше частоты управляющего сигнала и меньше частоты несущего колебания. Частота среза RC-цепи находится по формуле:  $f = \frac{1}{2\pi RC}$ . Спектры сигналов входного, после прохождения диода и после прохождения ФНЧ представлены на рисунке 4. [1]

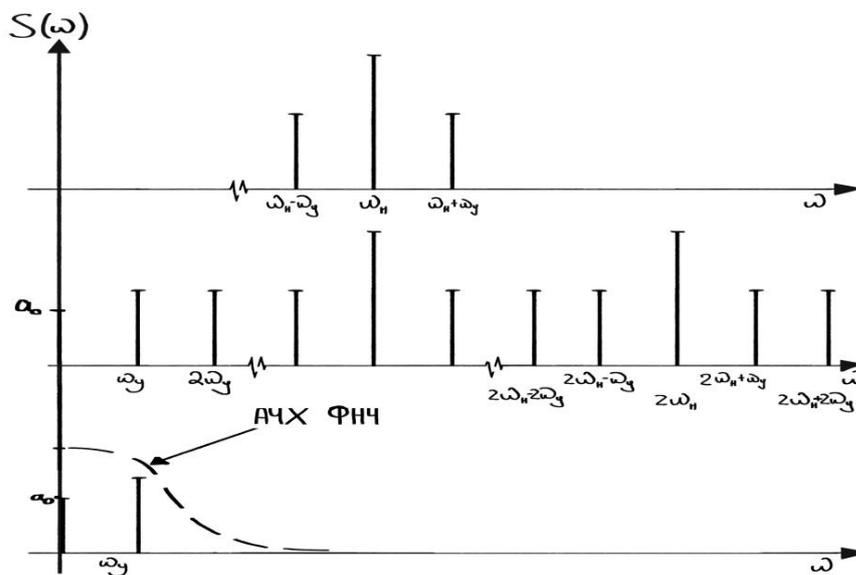


Рис. 4. Преобразование спектров сигналов в детекторе

Анализируя спектры сигнала, преобразованного детектором, можно отметить, что из входного радиосигнала – АМ-колебания, – на выходе получен низкочастотный управляющий информационный сигнал. [1]

Для иллюстрации теоретических расчётов выполним компьютерное моделирование амплитудного детектора на диоде в программном пакете Multisim. Схема амплитудного детектора представлена на рисунке 5. Она состоит из генератора АМ-сигналов с параметрами: частота несущей равна 140 кГц, частота управляющей равна 1 кГц, амплитуда сигнала равна 5 В; диода 1N3208, резисторов R1 и R2 и конденсаторов C1 и C2, вместе с ключами образующих RC-цепь с изменяемыми параметрами, резистора R3, играющего роль нагрузки и служащего для проверки спектра сигнала после нелинейных преобразований в диоде. На рисунке 6 и 7 представлены осциллограмма входного АМ-сигнала и его спектр. [2, 3]

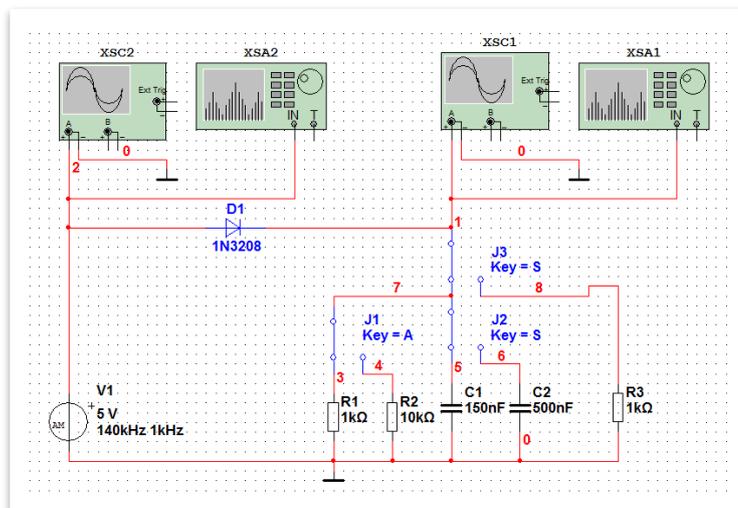


Рис. 5. Схема амплитудного детектора на диоде.

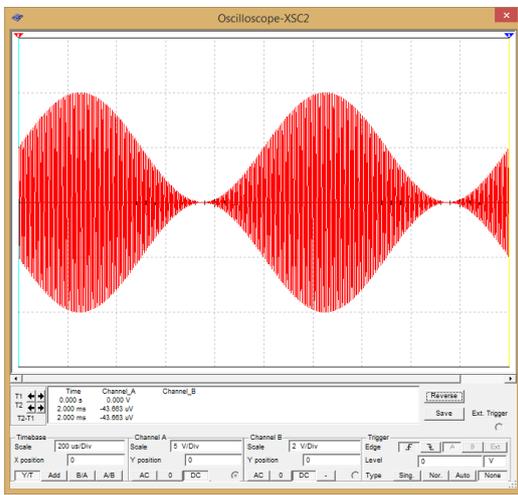


Рис. 6. Осциллограмма АМ-сигнала

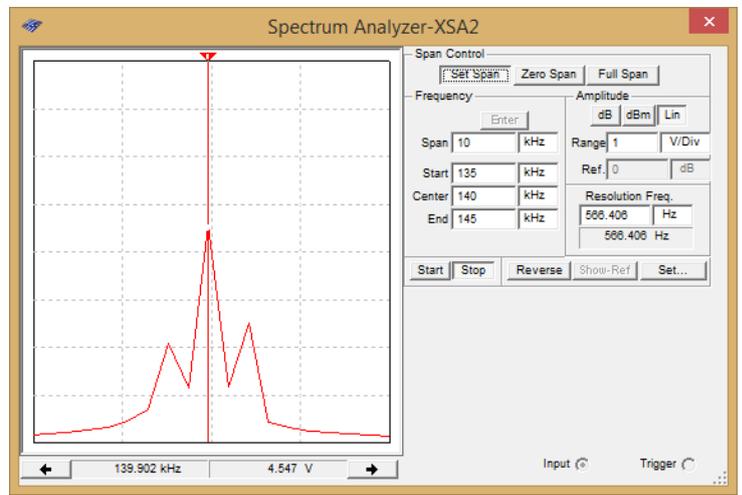


Рис. 7. Спектр АМ-сигнала

После прохождения сигнала через диод, спектр сигнала «окрашивается», в нём появляются комбинационные частоты, а осциллограмма искажается из-за наличия большого количества различных частот. Данный спектральный состав можно обнаружить, подав сигнал после диода на нагрузку R3, минуя ФНЧ. Осциллограмма сигнала и его спектр представлены на рисунках 8-9.

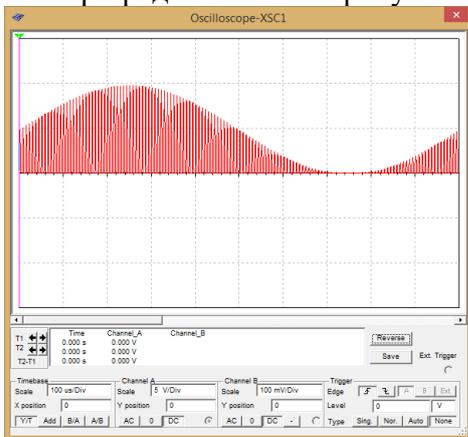


Рис. 8. Осциллограмма сигнала после преобразования

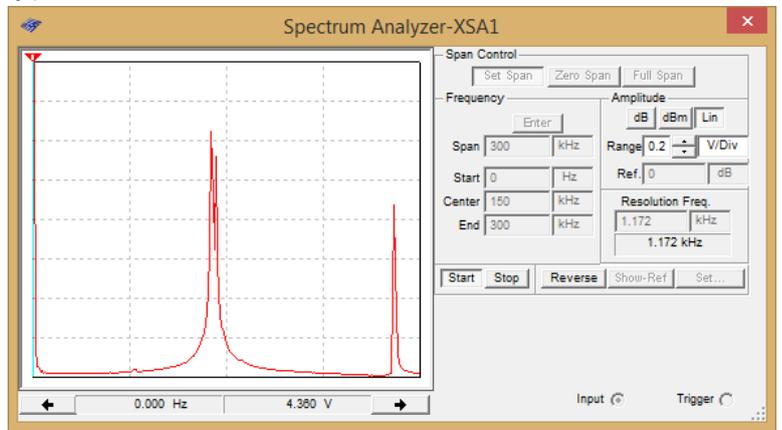


Рис. 9. Спектр сигнала после преобразования

После подачи сигнала с диода на ФНЧ – RC-цепь, состоящую из R1 и C1, – на осциллограмме наблюдается практически идеальная линия огибающей, т.е. низкочастотного сигнала, а в спектре явно фигурирует только гармоника на частоте 1 кГц. Также после прохождения диода появилась постоянная составляющая, поэтому огибающая смещена вверх над временной осью. Осциллограмма и спектр сигнала после RC-фильтра представлены на рисунках 10 и 11. [2]

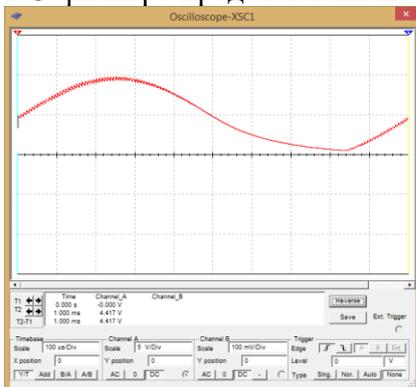


Рис. 10. Осциллограмма сигнала после фильтрации

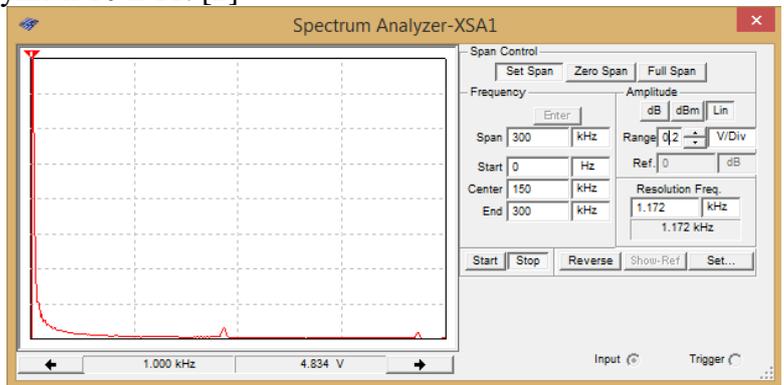


Рис. 11. Спектр сигнала после фильтрации

Однако параметры RC-цепи необходимо подбирать и рассчитывать очень точно, чтобы обеспечить прохождение на выход детектора только нужных гармоник с достаточной амплитудой, т.е. не допустить их фильтрации. При этом фильтр не должен пропускать и высшие гармоники. Таким образом, параметры RC-цепи должны подбираться так, чтобы частота среза была близка к частоте необходимой нам управляющей частоты, но была больше её:  $F_{\text{среза}} \geq F_{\text{упр}}$ . В рассмотренном выше случае для RC-цепи, состоящей из R1 и C1, частота среза равна 1061 Гц, поэтому управляющий сигнал прошел без искажений, а высшие гармоники были подавлены фильтром. Если же частота среза будет меньше, как в следующем случае, то огибающая управляющего сигнала будет заметно искажена, и получить исходный информационный сигнал на выходе будет практически невозможно. Используя ключи J1 и J2, изменим параметры ФНЧ, составив RC-цепь из резистора R2 и конденсатора C2. Частота среза для такого фильтра равна 31 Гц. Осциллограмма и спектр выходного сигнала при неправильно подобранной RC-цепи представлены на рисунках 12 и 13.

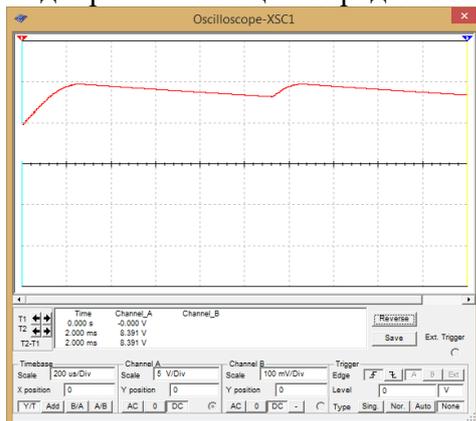


Рис. 12. Осциллограмма сигнала после фильтрации

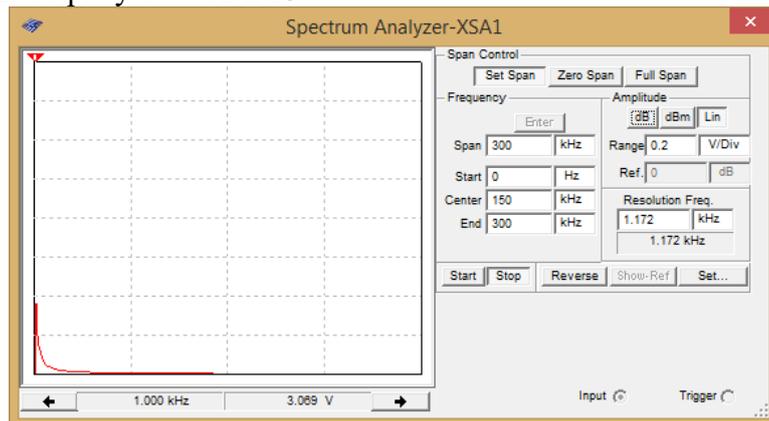


Рис. 13. Спектр сигнала после фильтрации

Поскольку в качестве нелинейного элемента в детекторе может быть использован любой элемент с нелинейной ВАХ, в том числе, и транзистор, проиллюстрируем теоретические расчёты компьютерным моделированием работы амплитудного детектора, составленного на основе транзистора, собранного по схеме с общим эмиттером. Схема данного детектора представлена на рисунке 14. Она состоит из биполярного транзистора 2N3904, разделительных конденсаторов C1 и C5, коллекторного резистора R5, делителей напряжения R1 и R2, резистора R3 и конденсатора C2, образующих цепь термостабилизации. Транзистор, включенный по данной схеме, является усилителем напряжения, поскольку осуществляет многократное усиление сигнала, подаваемого на вход. В качестве нагрузки к транзистору подключен резистор R4 для проверки работы схемы и RC-цепь, настроенная на частоту управляющего сигнала. Сигнал на вход подаётся с помощью генератора АМ-сигналов, и его амплитуда равна 50 мВ, частота несущей равна 159 кГц, частота управляющего сигнала равна 10 кГц. Осциллограммы входного и выходного сигналов и спектр выходного сигнала представлены на рисунках 15 и 16. [2, 3]

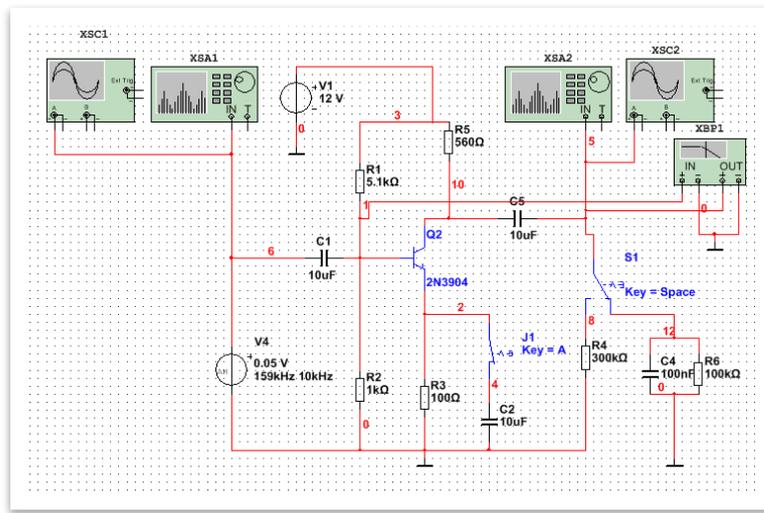


Рис. 14. Схема амплитудного детектора на транзисторе.

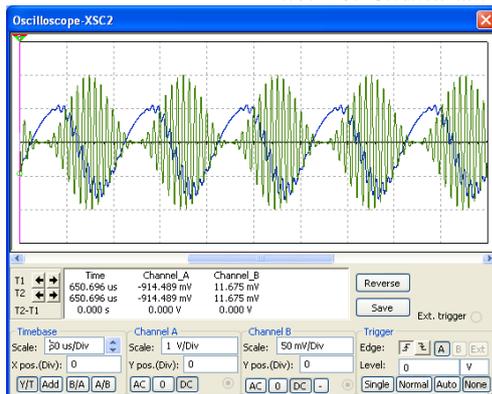


Рис. 15. Осциллограмма входного и выходного сигналов

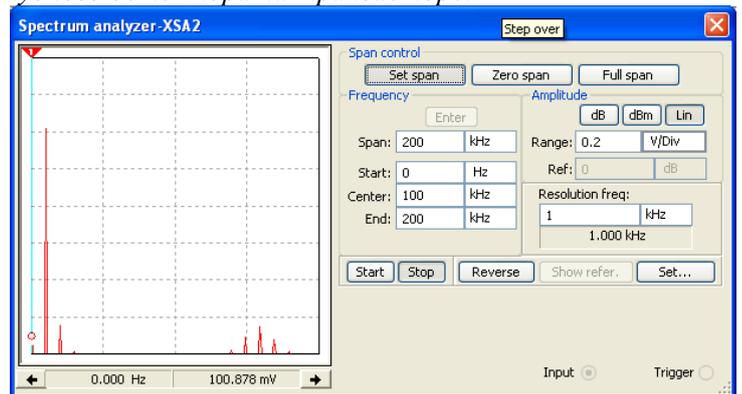


Рис. 16. Спектр выходного сигнала

Как видно из осциллограммы, детектирование было успешно проведено. Используя нелинейность ВАХ транзистора, удалось выделить информационный сигнал и подать его на выход через ФНЧ. Также этот сигнал был усилен, и если на вход подавался сигнал в 50 мВ, то на выходе схемы амплитуда огибающей достигает практически 1 В. Соответственно, использование данной схемы решает сразу две задачи: усиления и детектирования. Однако, в данном случае присутствуют искажения выходного сигнала, связанные с неидеальной формой АЧХ RC-цепи. Из-за этого в спектре выходного сигнала видны высшие гармоники. Хотя их амплитуда крайне мала, тем не менее, они вносят свой вклад в форму выходного сигнала, вызывая нелинейные искажения. [3 - 5]

В соответствии с проведёнными исследованиями можно сделать следующий вывод: точность работы амплитудного детектора зависит от двух факторов.

1) Необходимо правильно подобрать нелинейный элемент, формирующий комбинационные частоты, исходя из поставленной перед системой задачи. Характеристики нелинейного элемента, его динамический диапазон должны соответствовать подаваемым на вход сигналам. Подаваемый на вход нелинейного элемента сигнал не должен выходить за пределы квадратичного участка его ВАХ, иначе спектр сигнала будет содержать комбинационные частоты, возникшие из-за нелинейностей третьего и более высоких порядков.

2) Необходимо правильно настроить и подобрать фильтр низкой частоты, который будет исключать из сигнала высшие гармоники, оставляя лишь необходимую, информационную частоту. Для этого необходимо проводить точные расчёты частоты среза АЧХ ФНЧ.

Предложенная методика исследования нелинейных радиотехнических цепей может быть использована в учебном процессе на кафедре радиоэлектроники в дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы» качестве лабораторной работы «Детектирование

амплитудно-модулированных сигналов», что позволит обучающимся более детально исследовать свойства нелинейных преобразований сигналов в радиотехнических системах.

Методика исследования состоит из следующих частей:

- Теоретическое исследование нелинейного преобразования спектров сигналов: структура вольт-амперной характеристики, её степенная аппроксимация полиномом  $n$ -й степени, расчёт спектра выходного сигнала с помощью аппроксимации ВАХ полиномом второй степени;
- Расчёт параметров фильтра низкой частоты (частоты среза) по заданному варианту и заданным параметрам входного сигнала (частота управляющего сигнала);
- Компьютерное моделирование детектора на диоде с помощью программного пакета Multisim;
- Компьютерное моделирование детектора на транзисторе с помощью программного пакета Multisim.

На основе данного исследования рассматривается возможность создания лабораторного стенда в качестве учебного пособия по изучению нелинейных аналоговых систем.

### Список литературы:

- [1] Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник. – М. : Высш. Школа, 2000. – 462 с.
- [2] MSM9-E-1790 Rev. 1 (C) 2005 Electronics Workbench Corporation. All rights reserved. Published November 2005. Printed in Canada.
- [3] Гордяскина Т.В., Лебедева С.В. Моделирование радиоэлектронных цепей в Multisim: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ и курсового проекта по дисциплине «Проблемно-ориентированные пакеты прикладных программ в радиотехнике» для студентов дневного и заочного обучения по специальности 162107.65 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». – Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – 40 с.
- [4] Гордяскина Т.В., Лебедева С.В., Рубцов А.В. Применение проблемно-ориентированного программного пакета Multisim в технической диагностике частотно-избирательных радиотехнических цепей. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 43. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. С.43-48.
- [5] Гордяскина Т.В., Рубцов А.В. Техническая диагностика линейных аналоговых радиотехнических систем в программном пакете Multisim 10.0.1. Труды 17-го международного научно-промышленного форума "Великие реки-2015" [Электронный ресурс] - Электрон. дан. - Интернет журнал широкой научной тематики. Выпуск 4, 2015 г. Режим доступа: <http://vf-река-море.pdf/2015/PDF/31.pdf>.

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

Evgenii A. Pankov, Tatyana V. Gordyaskina

*Key words: detector, low frequency filter, nonlinear element, modulated signal, control signal.*

*The article is devoted to development of a method of detecting a signal using nonlinear analog radio circuits on the example of the amplitude detector in the software package Multisim.*