

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

А. А. Прасолов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

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

## Аннотация

Задача автоматической регулировки усиления – поддерживать постоянный уровень выходной мощности. Системы автоматической регулировки усиления предложены для различных систем связи, как аналоговых, так и цифровых. Однако, при всем многообразии предложенных алгоритмов цифровой автоматической регулировки усиления подстройка параметров регулирования во время процесса моделирования в действительности часто игнорируется. На практике это может привести к длительным перегрузкам тракта при большом изменении мощности сигнала на входе. Также существует другой риск, что используемая модель предназначена только для работы в линейном режиме. В нелинейном режиме ее поведение не всегда может соответствовать ожиданиям. **Предмет исследования.** Целью данной статьи является анализ характеристик цифровой системы автоматической регулировки усиления и моделирование ее работы в математическом пакете Matlab. **Метод.** В рамках исследования разработана цифровая модель гибридной системы автоматической регулировки усиления в математическом пакете Matlab. **Основные результаты.** Показано, что время регулирования цифровой системы автоматической регулировки усиления с нелинейной характеристикой регулировки усиления не зависит от амплитуды сигнала на входе. Эффективность работы цифровой модели гибридной системы автоматической регулировки усиления ограничена динамическим диапазоном линейного тракта и аналого-цифрового преобразователя. Получена математическая зависимость времени срабатывания цифровой модели гибридной системы автоматической регулировки усиления от изменения уровня сигнала на входе, в которой, постоянная времени фильтра автоматической регулировки усиления была заменена на постоянную времени всей системы автоматической регулировки усиления. **Практическая значимость.** В результате данного исследования предложена цифровая модель гибридной системы автоматической регулировки усиления, которая позволит моделировать параметры цифровых систем автоматической регулировки усиления как для малых, так и для больших изменений уровня сигнала на входе. Результаты этой работы актуальны в задачах разработки цифровых приемников для систем связи различного назначения.

## Ключевые слова

Цифровая автоматическая регулировка усиления, модель, время срабатывания, время отпуска-ния.

**Информация о статье**

УДК 621.396.621.59

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 10.12.19, принята к печати 30.12.2019.

**Ссылка для цитирования:** Прасолов А. А. Моделирование цифровой системы автоматической регулировки усиления // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Том 7. № 2. С. 55–64. DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-55-64.

## DIGITAL AUTOMATIC GAIN CONTROL SYSTEM MODELING

A. Prasolov

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Corresponding author: prasolov.alex@gmail.com

**Abstract**—The goal of automatic gain control is to maintain a constant output power level. Automatic gain control systems are used in various communication systems, both analog and digital. However, for all the variety of digital automatic gain control algorithms, the adjustment of the control parameters during the simulation process in reality is often ignored. In practice, this can lead to long-term overloads with a large change of the input signal power. There is also the risk that the model used was designed to work in linear mode only. In nonlinear mode, its behavior may not always be predictable. **Research subject.** The purpose of this article is to analyze digital AGC system characteristics and to model its operation in Matlab. **Method.** As part of the study, a Matlab model of hybrid automatic gain control system was developed. **Core results.** It is shown that the control time of the digital automatic gain control system with a non-linear gain control characteristic does not depend on the amplitude of the input signal. The performance of the proposed digital model is limited by the dynamic range of the linear path and the analog-to-digital converter. The mathematical dependence of the response time of the model on the input signal level change is obtained, in which the time constant of the automatic gain control filter has been replaced by the time constant of the entire automatic gain control system. **Practical relevance.** A digital model of hybrid automatic gain control system is proposed, which will allow to simulate digital automatic gain control systems parameters for both small and large changes in the input signal level. The results of this work are relevant to the development of digital receivers for communication systems of various purposes.

**Keywords**—Digital automatic gain control, model, attack time, decay time.

**Article info**

Article in Russian.

Received 10.12.19, accepted 30.12.2019.

**For citation:** Prasolov A.: Digital automatic gain control system modeling // Telecom IT. 2019. Vol. 7. Iss. 2. pp. 55-64 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-55-64.

## Введение

Задача автоматической регулировки усиления (АРУ) – поддерживать постоянный уровень выходной мощности при изменении ее на входе в широких пределах. Системы АРУ применяются в аналоговых и цифровых системах связи [1]. Исследования цифровых систем АРУ ведутся давно. В [2, 3] рассмотрены цифровые АРУ с регулируемым элементом в виде усилителя с переменным коэффициентом передачи, в [4] предложена цифровая система АРУ с аттенуатором. Двухступенчатый алгоритм АРУ для точной регулировки усиления был предложен в [5], и в [6] предложен алгоритм цифровой АРУ для использования в базовой станции стандарта CDMA. Полностью цифровую систему АРУ без фильтра предложили в [7]. Однако, при всем многообразии предложенных алгоритмов цифровых систем АРУ подстройка параметров регулирования во время процесса моделирования в действительности часто игнорируется. На практике это может привести к длительным перегрузкам тракта при большом изменении мощности сигнала на входе. В этом случае также существует другой риск, что используемая модель предназначена только для работы в линейной области. В нелинейном режиме ее поведение не всегда может соответствовать ожиданиям [8].

Целью данной статьи является анализ характеристик разработанной цифровой модели гибридной системы автоматической регулировки усиления в математическом пакете Matlab.

## Модель цифровой системы АРУ

В [9] была предложена модель цифровой системы автоматической регулировки усиления, однако недостатком такой модели является использование блоков с логарифмированием, которые требуют больших вычислительных затрат. Как было отмечено в работе [10], для того чтобы избавиться от недостатка цифровых систем АРУ с линейной характеристикой регулировки усиления, необходимо использовать логарифмическую характеристику регулирующего элемента. На рис. 1 представлена цифровая модель гибридной системы АРУ с несколько измененным блоком ФУК (формирователя управляющего кода).

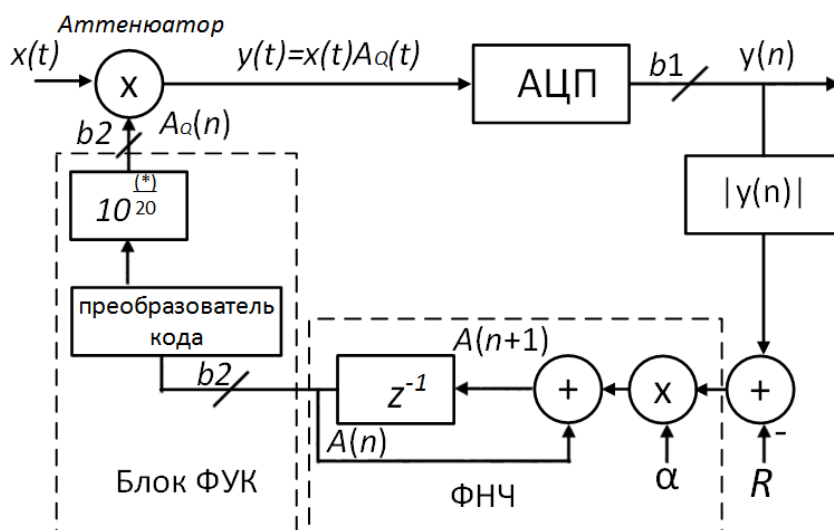


Рис. 1. Структурная схема цифровой модели гибридной системы АРУ с нелинейной характеристикой регулировки усиления и тракта ПЧ ЦРПру

Как видно из рис. 1, отсчет модуля сигнала  $\mu(n)$  сравнивается с опорным уровнем  $R$ , соответствующим  $\sqrt{P_{\hat{y}}}$ , где  $P_{\hat{y}}$  – требуемая мощность сигнала на выходе умножителя (аттенюатора) и вычисляется сигнал ошибки  $A(n)$ , который после прохождения цифрового ФНЧ поступает на преобразователь кода, а затем на регулируемый элемент.

Преобразователь кода выполняет функцию моделирования ослабления аттенюатора при подаче управляющих слов с разрядностью  $b_2$ :

$$A_{\text{пк}}(n) = \lfloor A(n) \rfloor \cdot \Delta d, \text{ дБ} \quad (1)$$

где  $\Delta d$  – величина шага регулирования аттенюатора.

Далее, для корректной работы модели, значение  $A_{\text{пк}}(n)$  переводится из дБ в разы. Для сравнения модели цифровой системы АРУ, представленной в [9], они были промоделированы с одними и теми же параметрами системы АРУ и входного сигнала. Результаты моделирования приведены в таблице 1 (для цифровой системы АРУ, описанной в [9]) и в таблице 2 (для цифровой системы АРУ, показанной на рис. 1).

Как видно из таблицы 1, в случаях 11–13, когда уровни огибающей сигнала на входе отличаются, а изменение амплитуды, при этом одинаково, то время регулирования зависит от амплитуды сигнала на входе. Следовательно, цифровая модель гибридной системы АРУ, описанная в [9], является системой АРУ с линейной характеристикой регулирования усиления.

Из табл. 2 следует, что время регулирования цифровой логарифмической системы АРУ не зависит от амплитуды (оглавающей) сигнала на входе (случаи 1 и 11–13). Кроме того, как видно из структуры блока ФУК, аппаратная реализация логарифмической системы АРУ оказывается даже несколько проще, чем приведенная в [9].

Как видно из таблиц 1 и 2, эффективность работы предложенной цифровой модели гибридной системы АРУ ограничена динамическим диапазоном линейного тракта и АЦП. Следовательно, если эффективность ограничена динамическим диапазоном аттенюатора, то необходимо использовать либо аттенюатор с большим диапазоном регулирования, либо комбинацию из нескольких аттенюаторов.

Таблица 1.

## Характеристики цифровой системы АРУ

№	$A_1$	$A_2$	$\Delta A_{\text{вх}}$	$t_{\text{н1}}, \text{мс}$	$\Delta_{\text{ост1}}$	$t_{\text{н2}}, \text{мс}$	$\Delta_{\text{ост2}}$	$K_1$	$K_2$	$\Delta A_{\text{вых}}$	$D, \text{дБ}$
1	0,85	1,7	2	0,12	$5 \cdot 10^{-5}$	0,62	$5 \cdot 10^{-5}$	2	1	1	6,0
2	0,425	1,7	4	0,75	$5 \cdot 10^{-5}$	1,2	$5 \cdot 10^{-5}$	4	1	1	12,0
3	0,106	1,7	16	5,3	$5 \cdot 10^{-5}$	6,2	$5 \cdot 10^{-5}$	16	1	1	24,1
4	0,06	1,7	30	12,2	$5 \cdot 10^{-3}$	13	$5 \cdot 10^{-5}$	30	1	1	29,5
5	0,009	1,7	188	3,5	1,36	16	$5 \cdot 10^{-5}$	37,5	1	6	29,9
6	0,005	1,7	344	3,5	1,51	16	$5 \cdot 10^{-5}$	37,5	1	11	29,9
7	0,009	0,27	30	3	1,36	15	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	6	6	13,7
8	0,005	0,15	30	2,2	1,51	16,2	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	11	11	9,1
9	0,004	0,12	30	1,7	1,55	15	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	14	14	6,7
10	0,003	0,09	30	1,2	1,58	13,7	0,22	37,5	19	19	4
11	0,425	0,85	2	0,4	$5 \cdot 10^{-5}$	0,8	$5 \cdot 10^{-5}$	4	2	1	6
12	0,212	0,425	2	1,8	$5 \cdot 10^{-5}$	3	$5 \cdot 10^{-5}$	8	4	1	6
13	0,106	0,212	2	4	$5 \cdot 10^{-5}$	6,2	$5 \cdot 10^{-5}$	16	8	1	6

Таблица 2.

Характеристики цифровой системы АРУ с нелинейной характеристикой регулировки усиления

№	$A_1$	$A_2$	$\Delta A_{\text{вх}}$	$t_{n1}, \text{ мс}$	$\Delta_{\text{ост1}}$	$t_{n2}, \text{ мс}$	$\Delta_{\text{ост2}}$	$K_1$	$K_2$	$\Delta A_{\text{вых}}$	$D, \text{ дБ}$
1	0,85	1,7	2	8,5	$5 \cdot 10^{-5}$	15,6	$5 \cdot 10^{-5}$	2	1	0,85	6,0
2	0,425	1,7	4	10,2	$5 \cdot 10^{-5}$	21,2	$5 \cdot 10^{-5}$	4	1	0,425	12,0
3	0,106	1,7	16	13,2	$5 \cdot 10^{-5}$	32,2	$5 \cdot 10^{-5}$	16	1	0,106	24,1
4	0,06	1,7	30	15	$5 \cdot 10^{-3}$	37,5	$5 \cdot 10^{-5}$	30	1	0,06	29,5
5	0,009	1,7	188	7,6	1,36	38	$5 \cdot 10^{-5}$	37,5	1	0,009	29,9
6	0,005	1,7	344	7,6	1,51	38	$5 \cdot 10^{-5}$	37,5	1	0,005	29,9
7	0,009	0,27	30	3,9	1,36	25	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	6	0,009	13,7
8	0,005	0,15	30	2,6	1,51	22,5	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	11	0,005	9,1
9	0,004	0,12	30	2,1	1,55	18,7	$3 \cdot 10^{-5}$	37,5	14	0,004	6,7
10	0,003	0,09	30	1,4	1,58	16,2	0,22	37,5	19	0,003	4
11	0,425	0,85	2	8,5	$5 \cdot 10^{-5}$	15,6	$5 \cdot 10^{-5}$	4	2	0,425	6
12	0,212	0,425	2	8,5	$5 \cdot 10^{-5}$	15,6	$5 \cdot 10^{-5}$	8	4	0,212	6
13	0,106	0,212	2	8,5	$5 \cdot 10^{-5}$	15,6	$5 \cdot 10^{-5}$	16	8	0,106	6

### Оценка времени срабатывания и отпускания

Временем срабатывания ( $t_c$ ) принято называть время регулирования системы АРУ при увеличении амплитуды сигнала на входе, а временем отпускания ( $t_o$ ) – при уменьшении амплитуды. На рис. 2, показаны характеристики времени срабатывания и отпускания системы АРУ в зависимости от изменения амплитуды сигнала на входе.

Как видно из рис. 2, время отпускания логарифмически зависит от изменения амплитуды сигнала на входе, что соответствует общей теории АРУ [11, 12]. Аналитическое выражение для оценки времени срабатывания системы АРУ было дано в [13] и уточнено в [14]:

$$t_y = \tau_\phi (2,4 - \ln(1 + a\Delta U_{m1} K_{\max})), \quad (2)$$

где  $\Delta U_{m1}$  – изменение напряжения сигнала на входе;

$K_{\max}$  – максимальный коэффициент усиления тракта;

$\tau_\phi$  – постоянная времени фильтра системы АРУ.

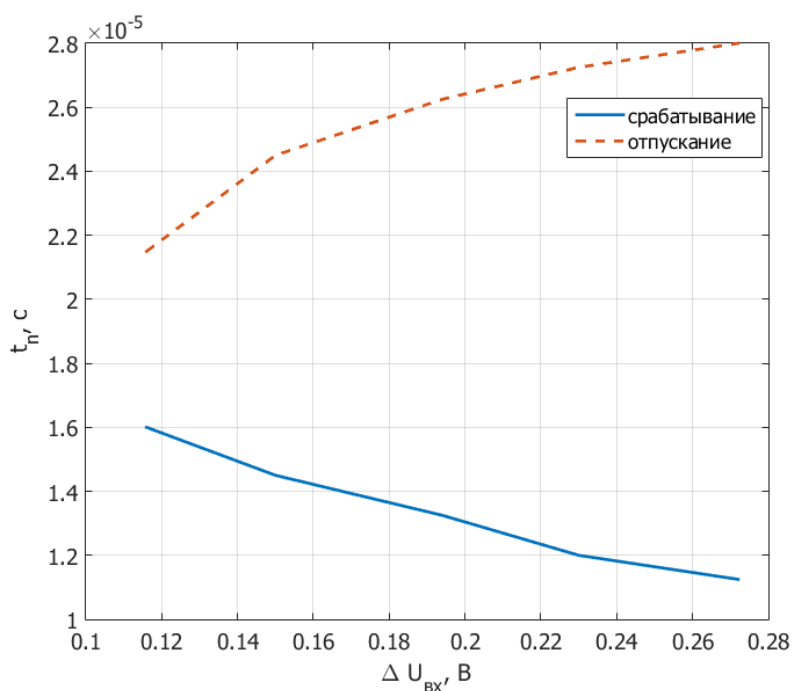


Рис. 2. Время срабатывания и отпускания системы АРУ при различных изменениях амплитуды сигнала на входе

В выражении (2)  $K_{\max}$  – максимальное изменение коэффициента усиления аттенюатора (рис. 1), и, как согласно [9], равное 37,6, а  $\Delta U_{m1}$  – изменение уровня огибающей на входе. Так как система АРУ является системой с обратной связью, то для более точного описания рассмотрим постоянную времени как постоянную времени переходного процесса всей системы АРУ.

Как известно, постоянная времени характеризует длительность протекания переходного процесса, и обычно это промежуток времени, в течение которого

реакция системы на единичный скачок изменяется в  $e$  раз ( $e \approx 2,718$ ), и напряжение достигает 63,2% от своего установившегося значения.

Как показано в [11], характер переходного процесса при срабатывании и отпуске системы АРУ отличается. Для модели, представленной на рис. 1, оценим постоянную времени системы АРУ для обоих случаев.

На рис. 3а показано изменение величины управляющего сигнала системы АРУ при изменении амплитуды сигнала на входе в 4,5 раза при отпуске, который получен при  $\alpha = 0,1$  и  $F_d = 80$  МГц и выбрана точка, при которой значение управляющего сигнала достигает значения  $0,632 \cdot A_{\text{треб}}$ , а на рис. 3б – изменение величины управляющего сигнала системы АРУ при срабатывании.

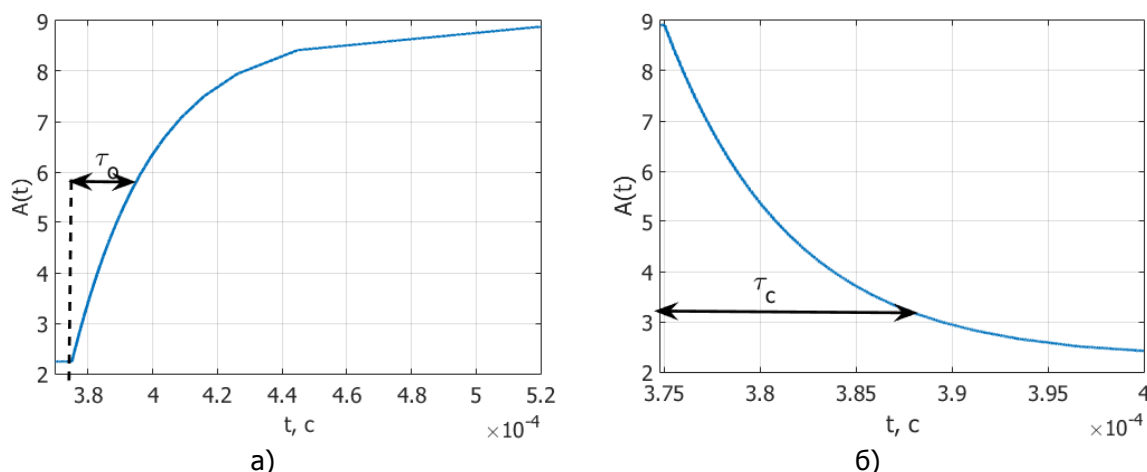


Рис. 3. Определение постоянной времени системы АРУ при  
а) отпуске; б) срабатывании

Как видно из рис. 3, постоянная времени системы АРУ при отпуске составляет  $\tau_{\text{ару\_отп}} = 20$  мкс, а при срабатывании –  $\tau_{\text{ару\_с}} = 9$  мкс. Тогда, поставив в выражение (2) значение, соответствующее значению постоянной времени системы АРУ, и заменив логарифм на десятичный, можно вычислить время регулирования для произвольного изменения уровня огибающей сигнала для режима срабатывания:

$$t_c = \tau_{\text{ару\_с}} (2,4 - \lg(1 + a \Delta U_{m1} K_{\max})), \text{ с} \quad (3)$$

На рис. 4 показано сравнение значений времени срабатывания, полученных по результатам моделирования и теоретических расчетов. Как видно из рис. 4, моделирование и расчет по формуле (3) дает практически один и тот же характер зависимости.



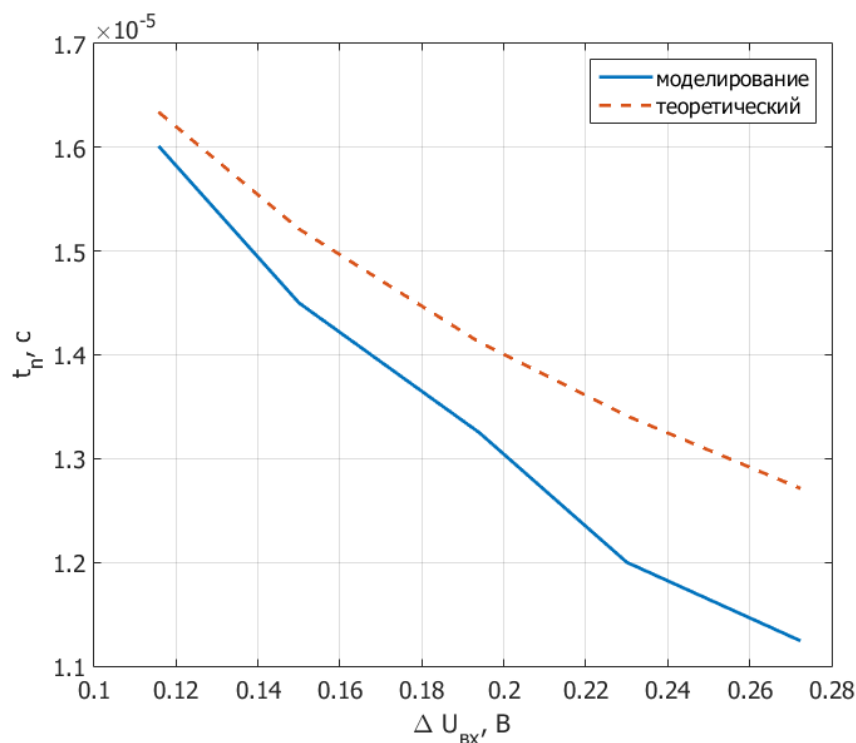


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования времени срабатывания и с результатами теоретического расчета

### Заключение

Показано, что время регулирования цифровой системы АРУ с нелинейной характеристикой регулировки усиления не зависит от амплитуды сигнала на входе. Эффективность работы цифровой модели гибридной системы АРУ ограничена динамическим диапазоном линейного тракта и АЦП. Получена математическая зависимость времени срабатывания цифровой модели гибридной системы АРУ от изменения уровня сигнала на входе, в которой, постоянная времени фильтра АРУ была заменена на постоянную времени всей системы АРУ. Это позволит моделировать параметры цифровых систем АРУ как для малых, так и для больших изменений уровня сигнала на входе. Основным ограничением данной зависимости является условие нахождения всей системы в линейном режиме.

### Литература

1. Pérez J. P. A., Pueyo S. C., López B. C. Automatic gain control. Springer Fachmedien, 2011.
2. Vucic M., Butorac M. All-digital high-dynamic automatic gain control // 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2009. Pp. 1032–1035.
3. Zhang H., Wang G., Lu M. Analysis and implementation of digital automatic gain control for DAB baseband decoder // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. Vol. 57. No. 2. Pp. 327–334.
4. Jimenez V. P. G. et al. Design and implementation of synchronization and AGC for OFDM-based WLAN receivers // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2004. Vol. 50. No. 4. Pp. 1016–1025.
5. Li C. F., Cheng R. J. H. A two-stage digital AGC scheme with diversity selection for frame-based OFDM systems // 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2006. Pp. 3533.
6. Kim C., Im S. Digital automatic gain control for software radio W-CDMA base stations // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. No. 3. Pp. 318–320.
7. Tisserand E., Berviller Y. Design and implementation of a new digital automatic gain control // Electronics Letters. 2016. Vol. 52. No. 22. Pp. 1847–1849.

8. Vavra J., Bajer J. On the Modeling of Automatic Gain Control in SPICE // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). 2017. Vol. 9. No. 2-7. Pp. 187–190.
9. Прасолов А. А., Шпак С. А. Моделирование переходного процесса цифровой автоматической регулировки усиления // Информационные технологии моделирования и управления. 2013. № 1. С. 40–45.
10. Nezami M. K. RF architectures & digital signal processing aspects of digital wireless transceivers // Draft. 2003.
11. Тартаковский Г.П. Динамика систем автоматической регулировки усиления. 1957.
12. Mercy D. V A review of automatic gain control theory / D. V Mercy // Radio Electron. Eng. 1981. Vol. 51. No. 11.12. Pp. 579–590.
13. Палшков В. В. Радиоприемные устройства. М.: Радио и связь, 1984.
14. Прасолов А. А. Математическое моделирование цифровых систем АРУ: отчет о НИР (заключ.) / А. А. Прасолов, С. А. Шпак. СПб., 2011. 51 с.

### References

1. Pérez, J. P. A., Pueyo, S. C., López, B. C. Automatic Gain Control. Springer Fachmedien, 2011.
2. Vucic, M., Butorac, M. All-Digital High-Dynamic Automatic Gain Control // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2009. Pp. 1032–1035.
3. Zhang, H., Wang, G., Lu, M. Analysis and Implementation of Digital Automatic Gain Control for DAB Baseband Decoder // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. Vol. 57. Iss. 2. Pp. 327–334.
4. Jimenez, V. P. G., et al. Design and Implementation of Synchronization and AGC for OFDM-Based WLAN Receivers // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2004. Vol. 50. Iss. 4. Pp. 1016–1025.
5. Li, C. F., Cheng, R. J. H. A Two-Stage Digital AGC Scheme with Diversity Selection for Frame-Based OFDM Systems // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2006. Pp. 3533.
6. Kim, C., Im, S. Digital Automatic Gain Control for Software Radio W-CDMA Base Stations // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. Iss. 3. Pp. 318–320.
7. Tisserand, E., Berviller, Y. Design and Implementation of a New Digital Automatic Gain Control // Electronics Letters. 2016. Vol. 52. Iss. 22. Pp. 1847–1849.
8. Vavra J., Bajer J. On the Modeling of Automatic Gain Control in SPICE // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). 2017. Vol. 9. Iss. 2-7. Pp. 187–190.
9. Prasolov, A., Shpak, S. Modeling of the Process of Digital Automatic Gain Control // Information Technology of Modeling and Management. 2013. No. 1. Pp. 40–45.
10. Nezami, M. K. RF Architectures and Digital Signal Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers. Draft, 2003.
11. Tartakovskiy, G. Dynamics of Automatic Height Adjustment Systems. M.: Gosenergoizdat, 1957.
12. Mercy, D. V. A Review of Automatic Gain Control Theory // Radio Electronic Engineer. 1981. Vol. 51. No. 11.12. Pp. 579–590.
13. Palshkov, V. Radio Receivers. M.: Radio I svyaz', 1984.
14. Prasolov, A., Shpak, S. Mathematical Modeling of Digital AGC Systems. SPb.: The Research Report, 2011. 51 p.

**Прасолов  
Александр  
Александрович**

– старший преподаватель, СПбГУТ, Санкт-Петербург,  
193232, Российская Федерация, prasolov.alex@gmail.com

**Prasolov Aleksandr**

– Senior Lecturer, SUT, St. Petersburg, 193232,  
Russian Federation, prasolov.alex@gmail.com