

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕФОННЫХ КАНАЛОВ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В работе представлена система автоматической регулировки усиления входного сигнала для радиопередающих устройств КВ диапазона, реализованная на базе бюджетного аудиокодека и программируемой логической интегральной схемы. Данная система автоматической регулировки усиления обеспечивает быстрое восстановление уровня выходного сигнала без существенных выбросов. Для коррекции спектральной маски сигнала и повышения среднеквадратичной излучаемой мощности радиопередающего тракта используется алгоритм компрессии на основе оконной функции Хемминга. В заключение приведены результаты лабораторных испытаний предлагаемой системы автоматической регулировки усиления.

**Ключевые слова:** автоматическая регулировка усиления, компрессия, усилитель мощности, аудиокодек, цифровая обработка сигналов.

**Введение.** В радиопередающих устройствах КВ диапазона для регулирования усиления входного сигнала, с целью поддержания постоянного уровня сигнала на входе усилителя радиопередающих устройств (РПДУ), в телефонных режимах работы применяется система автоматической регулировки усиления (АРУ).

Основными параметрами, определяющими качество АРУ, являются: время срабатывания, время восстановления и время атаки. Структурная схема и принцип работы АРУ приведены на рис. 1 [1].

При уменьшении уровня входного сигнала ниже номинального уровня, через интервал времени, равный времени срабатывания, АРУ начинает восстанавливать уровень входного сигнала (в течение определенного промежутка времени — времени восстановления). При увеличении уровня входного сигнала выше номинального уровня АРУ за интервал времени, равный времени атаки, снижает уровень входного сигнала.

Целью данной работы является исследование и создание системы АРУ с обеспечением постоянного уровня входного сигнала на входе РПДУ КВ диапазона в стандартизованных телефонных режимах работы на базе бюджетного аудиокодека.

**Аналитический обзор способов АРУ.** Различают три различных способа реализации АРУ: аналоговый [1], цифровой [2] и аналогово-цифровой.

В данной работе используется аналогово-цифровой способ реализации АРУ, который обеспечивает высокое соотношение сигнал/шум выход-

ного сигнала в сравнении с цифровым способом. Кроме того, для его реализации достаточно наличие аудиокодека со встроенным аналоговым усилителем с программируемым коэффициентом усиления (PGA — programmable gain amplifier) и цифровым сигнальным процессором (ЦСП), которые широко используются в телефонных каналах передачи РПДУ. Структурная схема такого АРУ представлена на рис. 2.

**Реализация алгоритма АРУ.** Практическая реализация алгоритма АРУ выполнена на аудиокодеке ADAU1761ф. Analog Devices [3] ввиду своей низкой стоимости (менее 800 руб. по состоянию на 19.03.19) и наличием необходимых функций обработки сигналов. Аудиокодек обеспечивает запись и воспроизведение стереосигналов с частотой 48 кГц. АЦП и ЦАП поддерживают частоту дискретизации от 8 кГц до 96 кГц. Аудиокодек также оснащен встроенным ЦСП, ядро которого может работать с 28-разрядными данными и 28-разрядными коэффициентами в формате с плавающей запятой, что обеспечивает динамический диапазон сигнала более 110 дБ.

Алгоритм АРУ реализован по следующему принципу:

1. Анализ входного сигнала.
2. Расчет коэффициента усиления для PGA.
3. Установка коэффициента усиления PGA.

При работе системы АРУ может возникнуть проблема, которая заключается в том, что при малом уровне входного сигнала коэффициент усиления (КУ) PGA становится очень большим, в результате чего вместе с полезным сигналом

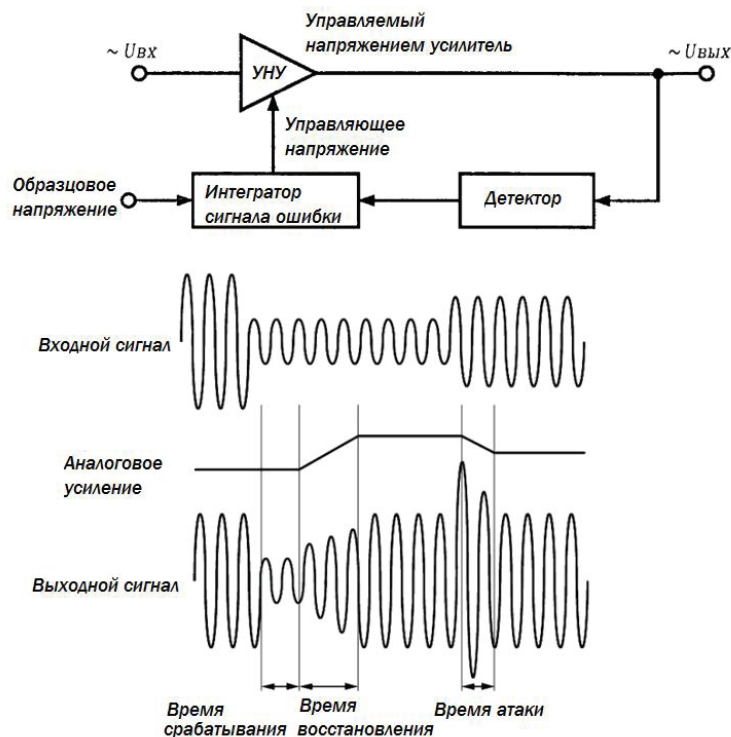


Рис. 1. Структурная схема и принцип работы АРУ

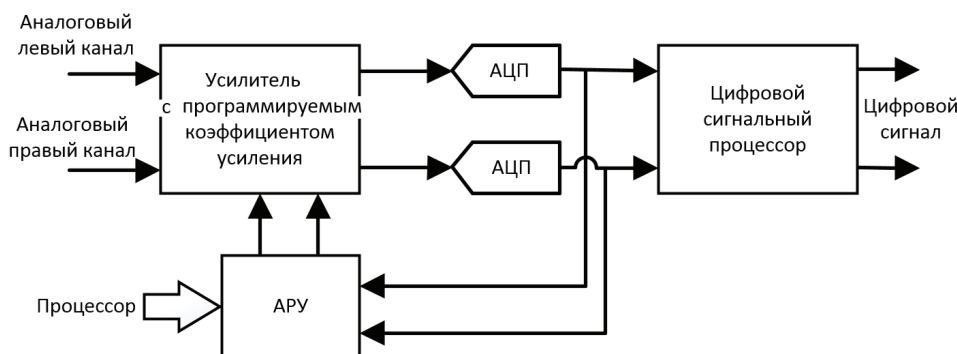


Рис. 2. Структурная схема аналогово-цифрового способа АРУ

усиливается шум. Для того чтобы избежать данной проблемы, в аудиокодеке ADAU1761 предусмотрен шумоподавитель (Noise Gate), который способен подавить входной сигнал PGA, когда его уровень ниже заданного порогового значения.

В данной работе шумоподавитель настроен на режим «удержание КУ PGA» с последующим цифровым подавлением в ЦСП.

Одной из распространённых проблем при реализации функции шумоподавления является паразитная амплитудная модуляция сигнала, которая возникает, когда уровень входного сигнала приближается к порогу срабатывания функции шумоподавления. Для предотвращения такой проблемы используются гистерезис пороговых значений входа в режим шумоподавления и выхода из него, а также увеличенное время срабатывания.

Алгоритм автоматической регулировки усиления представлен на рис. 3.

В соответствии с ГОСТ Р 52903–2004 [4, с. 4] полоса частот телефонного канала должна находиться в пределах от 300 до 3400 Гц, поэтому на выходной сигнал АРУ необходимо наложить спектральную маску, соответствующую заданному ГОСТ, посредством пропускания выходного сигнала АРУ через полосовой фильтр.

Полосовой фильтр на выходе АРУ реализован в цифровом виде с помощью встроенного ЦСП. Программирование ЦСП аудиокодека ADAU1761 осуществляется с помощью графической среды разработки SigmaStudio [5].

Графическая среда SigmaStudio содержит блоки цифровой обработки сигналов (ЦОС), такие как фильтры, процессоры динамической обработки, алгоритмы динамической обработки сигналов (SRS TruSurroundXT, Waves MaxxBass и др.), микшеры и низкоуровневые функции ЦОС. Структурная схема разработанной с помощью SigmaStudio конфигурации ЦСП для системы АРУ представлена на рис. 4.

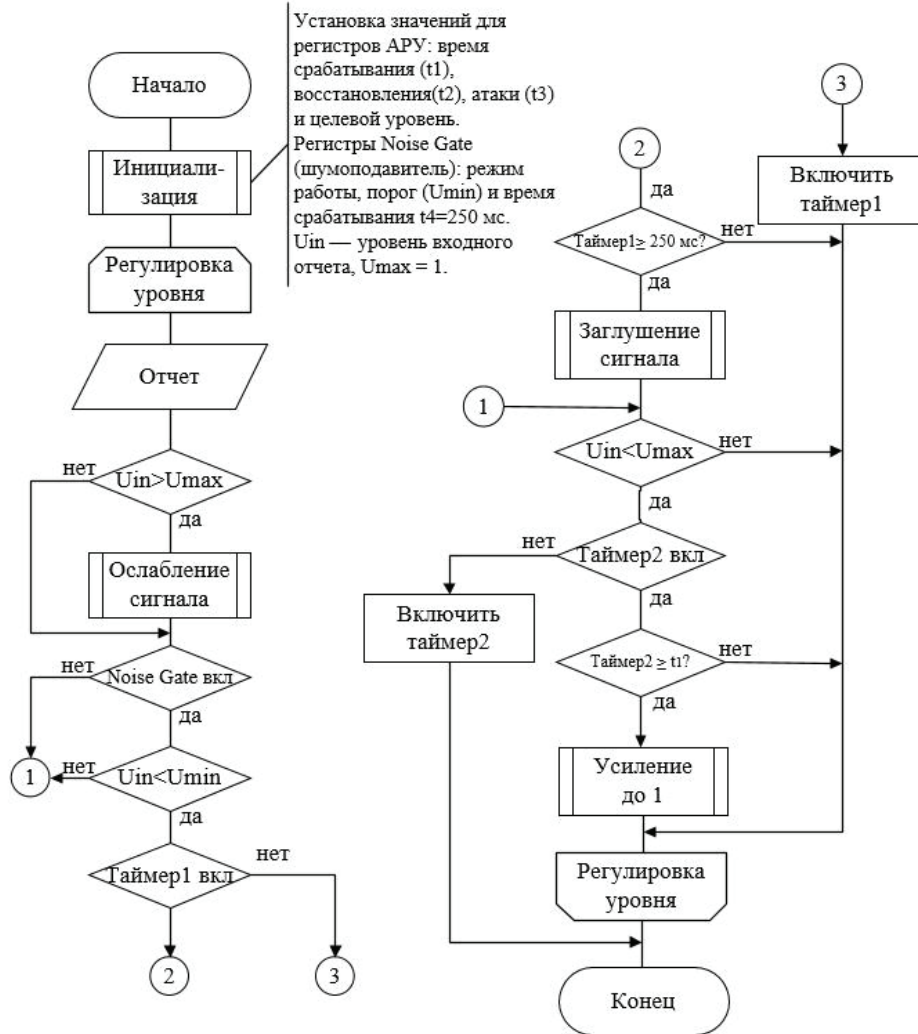


Рис. 3. Реализованный алгоритм АРУ

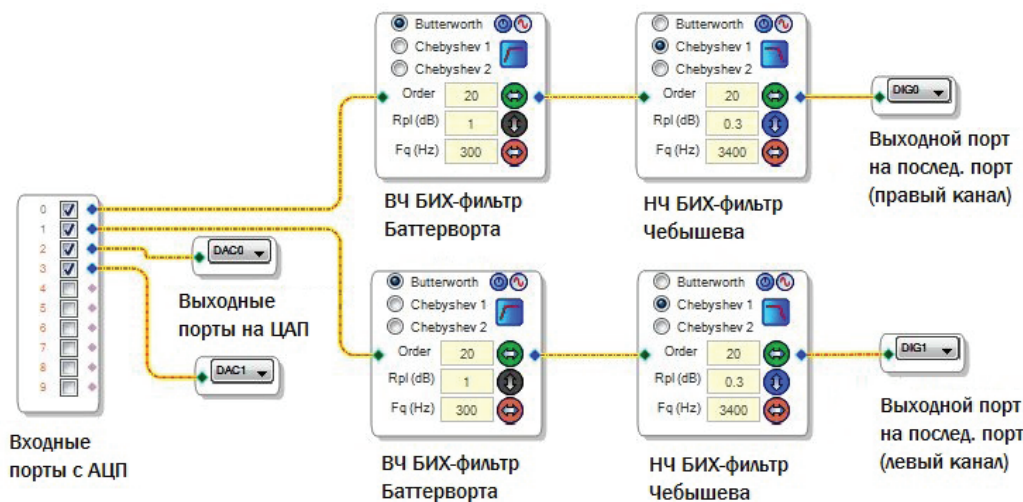


Рис. 4. Структурная схема реализованной конфигурации ЦСП

В данной схеме, для фильтрации высоких частот, используется фильтр Баттерворта 20-го порядка с неравномерностью АЧХ в полосе пропускания (ПП) 1 дБ и частотой среза 300 Гц. Для фильтрации низких частот используется фильтр Чебышева 1-рода 20-го порядка с неравномерно-

стью АЧХ в ПП 0,3 дБ и частотой среза 3400 Гц, так как, по сравнению с фильтром Баттерворта, он имеет более крутой спад АЧХ и способен обеспечить подавление частот вне ПП в соответствии с требованиями к классам излучения J3E, V8E для телефонных режимов [4, с. 5].

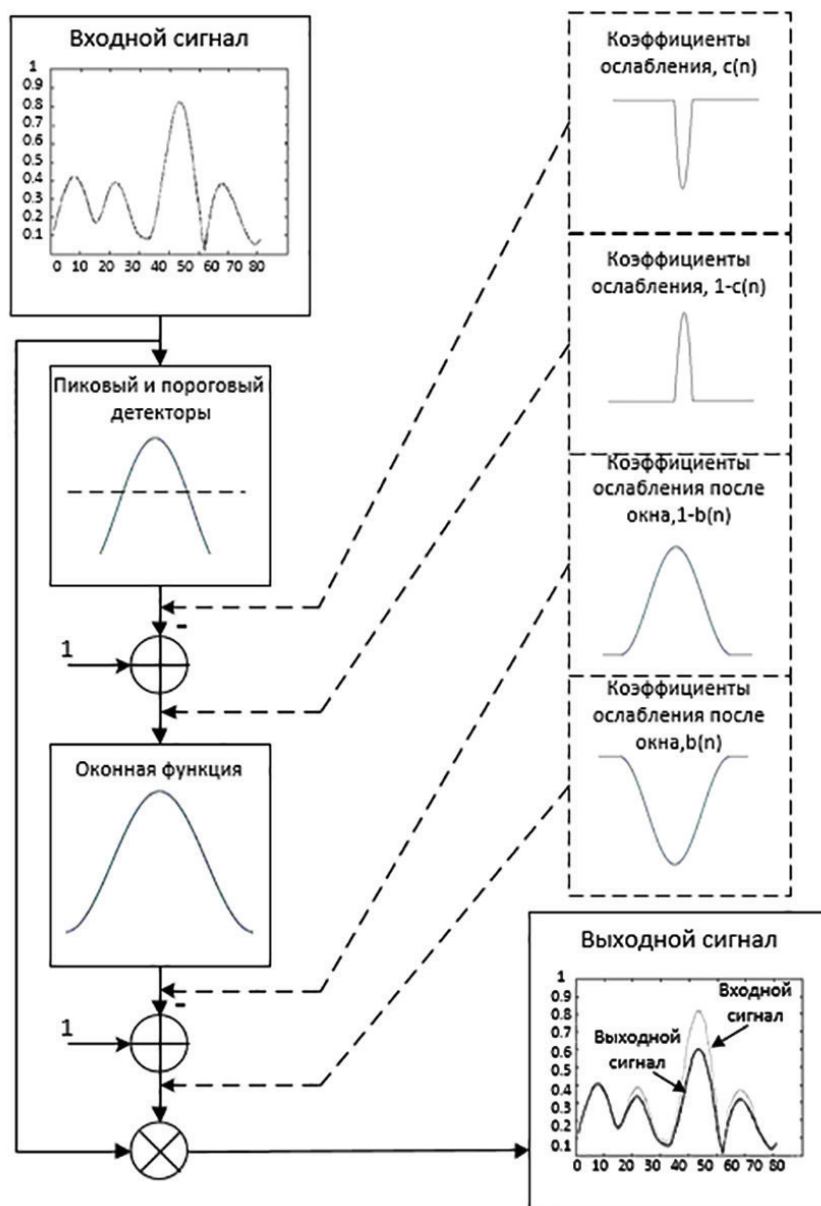


Рис. 5. Алгоритм компрессии на основе оконной функции

После разработки конфигурации с помощью инструментов SigmaStudio для выбранной настройки был сгенерирован файл для инициализации и прошивки ЦСП.

**Реализация алгоритма компрессора.** При прохождении сигнала произвольной формы через фильтр с ограниченной полосой пропускания происходит увеличение пик-фактора сигнала. Для того чтобы избежать неконтролируемого увеличения пик-фактора сигнала, как правило, применяют специальные устройства — компрессоры, ограничивающие уровень сигнала, но не приводящие к расширению спектра [6].

Алгоритм компрессора основан на применении оконной функции [7] и реализован на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Преимущества алгоритма:

1. Сохранение номинального уровня сигнала.
2. Отсутствие внеполосных искажений.
3. Обеспечение высокого уровня средней мощности РПДУ в телефонных режимах.

Недостатки алгоритма:

1. Искажение сигналов с высоким пик-фактором.

Самым простым методом снижения пик-фактора, основанным на амплитудном ограничении сигнала, является метод жесткого ограничения [8]. Жесткое ограничение сигнала приводит к ограничению пиковой мощности выходного сигнала до определенного уровня, с минимальным воздействием на значение модуля вектора ошибки (error vector magnitude — EVM). Жесткое ограничение вызывает нежелательные внеполосные искажения в выходном сигнале. Для уменьшения уровня внеполосных искажений на сигнал накладывается оконная функция. При наложении оконной функции на ограниченный по амплитуде сигнал происходит снижение номинальной мощности сигнала. Величина снижения номинальной мощности сигнала зависит от длины окна. Чем больше длина окна, тем выходной сигнал получается более «сглаженным». В то же время увеличение длины окна увеличи-

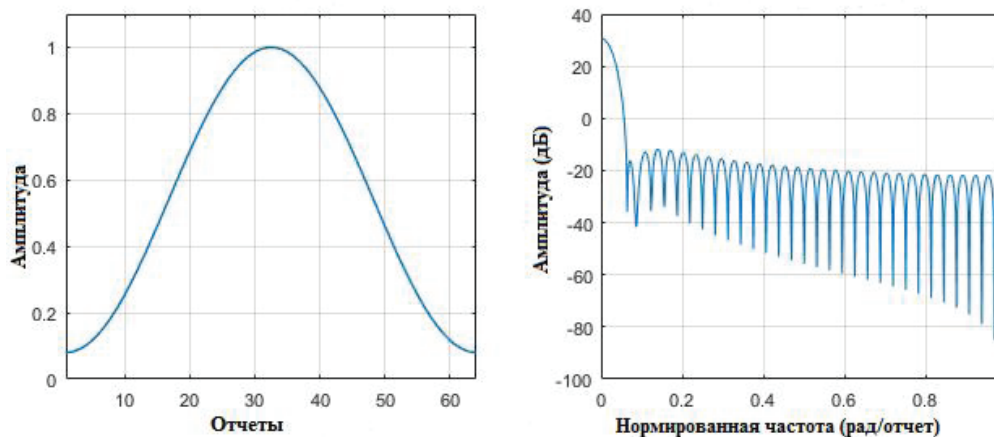


Рис. 6. Окно Хемминга и его нормированный спектр (длина окна 64)

вает разницу между входным сигналом и оконным сигналом и тем самым ухудшается EVM.

Основным требованием к алгоритму компрессии является отсутствие негативного влияния на сигнал, уровень которого не превышает пороговое значение. Поэтому необходимо, чтобы оконная функция применялась к сигналу только в момент превышения данного значения. Простой линейный процесс отсечения, сопровождаемый применением оконной функции, не удовлетворяет этим требованиям. Наиболее эффективно использовать в алгоритме компрессии последовательное применение коэффициентов ослабления, полученных с помощью экстракции параметров сигнала и затем применение оконной функции. Оконная функция может быть ограничена пиковой областью, указанными коэффициентами ослабления.

Принцип работы данного алгоритма приведен на рис. 5.

Весовые коэффициенты могут быть получены при использовании таких окон, как Гаусса, Кайзера, Хэннига и Хэмминга.

В данном исследовании алгоритм компрессии реализован на основе оконной функции Хемминга (пример оконной функции Хемминга при длине окна, равной 64, представлен на рис. 6), поскольку она обладает более подходящим спектром для уменьшения внеполосных излучений по сравнению с другими оконными функциями [9].

Окно Хемминга является окном высокого разрешения и описывается выражением [10]:

$$W(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad (1)$$

где  $n = 0 \dots N-1$ .

Фундаментальный принцип жесткого ограничения сигнала может быть выражен как

$$y(n) = c(n)x(n), \quad (2)$$

где  $x(n)$  — исходный сигнал, который следует ограничить;  $y(n)$  — ослабленный сигнал, после ограничения;  $c(n)$  — коэффициенты ослабления.

При жестком ограничении сигнала  $c(n)$  находится в диапазоне:

$$c(n) = \begin{cases} 1, & |x(n)| \leq A; \\ \frac{A}{|x(n)|}, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (3)$$

где  $A$  — уровень ограничения (номинальный уровень).

Пределы ограничения  $y(n)$  задаются параметром  $A$ . При использовании оконной функции коэффициенты ослабления  $c(n)$  будут заменены на  $b(n)$ , где

$$b(n) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k W(n-k), \quad (4)$$

где  $w(n)$  — оконная функция;  $a_k$  — весовые коэффициенты.

По существу, это свертка оконной функции и весовых коэффициентов. Эта свертка реализована в фильтре с конечной импульсной характеристикой (КИХ).

Чтобы поддерживать максимально допустимую амплитуду  $A$ , значение  $b(n)$  не должно быть больше, чем значения  $c(n)$ . Отсюда следует неравенство:

$$1 - \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k W(n-k) \leq c(n), \quad (5)$$

которое должно соблюдаться для всех  $n$ .

Чем выше значения коэффициентов  $a_k$ , тем сигнал после отсечения ближе к исходному сигналу  $x(n)$ . Для уменьшения значения EVM неравенство (5) должно стремиться к равенству. Длина окна  $W$  и коэффициенты  $a_k$  определяют, насколько близко значение  $b(n)$  к значению  $c(n)$ .

Для анализа работы алгоритма компрессии с реальным сигналом была разработана имитационная модель компрессора, обеспечивающего отсутствие превышений номинального уровня входного сигнала телефонных каналов, соответствующего 0,775 В согласно ГОСТ [4]. Структурная схема разработанной имитационной модели представлена на рис. 7.

На вход модели подается сигнал с высоким пик-фактором, затем с помощью преобразования Гильберта формируется комплексная оги-

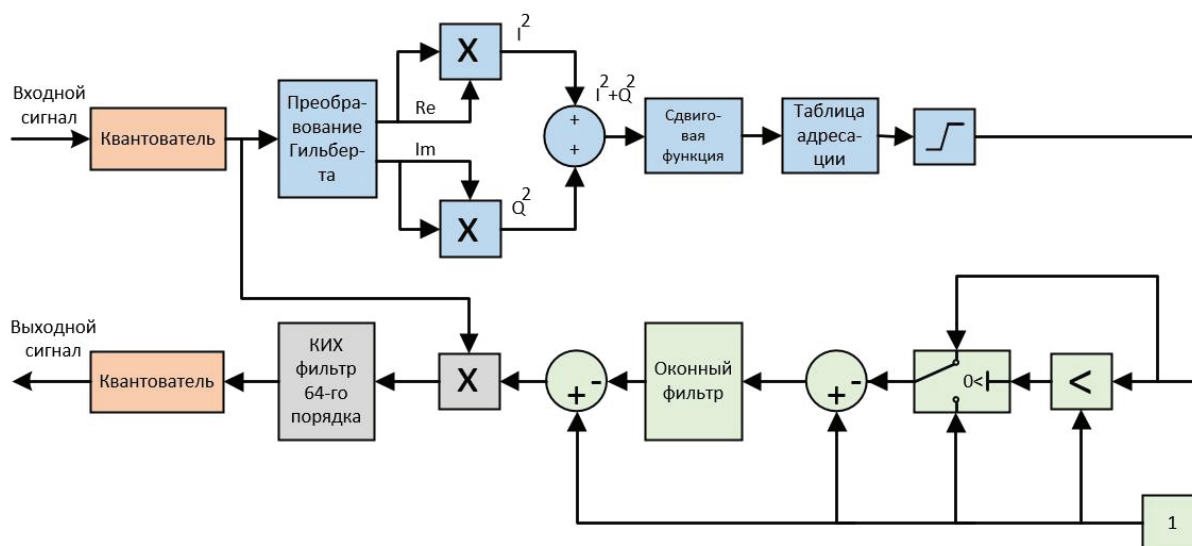


Рис. 7. Структурная схема модели компрессора

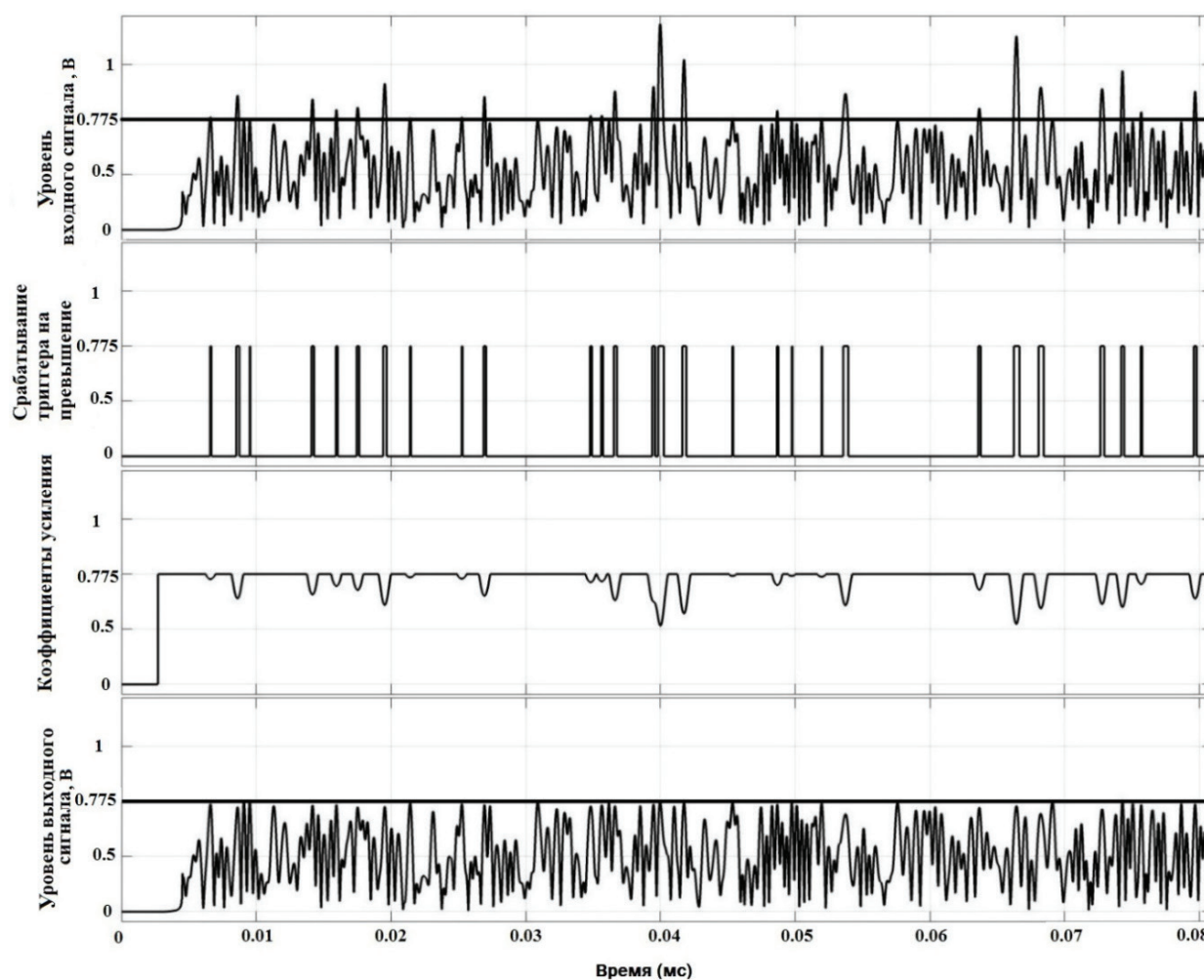


Рис. 8. Результат работы модели компрессора

бающая, после чего суммируются квадраты синфазной и квадратурной составляющих. Далее из сигнала извлекается корень с помощью таблицы адресации и результат пропускается через ограничитель предельного уровня сигнала. Затем выполняется анализ сигнала и поиск превышения

уровня входного сигнала выше порогового значения. Далее с помощью оконной функции сигнал фильтруется согласно алгоритму компрессии. Результирующий сигнал получается путем умножения полученных коэффициентов корректировки на исходный сигнал (с высоким пик-фактором)

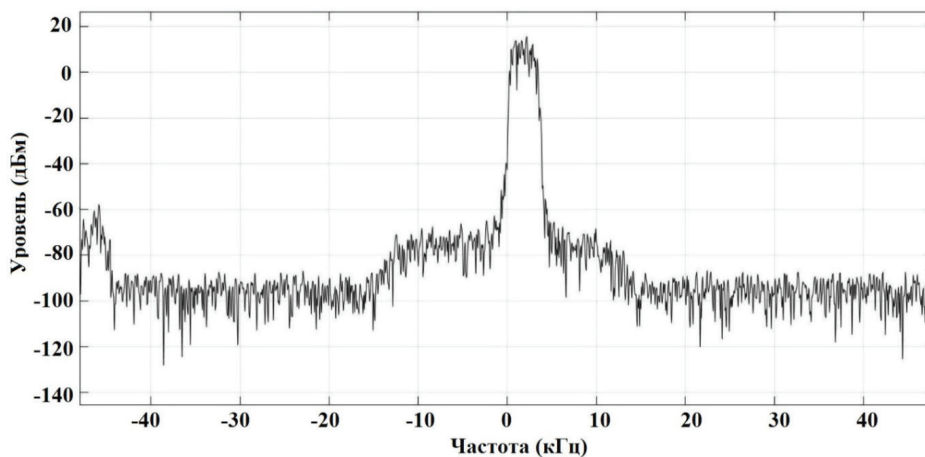
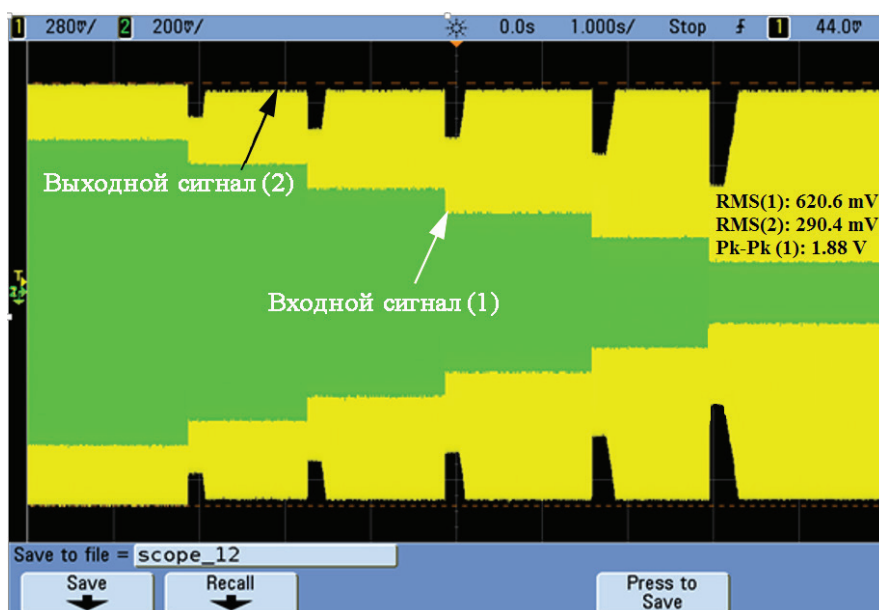
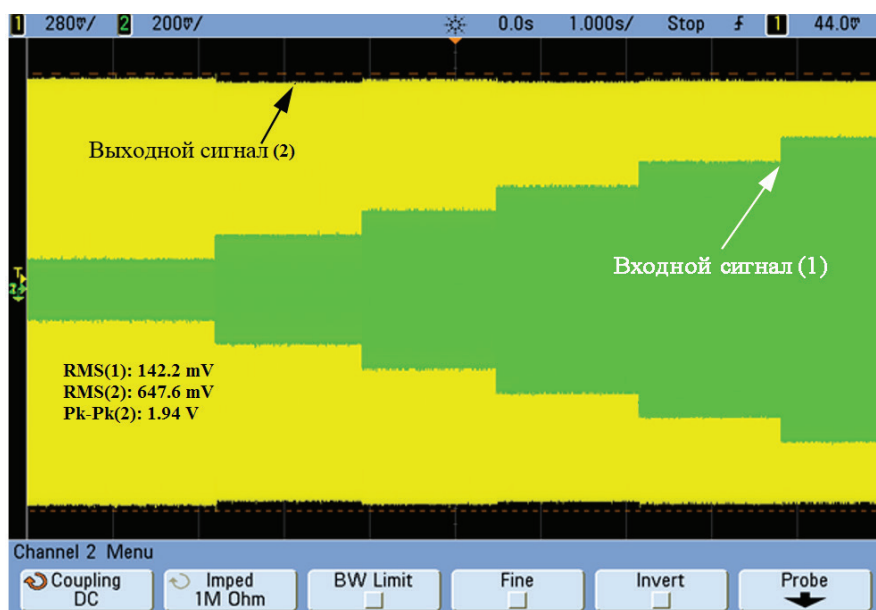


Рис. 9. Спектр сигнала после компрессии



а)



б)

Рис. 10. Результат работы системы АРУ: а) при уменьшении уровня входного сигнала; б) при увеличении уровня входного сигнала

и пропускания скорректированного сигнала через полосовой КИХ фильтр 64-го порядка.

Результат компрессии входного сигнала представлен на рис. 8, спектр выходного сигнала после компрессии представлен на рис. 9.

Как видно из рис. 8–9, алгоритм компрессии позволяет уменьшить пик-фактор выходного сигнала до требуемого уровня и обеспечить спектральную маску согласно ГОСТ [4, с. 4].

По результатам моделирования был сделан вывод о возможности применения данного алгоритма в системе АРУ.

**Результаты работы и лабораторных испытаний.** Практическая реализация системы АРУ выполнена на базе системы на кристалле Zynq-7020, имеющей FPGA Artix-7 на 85000 логических ячеек и 2-ядерный микропроцессор Cortex-A9 с тактовой частотой 667 МГц [11].

Доказана работоспособность системы АРУ на основе проведения оценки отклонения реальной выходной мощности от номинальной при изменении амплитуды входного сигнала в диапазоне от 0,75 В до 2,45 В в соответствии с ГОСТ [4]. Результаты испытаний представлены на рис. 10. Как видно, из представленных осциллограмм, система АРУ удовлетворяет требованиям ГОСТ, при этом отсутствует превышение выходным сигналом порогового значения, что характеризует реализованную систему АРУ как быстродействующую и работоспособную.

**Заключение.** Разработанная система автоматической регулировки усиления позволяет существенно повысить качественные характеристики радиопередающих устройств: качество звучания сигнала и уровень средней излучаемой мощности сигнала для телефонных каналов передачи.

Высокое качество звучания сигнала для телефонных каналов передачи достигается за счёт использования разработанного алгоритма автоматической регулировки усиления, обеспечивающего высокое быстродействие и высокий эффективный динамический диапазон сигнала (более 110 дБ). Разработанный алгоритм компрессора на основе оконной функции Хемминга обеспечивает высокий уровень средней излучаемой мощности сигнала для телефонных каналов передачи.

Практическая реализация предлагаемой системы автоматической регулировки усиления доказывает эффективность выбранной архитектуры с точки зрения соотношения достигаемого качества звучания телефонного канала к затраченным вычислительным ресурсам выбранной целевой платформы.

#### Библиографический список

1. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с. ISBN 5-7503-0013-7.
2. Литюк В. И., Литюк Л. В. Методы цифровой многопроцессорной обработки ансамблей радиосигналов. М.: СОЛОН-Пресс, 2007. 589 с. ISBN 5-98003-303-3.

3. ADAU1761 (Rev. E) // Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAU1761.pdf> (дата обращения: 19.03.2019).

4. ГОСТ Р 52903–2004. Передатчики радиосвязи стационарные декаметрового диапазона волн. Основные параметры, технические требования и методы измерений. Введ. 2003–01–01. М.: Стандартинформ, 2002. 50 с.

5. SigmaStudio Release Notes // Analog Devices. URL: [https://www.analog.com/media/en/dsp-hardware-software/software-modules/SigmaStudio\\_4.1\\_Release\\_Notes.pdf](https://www.analog.com/media/en/dsp-hardware-software/software-modules/SigmaStudio_4.1_Release_Notes.pdf) (дата обращения: 19.03.2019).

6. Caselles E. S. Crest Factor Reduction Based On Artificial Neural Networks. Master's thesis in Complex Adaptive Systems. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2017. 88 p.

7. Mistry H. N. Implementation of a Peak Windowing Algorithm for Crest Factor Reduction in WCDMA. Burnaby: Simon Fraser University, 2006. 62 p.

8. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems. Boston: Artech House, 2004. 272 p. ISBN 1-58053-796-0.

9. Vaananen O., Vankka J., Halonen K. Reducing the peak to average ratio of multicarrier GSM and EDGE signals // The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 18 Sept., 2002. Lisboa, 2002. Vol. 1. DOI: 10.1109/PIMRC.2002.1046672.

10. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2 т. / пер. с фр. М.: Мир, 1983. Т. 1. 256 с.

11. XA Zynq-7000 SoC First Generation Architecture // XILINX All Programmable. URL: [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds188-XA-Zynq-7000-Overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds188-XA-Zynq-7000-Overview.pdf) (дата обращения: 19.03.2019).

**ТКАЧЕВА Анна Викторовна**, аспирантка кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

SPIN-код: 5463-5610

Адрес для переписки: [annettchen.t@yandex.ru](mailto:annettchen.t@yandex.ru)

**ПАВЛОВ Антон Павлович**, аспирант кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

Адрес для переписки: [apaw92@gmail.com](mailto:apaw92@gmail.com)

**КАЩЕНКО Игорь Евгеньевич**, старший преподаватель кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

SPIN-код: 1324-7376

ORCID: 0000-0002-8074-5103

ResearcherID: M-9736-2015

Адрес для переписки: [i.kashchenko@inbox.ru](mailto:i.kashchenko@inbox.ru)

#### Для цитирования

Ткачева А. В., Павлов А. П., Кащенко И. Е. Система автоматической регулировки усиления для телефонных каналов радиопередающих устройств // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 84–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-84-91.

Статья поступила в редакцию 15.04.2019 г.

© А. В. Ткачева, А. П. Павлов, И. Е. Кащенко