

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.39

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В ВЫХОДНОМ УСИЛИТЕЛЕ

Брюханов Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой инфокоммуникаций и радиофизики ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова».

E-mail: bruhanov@uniyar.ac.ru.

Красавин Кирилл Сергеевич

аспирант ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова».

E-mail: krasskir93@gmail.com.

Адрес: 150000, г. Ярославль, ул. Советская, 14.

Аннотация: Рассматриваются нелинейные искажения немодулированного гармонического сигнала и модулирующего сигнала амплитудно-модулированного сигнала с гармонической модуляцией при прохождении через мощный нелинейный усилитель с безынерционной нагрузкой. Характеристика нелинейного элемента (НЭ) задана при помощи аппроксимирующей функции третьего порядка. Для гармонического сигнала рассмотрены два режима работы НЭ: с отсечкой и без отсечки. Полагали, что демодуляция модулированного сигнала осуществляется с помощью синхронного квадратурного амплитудного детектора. Оценка величины искажений исследуемых сигналов производилась с помощью коэффициента нелинейных искажений. Приведены рассчитанные зависимости коэффициента нелинейных искажений от угла отсечки в случае гармонического сигнала и от коэффициента модуляции амплитудно-модулированного сигнала.

Ключевые слова: нелинейный усилитель, нелинейные искажения, амплитудная модуляция, коэффициент нелинейных искажений, демодуляция.

Введение

Основным звеном передающего тракта радиостанции, влияющим на искажение сигнала, является оконечный мощный усилитель. Для обеспечения высокого коэффициента полезного действия этот каскад работает в нелинейном режиме, обуславливающим искажения выходного сигнала. Нелинейные искажения сигналов в выходных мощных усилителях исследованы в [1–7].

Цель работы – анализ влияния нелинейности выходного мощного усилителя на искажения немодулированного гармонического сигнала и гармонического модулирующего сигнала амплитудно-модулированного (АМ) сигнала.

Усилитель представим как нелинейный четырехполюсник с характеристикой [8]

$$f(u) = u - \frac{1}{3}u^3, \quad (1)$$

где $u \in [0; 1]$, и безынерционной нагрузкой.

Для оценки величины искажений используем коэффициент нелинейных искажений [9]:

$$K_{\text{ни}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K |\dot{C}_k|^2}}{|\dot{C}_1|} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $|\dot{C}_k|$ – амплитуды спектральных составляющих.

Гармонический сигнал

Сигнал на входе усилителя выражается функцией

$$u(t) = U_0 + u_c(t), \quad (3)$$

где U_0 – напряжение смещения.

$$u_c(t) = U \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Оценку величины искажений выполняем в двух режимах работы нелинейного элемента (НЭ): без отсечки и с отсечкой.

Режим без отсечки. При этом величина напряжения смещения составляет $U_0 = 0,5$. Поскольку мгновенные значения u находятся в

диапазоне $u \in [0; 1]$, то при $U_0 = 0,5$ имеем $U_{max} = 0,5$.

Сигнал на выходе НЭ согласно (1), (3) и (4) представим в виде:

$$u_{\text{вых}}(\xi) = a_0 + a_1 \cos \xi + a_2 \cos 2\xi + a_3 \cos 3\xi,$$

где

$$\xi = (\omega t + \varphi); \quad a_0 = U_0 \left(1 - \frac{1}{3}U_0^2 - \frac{1}{3}U^2\right);$$

$$a_1 = U \left(1 - U_0^2 - \frac{1}{4}U^2\right); \quad a_2 = -\frac{1}{2}U_0U^2;$$

$$a_3 = -\frac{1}{12}U^3.$$

Результаты расчёта коэффициента нелинейных искажений представлены на рис. 1.

Расчёты показывают, что при амплитуде входного напряжения $U = 0,5$ коэффициент нелинейных искажений достигает 17,63%.

Режим с отсечкой. Этот режим существует при $U_0 < 0,5$. Чтобы использовать весь диапазон $u \in [0; 1]$ величину U надо выбирать из условия $U = 1 - U_0$.

Для случая режима работы НЭ с отсечкой функция $f(u)$, в отличие от (1), имеет вид:

$$f(u) = u_{\text{вых}}(t) = \begin{cases} u - \frac{1}{3}u^3, & \text{при } 0 \leq u \leq 1; \\ 0, & \text{при } -1 \leq u < 0. \end{cases}$$

Спектр функции $f(u) = u_{\text{вых}}(t)$ определим с помощью ряда Фурье [9]:

$$u_{\text{вых}}(\xi) = \sum_{k=1}^K 2|\dot{C}_k| \cos(k\xi + \theta_k),$$

где

$$\dot{C}_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\xi) \times e^{-jk\xi} d\xi,$$

$$\theta_k = \arg \dot{C}_k.$$

Коэффициент нелинейных искажений находим по формуле (2).

Расчет $K_{\text{НИ}}$ произведен в среде Matlab для $U_0 \in [0; 0,5]$. На рис. 2 представлена зависимость $K_{\text{НИ}}$ от угла

отсечки θ , где $\cos \theta = -U_0/U$.

Расчёты показывают, что при угле отсечки 90° величина $K_{\text{НИ}}$ достигает 39,61%.

Амплитудно-модулированный сигнал

Сигнал с гармонической амплитудной модуляцией на входе усилителя представим в виде выражения (3), в котором

$$u_c(t) = A(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (5)$$

где $m = \Delta A/A$ – коэффициент модуляции.

Величина напряжения смещения составляет $U_0 = 0,5$. Сигнал на выходе НЭ согласно (1), (3) и (5) выражается следующим образом:

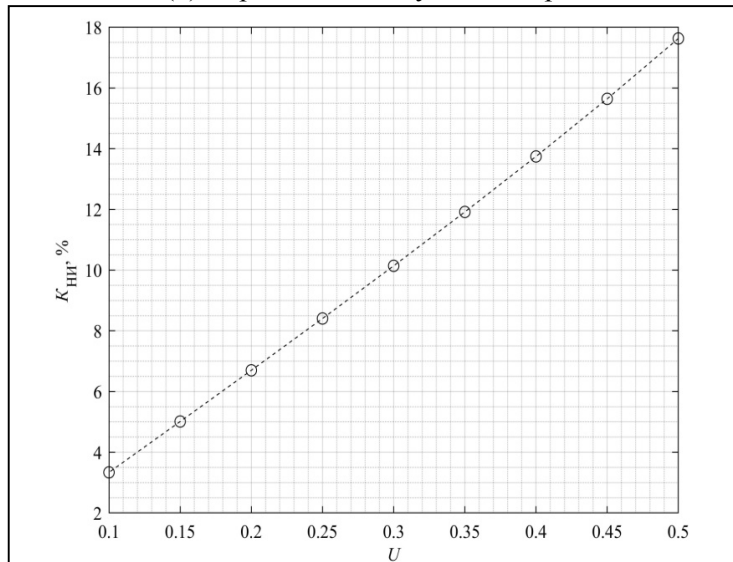


Рис. 1. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от амплитуды сигнала в режиме без отсечки

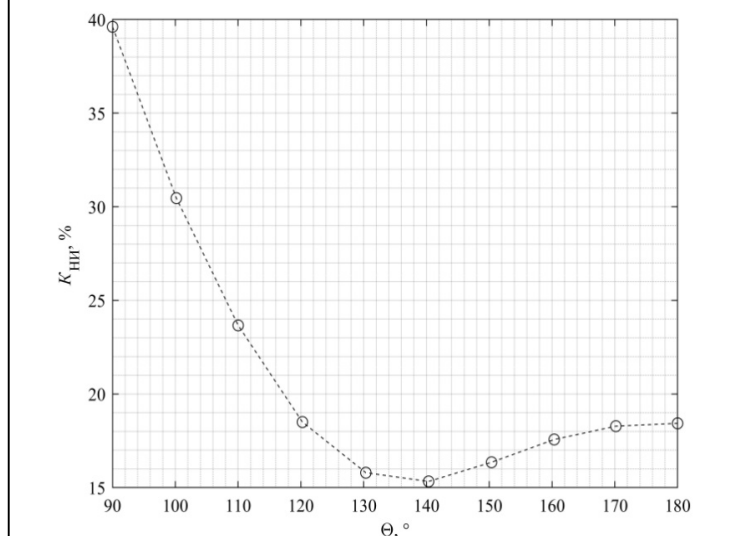


Рис. 2. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от угла отсечки

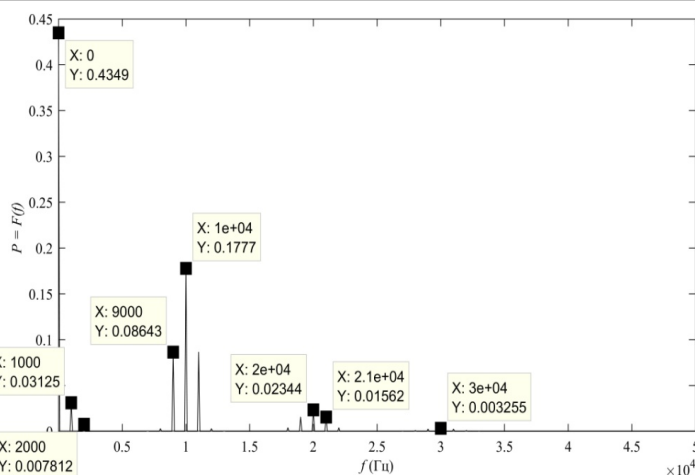


Рис. 3. Спектр АМ-сигнала на выходе нелинейного элемента

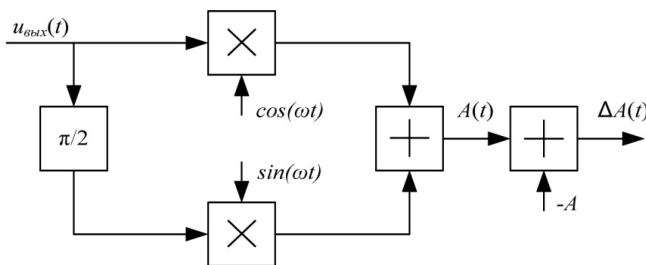


Рис.4. Структурная схема синхронного квадратурного амплитудного детектора

$$u_{\text{вых}}(t) = b_0 + b_1 \cos \gamma + b_2 \cos 2\gamma + b_3 \cos \xi + b_4 \cos(\xi \pm \gamma) + b_5 \cos(\xi \pm 2\gamma) + b_6 \cos(\xi \pm 3\gamma) + b_7 \cos 2\xi + b_8 \cos(2\xi \pm \gamma) + b_9 \cos(2\xi \pm 2\gamma) + b_{10} \cos 3\xi + b_{11} \cos(3\xi \pm \gamma) + b_{12} \cos(3\xi \pm 2\gamma) + b_{13} \cos(3\xi \pm 3\gamma),$$

где

$$b_0 = U_0 \left(1 - \frac{1}{3} U_0^2 - \frac{1}{2} A^2 \left[1 + \frac{1}{2} m^2 \right] \right);$$

$$b_1 = -U_0 A^2 m; \quad b_2 = -\frac{1}{4} U_0 A^2 m^2;$$

$$b_3 = A \left(1 - U_0^2 - \frac{1}{4} A^2 \left[1 + \frac{3}{2} m^2 \right] \right);$$

$$b_4 = \frac{1}{2} A m \left(1 - U_0^2 - \frac{3}{4} A^2 \left[1 + \frac{1}{4} m^2 \right] \right);$$

$$b_5 = -\frac{3}{16} A^3 m^2; \quad b_6 = -\frac{1}{32} A^3 m^3;$$

$$b_7 = -\frac{1}{2} U_0 A^2 \left(1 + \frac{1}{2} m^2 \right);$$

$$b_8 = -\frac{1}{2} U_0 A^2 m; \quad b_9 = -\frac{1}{8} U_0 A^2 m^2;$$

$$b_{10} = -\frac{1}{12} A^3 \left(1 + \frac{3}{2} A^2 m^2 \right);$$

$$b_{11} = -\frac{1}{8} A^3 m \left(1 + \frac{1}{4} m^2 \right);$$

$$b_{12} = -\frac{1}{16} A^3 m^2;$$

$$b_{13} = -\frac{1}{96} A^3 m^3;$$

$$\gamma = \Omega t; \quad \xi = \omega t.$$

Спектр сигнала на выходе НЭ при $m = 1$ представлен на рис. 3. Здесь частота несущего колебания $f = 10$ кГц, частота модулирующего колебания $F = 1$ кГц.

Полагали, что демодуляция сигнала осуществляется при помощи синхронного квадратурного амплитудного детектора [10], структурная схема которого представлена на рис. 4. Здесь $A(t)$ – огибающая АМ-сигнала, $\Delta A(t)$ – модулирующий сигнал.

При квадратурной демодуляции частота каждой спектральной составляющей входного сигнала уменьшается на величину ω . Спектр демодулированного сигнала при

$m = 1$ представлен на рис. 5.

В спектре демодулированного сигнала кроме первой и второй гармоник модулирующего сигнала присутствуют и высокочастотные составляющие. При наличии фильтра выходного сигнала передатчика (например, с использованием фильтра низких частот) высокочастотные составляющие могут быть подавлены, поэтому расчёты $K_{\text{ни}}$ модулирующего сигнала для АМ-сигнала производились для двух случаев: с учётом и без учёта высокочастотных составляющих.

На рис. 6 представлены графики зависимости $K_{\text{ни}}$ модулирующего сигнала от коэффициента амплитудной модуляции m с учётом (а) и без учёта (б) высокочастотных составляющих.

Расчёты показывают, что без учёта высокочастотных составляющих величина $K_{\text{ни}}$ на порядок меньше, чем с учётом. В первом случае с увеличением коэффициента m происходит рост величины $K_{\text{ни}}$. В случае учёта высокочастот-

ных составляющих с увеличением коэффициента m величина $K_{ни}$ уменьшается.

Заключение

В работе установлены зависимости нелинейных искажений гармонического сигнала и модулирующего сигнала амплитудно-модулированного сигнала при их прохождении через нелинейный усилитель с безынерционной нагрузкой. Результаты работы могут использоваться при проектировании передающих трактов радиотехнических систем передачи информации.

Литература

1. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. М.: Связь, 1966. 400 с.
2. Liang C., Jong J., Stark W.E., East J.R. Non-linear Amplifier Effects in Communications Systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. August 1999. Vol. 47. No. 8. Pp. 1461–1466.
3. Jantunen P., Gamez G., Laakso T. Measurements and Modelling of Nonlinear Power Amplifiers // Proceedings of the 6th Nordic Signal Processing Symposium – NORSIG 2004. Espoo, Finland. June 2004. Pp. 328–331.
4. Красавин К.С., Брюханов Ю.А., Дубов М.А., Поелуев С.С. Анализ влияния нелинейности усилителя мощности на сигналы с цифровыми видами модуляции // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2018): докл. 20-й междунар. конф. М. 2018. Т. 1. С. 395–400.

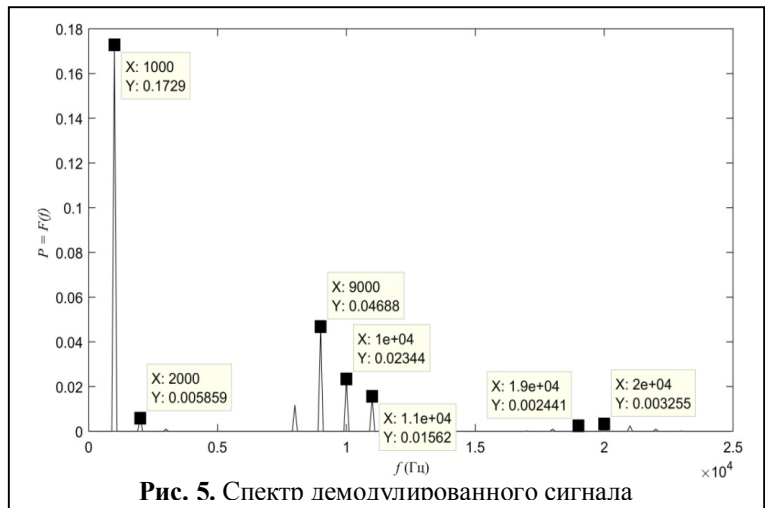


Рис. 5. Спектр демодулированного сигнала

5. Lin F-L., Chen S-F., Chuang H-R. Effects of RF-circuit Nonlinear Distortion on Digitally Modulated Signals in Wireless Communication // Microwave Journal. September, 2000. Vol. 43. No. 9. Pp. 126–138.
6. Смирнов А.В. Исследование эффекта АМ-РМ искажений при высокоэффективном усилении мощности // Электросвязь. 2016. № 4. С. 61–64.
7. Aschbacher E., Rupp M. Modelling and Identification of a Nonlinear Power-Amplifier with Memory for Nonlinear Digital Adaptive Pre-Distortion // 4th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications – SPAWC 2003. Rome, Italy. August, 2004. Pp. 658–662.
8. Kharchenko V., Grekhov A., Ali I. Influence of Nonlinearity on Aviation Satellite Communication Channel Parameters // Proceedings of the National Aviation University. 2015. No. 4 (65). Pp. 12–21.
9. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: ЛЕНАНД, 2016. 528 с.
10. Фомин Н.Н. [и др.] Радиоприёмные устройства. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 520 с.

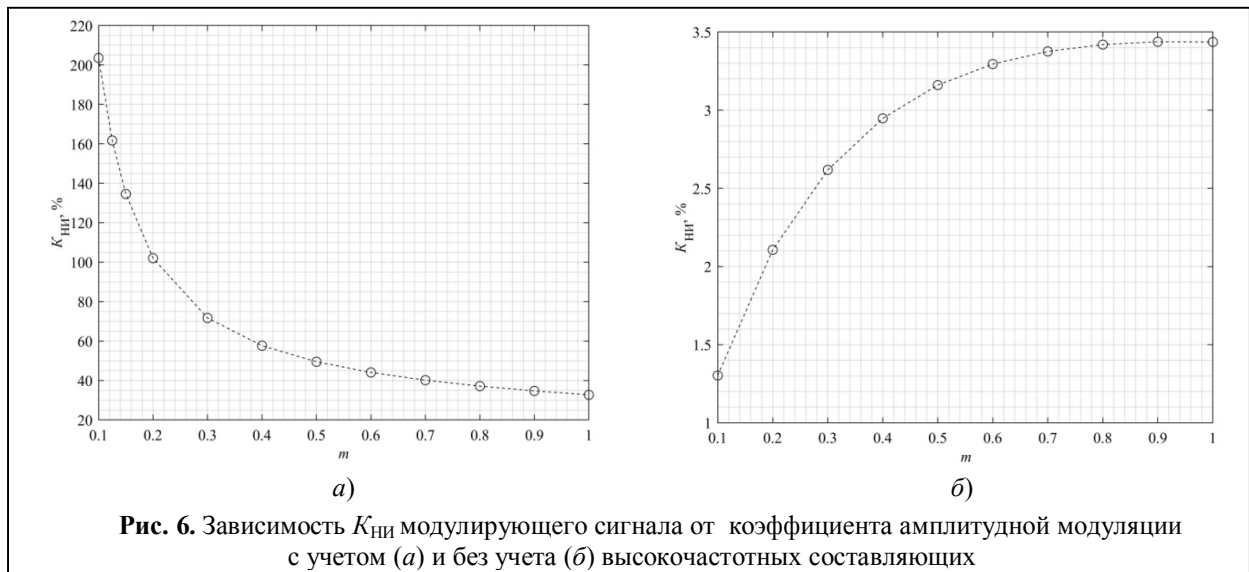


Рис. 6. Зависимость $K_{ни}$ модулирующего сигнала от коэффициента амплитудной модуляции с учетом (а) и без учета (б) высокочастотных составляющих

Поступила 18 июля 2018 г.

English

NONLINEAR SIGNAL DISTORTION IN THE OUTPUT AMPLIFIER

Yuri Alexandrovich Bryukhanov – Doctor of Engineering, Professor; Head of the Department of Infocommunications and Radiophysics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State University named after P.G. Demidov".

E-mail: bruhanov@uniyar.ac.ru.

Kirill Sergeyevich Krasavin – Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State University named after P.G. Demidov".

E-mail: krasskir93@gmail.com.

Address: 150000, Yaroslavl, Sovetskaya str., 14.

Abstract: The paper is dedicated to the study of the characteristic nonlinearity effect of the output power amplifier on the signal distortion. There are considered the distortions of the unmodulated harmonic signal and the harmonic modulating signal of the amplitude-modulated signal when passing through a powerful nonlinear amplifier with the inertia-free load. The nonlinear component (NC) characteristic is preset by the cubic polynomial. The distortion degree is estimated via the nonlinear distortion coefficient. NC two operation modes with and without current cutoff are examined for the harmonic signal. It is demonstrated that distortions are proportional to the input voltage amplitude and the coefficient nonlinear distortion comes to 17.63% with 0.5 voltage value and without cutoff. In the cutoff mode, there is a significant dependence of distortion on the cutoff angle. The nonlinear distortion coefficient value rises from 15% up to 40% with the cutoff angle decrease from 1400 to 900. The expressions are obtained and the spectral composition diagram of the amplifier output signal under the influence of amplitude-modulated signal with harmonic modulation is presented. It was believed that the signal demodulation is performed using the synchronous quadrature amplitude detector. The spectral composition is defined and the spectral diagram of the demodulated signal is given. It is demonstrated that besides the first and second harmonics of the modulating signal in the demodulated signal spectrum there are high-frequency components as two amplitude-modulated signals with the carrier frequency of the input modulated signal and its second harmonic. The calculated dependences of the modulating signal nonlinear distortion coefficient on the amplitude modulation coefficient are presented with and without consideration of the high-frequency components of the demodulated signal spectrum.

Keywords: nonlinear amplifier, nonlinear distortions, amplitude modulation, nonlinear distortion coefficient, demodulation.

References

1. *Mamonkin I.G.* Amplifying devices. M.: Svyaz, 1966. 400 p.
2. *Liang C., Jong J., Stark W.E., East J.R.* Nonlinear Amplifier Effects in Communications Systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. August 1999. Vol. 47. No. 8. Pp. 1461–1466.
3. *Jantunen P., Gamez G., Laakso T.* Measurements and Modelling of Nonlinear Power Amplifiers // Proceedings of the 6th Nordic Signal Processing Symposium – NORSIG 2004. Espoo, Finland. June 2004. Pp. 328–331.
4. *Krasavin K.S., Bryukhanov Yu.A., Dubov A.M., Poeluev S.S.* Power amplifier non-linearity effect analysis on digitally modulated signals // Digital signal processing and its application (DSPA-2018): Papers of the 20-th Intern. Conf. Moscow. 2018. Vol. 1. Pp. 395–400.
5. *Lin F-L., Chen S-F., Chuang H-R.* Effects of RF-circuit Nonlinear Distortion on Digitally Modulated Signals in Wireless Communication // Microwave Journal. September, 2000. Vol. 43. No. 9. Pp. 126–138.
6. *Smirnov A.V.* Research of AM-PM distortion effect with highly efficient poer amplification // *Elektrosvyaz*. 2016. No. 4. Pp. 61–64.
7. *Aschbacher E., Rupp M.* Modelling and Identification of a Nonlinear Power-Amplifier with Memory for Non-linear Digital Adaptive Pre-Distortion // 4th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications - SPAWC 2003. Rome, Italy. August, 2004. Pp. 658–662.
8. *Kharchenko V., Grekhov A., Ali I.* Influence of nonlinearity on Aviation Satellite Communication Channel Parameters // Proceedings of the National Aviation University. 2015. No. 4 (65). Pp. 12–21.
9. *Baskakov S.I.* Radio circuits and signals. Moscow : LENAND, 2016. 528 p.
10. *Fomin N.N.* [and other colleagues] Radio receivers. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007. 520 p.