

УДК 621.373.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-152-157

Система автоматической регулировки амплитуды колебаний для однокольцевого RC-автогенератора

Е.М. Торина

RC-автогенераторы (RC-АГ) гармонических колебаний давно известны и используются в различных областях радиотехники. Они нашли применение в медицинской технике, различных датчиках, измерительной технике и пр. Основными их достоинствами при работе в диапазоне от коротких до длинных волн являются малые габариты, простота и дешевизна изготовления, возможность широкой перестройки частоты и др.

В предыдущих работах рассмотрены варианты построения таких схем, в том числе самых простых из них — однокольцевых RC-АГ. Показано, что основным недостатком АГ такого типа при формировании сигналов, близких к гармоническим, является необходимость работы с очень малым запасом по самовозбуждению. Увеличение запаса ведет к неизбежному росту высших гармоник, искажению выходного сигнала и срыву колебаний, поэтому для получения устойчивого стационарного режима необходимо прибегать к дополнительным приемам. Одним из таких приемов является автоматическая регулировка амплитуды (АРА). Ввод схемы АРА позволяет управлять амплитудой выходного сигнала генератора, позволяя тем самым увеличить запас по самовозбуждению в начальный момент времени и возвращать амплитуде нужное значение в установившемся режиме.

Представлен вариант построения такой системы на примере однокольцевого автогенератора с мостом Вина в цепи обратной связи. Важной задачей при проектировании систем с АРА является анализ их устойчивости и выбор постоянных времени функциональных узлов, входящих в систему. Существует много методов для исследования устойчивости системы АРА и всех их объединяет необходимость составления дифференциальных уравнений (ДУ) системы. Приведен вариант решения такой задачи. Получена система дифференциальных уравнений, описывающая работу автогенератора с системой АРА. С помощью нее, используя критерий устойчивости Гурвица, решен вопрос выбора постоянной времени фильтра нижних частот (ФНЧ) амплитудного детектора (АД), входящего в систему АРА. Показано, что выбор постоянной времени ФНЧ АД ограничен, с одной стороны, требованиями к работе амплитудного детектора, с другой, — обеспечением быстрой реакции системы АРА на изменение амплитуды напряжения генератора. Получены временные диаграммы реакции системы на изменение амплитуды напряжения генератора и фазовый портрет системы.

Ключевые слова: RC-автогенератор, система автоматической регулировки амплитуды, устойчивость автогенератора.

Для цитирования: Торина Е.М. Система автоматической регулировки амплитуды колебаний для однокольцевого RC-автогенератора // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 152—157. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-152-157.

The Automatic Amplitude Control System for a Single-Loop RC Oscillator

Е.М. Torina

Harmonic RC oscillators have long been known and are widely used in various fields of radio engineering. They have become widely used in medical equipment, various sensors, measuring equipment, etc. Their main advantages in operating within short to long wave frequency bands are compact dimensions, simplicity and low cost of manufacturing, possibility of widely retuning the frequency, etc.

In our previous articles, we examined several versions of such circuits, including single-loop RC oscillators, which are the simplest ones. It was shown that the major disadvantage of such self-oscillators in generating close-to-sinewave signals is the need to operate them with a very small self-excitation margin. An attempt to increase the self-excitation margin inevitably leads to a growth of higher harmonic components, distortion of the output signal, and failure of oscillations. As a result, additional techniques must be used to secure stable steady-state operation. One of such techniques is automatic amplitude control (AAC). With the AAC circuit switched in operation, the generator output signal amplitude is controlled, due to which a larger self-excitation margin is obtained at the initial time instant, and the required amplitude value is maintained during steady-state operation. The article presents a version of such system taking as an example a single-loop self-oscillator with the Wien bridge in the feedback circuit. As is known, the list of important issues to be taken care of in designing AAC systems includes, among other things, an analysis of their stability and the selection of time constants for the system functional units. There are many methods for analyzing the stability of an AAC system, and all of them involve the need to set up differential equations of the system. A version of addressing this objective is presented to produce the system of differential equations describing the operation of a self-oscillator fitted with the AAC system. The obtained system of equations was applied for selecting — using the Routh–Hurwitz stability criterion — the time constant for the low-pass filter (LPF) of the AAC system amplitude detector (AD). It has been shown that the selection of the time constant for the AD LPF is constrained, on the one hand, by the requirements for the amplitude detector operation mode, and on the other hand, by the need to ensure fast response of the AAC system to variations of the generator voltage amplitude. The time histories of the system response to variations of the generator voltage amplitude and the system phase-plane portrait have been obtained.

Key words: RC oscillator, automatic amplitude control system, oscillator stability.

For citation: Torina E.M. The Automatic Amplitude Control System for a Single-Loop RC Oscillator. MPEI Vestnik. 2018;5:152—157. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-152-157.

RC-автогенераторы (*RC*-АГ) широко применяются в различных отраслях радиотехники [1 — 4]. Они входят в состав многих медицинских установок, датчиков, сенсорных устройств, измерительных и сельскохозяйственных установок. Их основные достоинства при работе в диапазоне от коротких до длинных волн заключены в малых габаритах, простоте и низкой стоимости изготовления, возможности широкой перестройки частоты и др.

Самые простые варианты *RC*-генераторов гармонических колебаний — однокольцевые рассмотрены в [5, 6]. Показано, что основной недостаток подобных схем — необходимость работы на границе возбуждения. Одним из способов увеличения запаса по самовозбуждению при генерации больших амплитуд напряжения и малых уровнях нелинейных искажений считается введение системы автоматической регулировки амплитуды (АРА).

Системы автоматического управления являются функциональными узлами для многих технических комплексов [7 — 13]. Основная задача для подобных систем — расчет их устойчивости [14 — 19]. Предложена простая схема *RC*-АГ с АРА, приведены основные выражения для расчета параметров и режимов системы и решена задача устойчивости всей системы.

Электрическая схема предложенной системы АРА изображена на рис. 1. В качестве *RC*-АГ взят однокольцевой автогенератор с полосно-пропускающим фильтром в виде моста Вина в цепи обратной связи (ОС), поскольку он лучший по флуктуационным и энергетическим характеристикам среди генераторов такого класса [5]. Усилитель в АГ построен на дифференци-

альном активном приборе (ДАП), к неинвертирующему выходу которого подключена цепь ОС генератора, а к инвертирующему — система АРА, состоящая из амплитудного детектора (АД), фильтра нижних частот (ФНЧ), промежуточного усилителя, делителя напряжения и регулируемого источника тока, включенного в эмиттерную цепь ДАП и регулирующего его коэффициент усиления, т. е. влияющего на режим автогенератора.

Параметры схемы рассчитаны таким образом, что в момент включения питания напряжение на базе транзистора регулируемого источника определяется делителем напряжения и обеспечивает ток в эмиттерной цепи ДАП больше значения, соответствующего границе возбуждения и, соответственно, стационарному режиму. Это позволяет генератору запустить колебания с увеличенным запасом по самовозбуждению, который в данной схеме определяется произведением модулей коэффициента усиления усилителя на ДАП в начальный момент времени и коэффициента потерь фильтра ЦОС на частоте генерации. По мере нарастания колебаний растет сигнал на выходе АД и промежуточный усилитель открывается, постепенно уменьшая падение напряжения на входе регулируемого источника тока, уменьшая тем самым и сам постоянный ток, поступающий в ДАП. Этот процесс происходит до тех пор, пока коэффициент усиления ДАП не упадет до значения, соответствующего стационарному режиму АГ.

Помимо увеличения запаса по самовозбуждению, важной функцией системы АРА является компенсация отклонения параметров регулирования за счет обратных связей. Чтобы эта функция выполнялась, необхо-

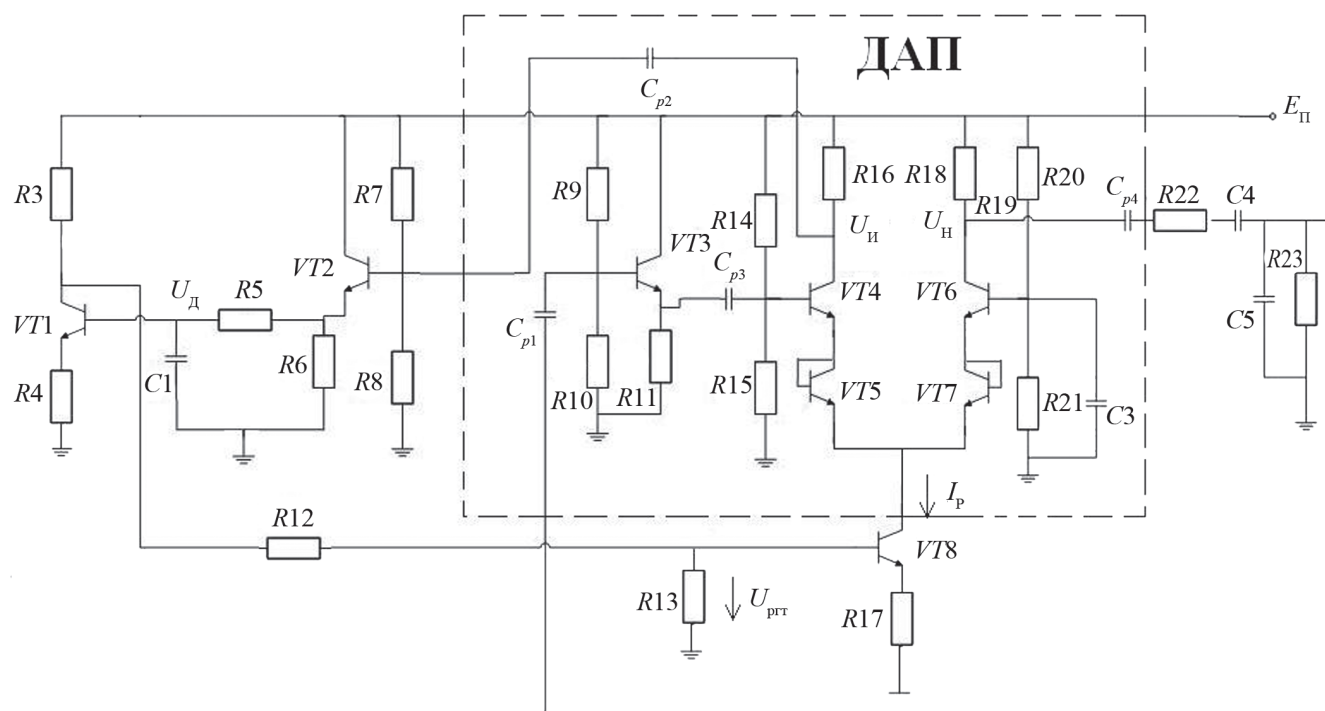


Рис. 1. Электрическая схема *RC*-автогенератора с мостом Вина с системой АРА

димом определить динамический диапазон системы регулирования и набор статических параметров системы. Поэтому решение задачи исследования устойчивости к изменению параметров чрезвычайно важно для данной системы.

Для анализа вопроса устойчивости системы АРА можно использовать несколько методов: анализа системы дифференциальных уравнений (ДУ) критерием Гурвица, фазовых траекторий, логарифмических АЧХ и ФЧХ системы и т. д. [14, 15]. Для любого из них следует составить систему ДУ [14]. В [6] получено ДУ для автогенератора без системы АРА:

$$T_{\phi a} pU = \Phi V_1(U) - U, \quad (1)$$

где $T_{\phi a} = \frac{2}{3}T = \frac{2}{3}RC$ — постоянная времени АГ; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования; U — напряжение на выходе ДАП; $\Phi = |K_{\text{цос}}(j\omega_b)|K_U = \frac{1}{3}R_k S_{\text{ДАП}}$ — запас по самовозбуждению; $K_{\text{цос}}(j\omega_b)$ — коэффициент передачи цепи обратной связи на частоте самовозбуждения генератора ω_b ; K_U — коэффициент усиления ДАП; R_k — сопротивление в коллекторе ДАП; $S_{\text{ДАП}}$ — крутизна ВАХ ДАП; $V_1(U)$ — нормированная нечетная функция входного напряжения, характеризующая нелинейность усилителя на ДАП.

Пусть ДАП работает в линейном режиме, тогда $V_1(U) = U$. Для исследования АГ с АРА преобразуем это уравнение. Учитывая, что $S_{\text{АП}} = \frac{I_0(U, U_{\text{ррт}})}{8\phi_T} (I_0(U, U_{\text{ррт}}) —$ постоянный ток в эмиттерной цепи ДАП; ϕ_T — тепловой потенциал, введя обозначение порогового тока $I_{0\text{пор}} = 24\phi_T/R_k$, при котором АГ находится на границе самовозбуждения, перепишем (1) в следующем виде:

$$T_{\phi a} pU = [I_0(U, U_{\text{ррт}}) / I_{0\text{пор}} - 1]U. \quad (2)$$

В этом уравнении условие стационарного режима $U = U_{\text{ст}} = \text{const} \neq 0$ может выполняться только при $\frac{I_0(U, U_{\text{ррт}})}{I_{0\text{пор}}} = 1$, поэтому в момент включения генератора должно выполняться неравенство $I_0(U, U_{\text{ррт}})|_{U=0} > I_{0\text{пор}}$, а с увеличением U ток $I_0(U, U_{\text{ррт}})$ должен уменьшаться до $I_{0\text{пор}}$.

Получено уравнение для кольца регулирования амплитуды:

$$(T_{\phi} p + 1)U_{\text{ррт}} = U_{\text{ррт.н}} - K_p U_{\text{д}}(U), \quad (3)$$

где T_{ϕ} — постоянная времени ФНЧ-детектора; $U_{\text{ррт.н}}$ — напряжение на базе токозадающего транзистора в начальный момент времени; K_p — произведение коэффициентов передачи фильтра в детекторе и усиления промежуточного усилителя; $U_{\text{д}}(U)$ — детекторная характеристика.

Выражения (2), (3) представляют собой систему нелинейных ДУ для системы АГ с АРА. Введем новые обозначения для упрощения записи системы и перепишем все в каноническом виде (в виде системы Коши): $T_{\phi a} = T_1$; $T_{\phi} = T_2$; $U_{\Gamma} = x$; $U_{\text{ррт}} = y$.

Полагаем, что постоянные времени пропорциональны коэффициентам распределения $T_1 = k_1^{-1}T$; $T_2 = k_2^{-1}T$, где k_1, k_2 — коэффициенты распределения.

Положим $k_1^{-1} = 1 \Rightarrow k_2^{-1} = T_{\phi a}/T_{\phi}$. После нормировки на $T_1 (p_1 = pT_{\phi a} = pT_1)$ и с учетом новых обозначений, система уравнений (2), (3) приобретет вид:

$$\begin{cases} p_1 x = f_1(x, y) = k_1 (I_0(x, y) / I_{0\text{пор}} - 1)x; \\ p_1 y = f_2(x, y) = k_2 (U_{\text{ррт.н}} - K_p U_{\text{д}}(x) - y). \end{cases} \quad (4)$$

Координаты особых точек (x_0, y_0) системы можно найти, решив систему (4) с учетом выполнения условия стационарного режима, то есть при $p_1 x^0 = p_1 y^0 = 0$.

Поскольку система исследуется на устойчивость при малых отклонениях от положения рабочей точки, то линеаризуем ее, дав небольшое приращение каждой координате в окрестности рабочей точки $x(t) = x^0 + \xi(t)$, $y(t) = y^0 + \eta(t)$. Разложив функции $f_{1,2}(x(t), y(t))$ в ряд Тейлора в окрестности особой точки, удерживая только члены первого порядка малости из системы (4), получим

$$\begin{cases} p_1 \xi(t) = f_1(x^0, y^0) + f'_{1x}(x^0, y^0)\xi(t) + f'_{1y}(x^0, y^0)\eta(t); \\ p_1 \eta(t) = f_2(x^0, y^0) + f'_{2x}(x^0, y^0)\xi(t) + f'_{2y}(x^0, y^0)\eta(t). \end{cases}$$

Из условий стационарного режима следует $f_1(x^0, y^0) = f_2(x^0, y^0) = 0$. Вычислив значение каждой производной по координате, найдем следующую систему линейных ДУ:

$$\begin{cases} p_1 \xi(t) = k_1 [S_{\text{ррт}} / I_{0\text{пор}}] x^0 \eta(t); \\ p_1 \eta(t) = k_2 \left[-K_p \frac{dU_{\text{д}}}{dx} \Big|_{x=x^0} \xi(t) - \eta(t) \right], \end{cases} \quad (5)$$

где $S_{\text{ррт}} = \frac{dI_0(x, y)}{dy} \Big|_{x=x^0, y=y^0}$ — крутизна зависимости $I_0(U, U_{\text{ррт}})$ регулируемого генератора тока.

Для исследования устойчивости системы воспользуемся критерием Гурвица [14 — 16] и вычислим область определения k_2 , а, следовательно, и область определения T_{ϕ} .

Выбор постоянной времени T_{ϕ} ФНЧ АД ограничен, с одной стороны, требованиями к работе амплитудного детектора, с другой — обеспечением быстрой реакции системы АРА на изменение амплитуды напряжения генератора. На рис. 2 представлена временная диаграмма реакции системы АРА на изменение амплитуды колебаний, полученная с помощью системы (5) при разных значениях T_{ϕ} . Так же для постоянной времени $T_{\phi 2}$ с помощью (5) определен фазовый портрет данной системы, изображенный на рис.3.

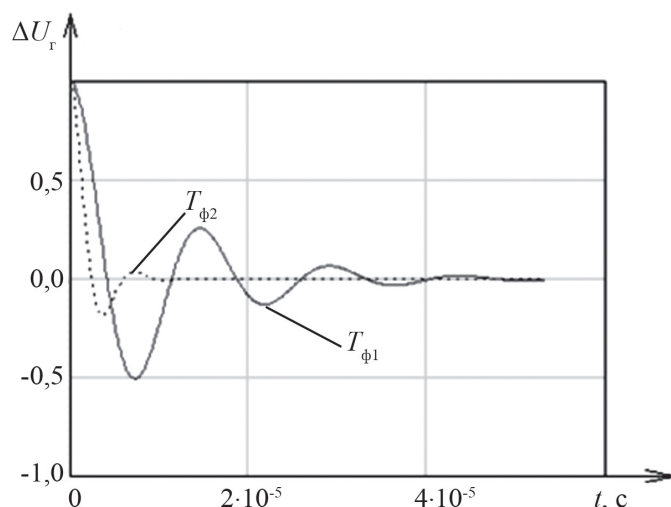


Рис. 2. Временная диаграмма реакции системы на изменение амплитуды напряжения АГ при двух значениях постоянной времени ФНЧ:

$$T_{\phi 1} = 1 \text{ мкс}; T_{\phi 2} = 0,2 \text{ мкс}; T_{\phi 1} > T_{\phi 2}$$

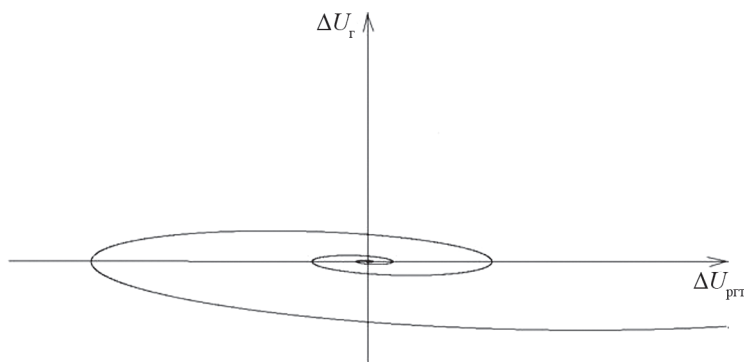


Рис. 3. Фазовый портрет системы при постоянной времени ФНЧ $T_{\phi 2}$

Таким образом, исследована схема RC –АГ с АРА, позволяющая увеличить запас по самовозбуждению и амплитуду гармонических колебаний выходного напряжения. Приведены уравнения, позволяющие рассчитать стационарный и переходной режимы RC –АГ с АРА, изучены локальная устойчивость и вопрос выбора постоянных времени функциональных узлов RC –АГ с АРА.

Литература

1. Хасанова Э.Ш., Гулин А.И., А.Н. Краснов А.Н. Методика измерения температурных полей аппаратов воздушного охлаждения газа // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: Сборник трудов IV Всеросс. заоч. науч.-практ. интернет-конф. Уфа: УГНТУ, 2016. Т. 1. С. 46—50.
2. Гулин А.И. Проектирование многозвенных RC -генераторов // Известия вузов. Серия «Приборостроение». 2012. Т. 56. № 3. С. 14—18.
3. Ларина Е.А., Леонидов В.В., Москалев Н.С. Методика проектирования цифровых систем управления на базе AVR-микроконтроллеров // Международ. науч.-исслед. журнал. 2016. № 6-2 (48). С. 87—94.
4. Набиев Р.Н., Гараев Г.И., Рустамов Р.Р. Сравнительный анализ электрических систем емкостных датчиков // Известия ЮФУ. Серия «Технические науки». 2017. № 3 (188). С. 51—64.
5. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М. Режимные и шумовые характеристики RC -автогенераторов гармонических колебаний // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях: Труды Междунар. науч.-техн. семинара. М.: ООО «Брис-М», 2013. С. 35—37.
6. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М. Исследование режимных и шумовых характеристик RC -автогенераторов гармонических колебаний методом укороченных символических уравнений С.И. Евтянова // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 76—82.
7. Соловьев В.А., Лешев М.С., Азаров В.С. Цифровая коррекция инфракрасных изображений с целью улучшения наблюдения малоразмерных летательных аппаратов // Новая наука: современное состояние и пути развития: Междунар. науч. периодическое издание по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак: АМИ, 2016. Ч. 2. С. 211—215.

8. **Филимонов В.А.** Разработка алгоритма автоматической регулировки усиления для речевого сигнала // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 63—66.
9. **Котлинский С.В., Павлов В.А.** Модель автоматической регулировки усиления приемника канала радиосвязи в среде схемотехнического моделирования Advanced Design System (ADS) // Перспективы развития науки и образования: Сборник науч. трудов по материалам XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: ИП Тугольков А.В., 2017. С. 52—60.
10. **Кононов А.Д., Кононов А.А.** Информационная система определения координат для автоматического управления движением технологических машин строительного комплекса // Научный вестник Воронежского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия «Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах». 2016. № 7. С. 52—57.
11. **Валиуллин Д.Р., Захаров П.Н.** Экспериментальные исследования эквалайзера на основе нейронных сетей с обучением в многолучевом радиоканале // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 12 [Электрон. ресурс] <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/10/text.pdf> (дата обращения 02.02.2018).
12. **Соловьева Е.Б.** Методы линеаризации характеристик усилителей мощности // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С. 41—47.
13. **Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А., Халикова Е.А.** Управление неустойчивыми объектами в составе многосвязной автоматической системы // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 90.
14. **Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М.** Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984.
15. **Юревич Е.И.** Теория автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2016.
16. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. М.: Физматлит, 2010.
17. **Ильин А.В. и др.** Математические методы теории управления. Проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости. М.: Физматлит, 2014.
18. **Цветкова О.Л.** Теория автоматического управления. М.: Директ-Медиа, 2016.
19. **Евтянов С.И.** Избранные статьи. М.: Издат. дом МЭИ, 2013.
3. **Larina E.A., Leonidov V.V., Moskalev N.S.** Metodika Proektirovaniya Cifrovyyh Sistem Upravleniya na Baze AVR-mikrokontrollerov. Mezhdunarod. Nauch.-issled. Zhurnal. 2016;6-2 (48):87—94. (in Russian).
4. **Nabiev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R.** Sravnitel'nyj Analiz Ehlektricheskikh Sistem Emkostnykh Datchikov. Izvestiya YUFU. Seriya «Tekhnicheskie Nauki». 2017;3 (188):51—64. (in Russian).
5. **Kuleshov V.N., Boldyreva T.I., Drozdova E.M.** Rezhimnye i Shumovye Harakteristiki RC-avtogeneratorov Garmonicheskikh Kolebanij. Sistemy Sinhronizacii, Formirovaniya i Obrabotki Signalov v Infokommunikaciyah: Trudy Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Seminara. M.: OOO «Bris-M», 2013:35—37. (in Russian).
6. **Kuleshov V.N., Boldyreva T.I., Drozdova E.M.** Issledovanie Rezhimnyh i Shumovykh Harakteristik RC-avtogeneratorov Garmonicheskikh Kolebanij Metodod Ukorochennykh Simvolicheskikh Uravnenij S.I. Evtyanova. Vestnik MPEI. 2013;5:76—82. (in Russian).
7. **Solov'ev V.A., Leshchev M.S., Azarov V.S.** Cifrovaya Korrekciya Infrakrasnykh Izobrazhenij s Cel'yu Uluchsheniya Nablyudeniya Malorazmernykh Letatel'nykh Apparatov. Novaya Nauka: Sovremennoe Sostoyanie i Puti Razvitiya: Mezhdunar. Nauch. Periodicheskoe Izdanie po itogam Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Sterlitamak: AMI, 2016;2:211—215. (in Russian).
8. **Filimonov V.A.** Razrabotka Algoritma Avtomaticheskoy Regulirovki Usileniya dlya Rechevogo Signala. Cifrovaya Obrabotka Signalov. 2017;4:63—66. (in Russian).
9. **Kotlinskij S.V., Pavlov V.A.** Model' Avtomaticheskoy Regulirovki Usileniya Priemnika Kanala Radiosvyazi v Srede Skhemotekhnicheskogo Modelirovaniya Advanced Design System (ADS). Perspektivy Razvitiya Nauki i Obrazovaniya: Sbornik Nauch. Trudov po Materialam XIV Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. M.: IP Tugol'kov A.V., 2017:52—60. (in Russian).
10. **Kononov A.D., Kononov A.A.** Informacionnaya Sistema Opredeleniya Koordinat dlya Avtomaticheskogo Upravleniya Dvizheniem Tekhnologicheskikh Mashin Stroitel'nogo Kompleksa. Nauchnyj Vestnik Voronezhskogo Gos. Arhitekturno-stroitel'nogo Un-ta. Seriya «Informacionnye Tekhnologii v Stroitel'nyh, Social'nyh i Ehkonomicheskikh Sistemah». 2016;7:52—57. (in Russian).
11. **Valiullin D.R., Zaharov P.N.** Eksperimental'nye Issledovaniya Ehkvalajzera na Osnove Nejronnykh Setej s Obucheniem v Mnogoluchevom Radiokanale. Zhurnal Radioehlektroniki. 2017;12 [Elektron. Resurs] <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/10/text.pdf> (Data Obrashcheniya 02.02.2018). (in Russian).
12. **Solov'eva E.B.** Metody Linearizacii Harakteristik Usilitelej Moshchnosti. Izvestiya SPbGÉHTU «LEHTI». 2015;9:41—47. (in Russian).
13. **Il'yasov B.G., Saitova G.A., Halikova E.A.** Upravlenie Neustojchivymi Ob'ektami v Sostave Mnogosvyaznoj Avtomaticheskoy Sistemy. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2015;1–2:90. (in Russian).

References

1. **Hasanova Eh.Sh., Gulin A.I., A.N. Krasnov A.N.** Metodika Izmereniya Temperaturnykh Polej Apparatov Vozdushnogo Ohlazhdeniya Gaza. Problemy Avtomatizacii Tekhnologicheskikh Processov Dobychi. Transporta i Pererabotki Nefti i Gaza: Sbornik Trudov IV Vseross. Zaoch. Nauch.-prakt. Internet-konf. Ufa: UGNTU, 2016;1:46—50. (in Russian).
2. **Gulin A.I.** Proektirovanie Mnogozvennykh RC-Generatorov. Izvestiya Vuzov. Seriya «Priborostroenie». 2012;56;3:14—18. (in Russian).

14. **Kapranov M.V., Kuleshov V.N., Utkin G.M.** Teoriya Kolebanij v Radiotekhnike. M.: Nauka, 1984. (in Russian).

15. **Yurevich E.I.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. Spb.: BHV-Peterburg, 2016. (in Russian).

16. **Gantmaher F.R.** Teoriya Matric. M.: Fizmatlit, 2010. (in Russian).

17. **Il'in A.V. i dr.** Matematicheskie Metody Teorii Upravleniya. Problemy Ustojchivosti, Upravlyaemosti i Nablyudaemosti. M.: Fizmatlit, 2014. (in Russian).

18. **Cvetkova O.L.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Direkt-Media, 2016. (in Russian).

19. **Evtyanov S.I.** Izbrannye Stat'i. M: Izdat. Dom MPEI, 2013. (in Russian).

Сведения об авторе

Торина Елена Михайловна — кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: Dro.em@yandex.ru

Information about author

Torina Elena M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: Dro.em@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.03.2018