

УДК 621.396

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА, ИССЛЕДУЕМОГО НЕЛИНЕЙНЫМ РАДИОЛОКАТОРОМ

В.М. ЧЕРТКОВ, В.К. ЖЕЛЕЗНЯК

*Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 27 октября 2017*

**Аннотация.** Представлена имитационная модель формирования, обнаружения и оценки избирательным приемом уровней комбинационных составляющих зондирующего амплитудно-модулированного сигнала с подавленной несущей. Определены уровни высших комбинационных составляющих от боковых частот зондирующего сигнала после переизлучения от нелинейной вольтамперной характеристики с большими уровнями амплитуд по сравнению с традиционными гармониками односоставного гармонического излучаемого сигнала. Теоретически обоснован способ распознавания типа нелинейности радиоэлектронного средства съема информации. Представлены результаты расчета степенных коэффициентов второго и третьего порядков полинома, аппроксимирующего вольтамперную характеристику радиоэлектронного средства.

**Ключевые слова:** радиоэлектронное средство, скрытый съем информации, распознавание вида нелинейности, вольтамперная характеристика, зондирующий АМ-сигнал с подавленной несущей.

**Abstract.** The imitation mathematical model of formation, detection and estimation of reception levels of combinatorial constituents the probing amplitude-modulated signal is presented. The levels of the higher combinational components from the side frequency of the probing signal are determined. They were obtained after reflection from a nonlinear current-voltage characteristic and have a higher level of amplitudes in comparison with the traditional harmonic probing signal. Theoretical substantiation of the nonlinearities types recognizing method of radioelectronic devices is given. Calculation results of the second and third order degree coefficients of polynomial approximating the current-voltage characteristic of a radio electronic means are presented.

**Keywords:** radioelectronic devices, receive of hidden information, the reduction method of nonlinearity, current-voltage characteristic, the probing DSB-signal.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 110, No. 8, pp. 60-66**  
**Determination of current-voltage characteristic nonlinearity**  
**of an surveyed object by a nonlinear radar**  
**V.M. Chertkov, V.K. Zheleznjak**

### Введение

Высокая скрытность и помехоустойчивость радиоэлектронных средств (РЭС) съема информации в различных режимах работы обуславливает необходимость совершенствования методов и алгоритмов их обнаружения и идентификации в условиях значительной неопределенности [1]. Важным требованием, предъявляемым к средствам обнаружения РЭС, является высокая вероятность правильного обнаружения и точная локализация. Нелинейный радиолокатор (НРЛ) является одним из самых эффективных средств обнаружения РЭС. При всем разнообразии современных НРЛ и методов поиска достигнутая вероятность правильного обнаружения в 70 % не удовлетворяет требуемому порогу [2]. Таким образом, возникла научная задача повышения вероятности правильного обнаружения в условиях значительной неопределенности. Одним из методов ее решения является использование зондирующего амплитудно-модулируемого сигнала (АМ-сигнал) с подавленной несущей [3].

## Постановка задачи

Целью работы является обоснование и разработка способа установления нелинейности вольтамперной характеристики (ВАХ) РЭС, позволяющего повысить вероятность правильного обнаружения. На основании анализа современных методов поиска и обнаружения РЭС установлено, что наиболее эффективным критерием, характеризующим увеличение вероятности правильного обнаружения, выступает ВАХ РЭС [2]. Рассмотрев структуру спектра переизлученного зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей нелинейностью ВАХ, были выявлены высшие комбинационные составляющие от боковых гармоник зондирующего сигнала (ЗС) на частоте удвоенной несущей ( $2\omega_0$ ) и комбинации частот ( $3\omega_0 - \Delta\omega$ ) и  $(\omega_0 - \Delta\omega)$ , которые имеют большие уровни амплитуд по сравнению с традиционными гармониками односоставного гармонического излучаемого сигнала [4] и численные значения  $a_2 \cdot U_{m1} \cdot U_{m2}$ ,  $\frac{3 \cdot a_3 \cdot U_{m2} \cdot U_{m1}^2}{4}$  и  $a_1 \cdot U_{m1}$  соответственно, где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – коэффициенты степенного полинома третьей степени, аппроксимирующего ВАХ;  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  – амплитуды нижней и верхней боковых составляющих ЗС. Выявленные комбинационные компоненты влияют на дальность и вероятность правильного обнаружения РЭС [5].

## Определение нелинейности вольтамперной характеристики

Разработана имитационная модель формирования, обнаружения и оценки избирательным приемом уровней высших комбинационных составляющих зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей [4]. Структура модели представлена на рис. 1.

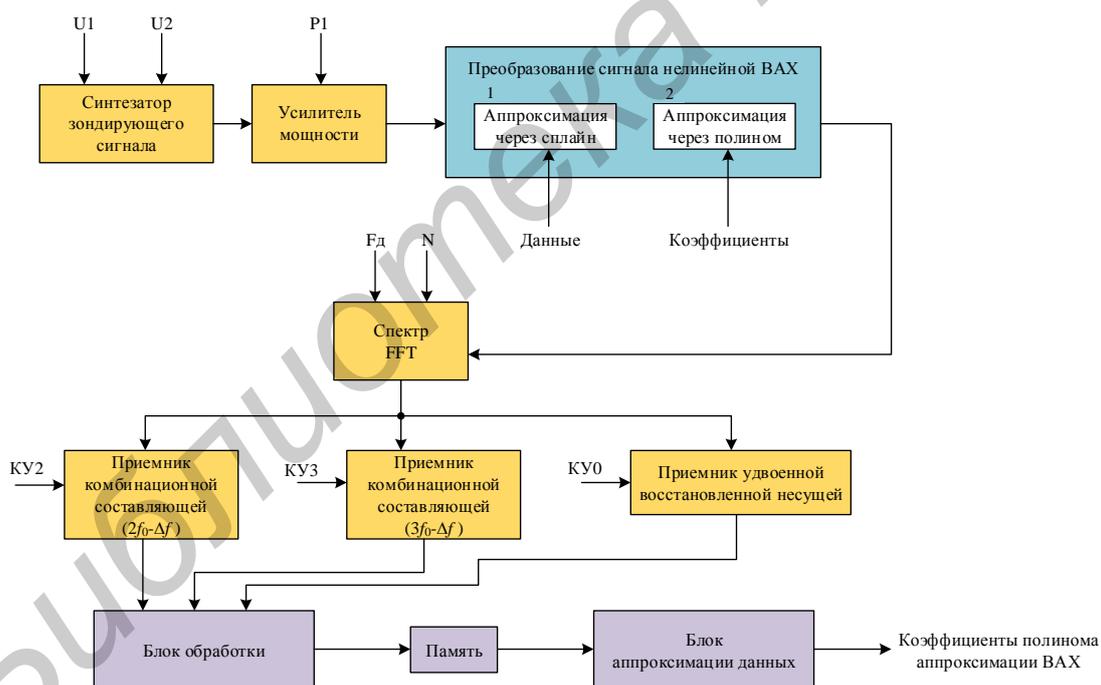


Рис. 1. Структура имитационной модели

Модель имеет следующий функционал: выбор типа зондирующего сигнала (односоставной гармонический или АМ-сигнал с подавленной несущей); управление уровнями боковых составляющих зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей; управление мощностью излучения по задаваемому алгоритму; оценка уровней высших гармоник переизлученного зондирующего сигнала; управление коэффициентами усиления в каждом канале приема; возможность оценки влияния маскирующих шумов; возможность задания реальных ВАХ, которые представлены сложной аппроксимацией сплайнами экспериментальных табличных данных [3]; настройка частоты дискретизации и размерности окна быстрого преобразования Фурье для оценки уровней спектральных компонент сигнала отклика.

Формирование зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей происходит в соответствующем блоке, затем он усиливается и передается в антенну и излучается в направлении на объект, имеющий нелинейную ВАХ. ЗС переизлучается, и приемная система фиксирует уровни на удвоенной восстановленной несущей, комбинационных составляющих третьей гармоники и на нижней боковой частоте подавленной несущей со своими коэффициентами усиления в каждом канале.

Получаемые данные в процессе моделирования обрабатываются по алгоритму определения нелинейности ВАХ исследуемого РЭС путем расчета коэффициентов степенного полинома, аппроксимирующего его ВАХ. Он включает последовательно выполняемые операции.

*Операция 1.* Устанавливается разница в значениях уровней  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ , боковых составляющих зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей на фиксированное значение  $\Delta U$ .

$$U_{m1} = (U_0 + \Delta U), U_{m2} = U_0, \quad (1)$$

где  $U_0$  – фиксированное базовое значение уровня амплитуды для формирования ЗС в НРЛ.

*Операция 2.* Устанавливается мощность излучения на фиксированном уровне  $power1 = C_p$ , где  $C_p$  – константное значение, соответствующее мощности излучения ЗС в направлении на РЭС. Амплитуды излучаемых боковых составляющих ЗС принимают вид

$$\begin{cases} U_{m1} = (U_0 + \Delta U) \cdot power1, \\ U_{m2} = (U_0) \cdot power1. \end{cases} \quad (2)$$

Сформированный ЗС излучается в направлении на РЭС.

*Операция 3.* Фиксируется значения амплитуд выявленных комбинационных составляющих  $A_0^1$ ,  $A_1^1$  и  $A_3^1$ , соответствующих частотам  $2\omega_0$ ,  $\omega_0 - \Delta\omega$  и  $3\omega_0 - \Delta\omega$  соответственно в спектре переизлученного ЗС.

$$A_1^1 = a_1 U_{m1} + КУ1, \quad (3)$$

$$A_0^1 = 20 \lg(a_2 U_{m1} U_{m2}) + КУ0, \quad (4)$$

$$A_3^1 = 20 \lg\left(\frac{3a_3 U_{m2} U_{m1}^2}{4}\right) + КУ3, \quad (5)$$

где  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  – кубический, квадратичный и линейные коэффициенты степенного полинома, аппроксимирующего ВАХ РЭС; КУ0, КУ3, КУ1 – коэффициенты усиления приемного модуля НРЛ, настроенного на гармоники с частотой удвоенной несущей ( $2\omega_0$ ), гармонику с частотой разности утроенной несущей и модулирующей ( $3\omega_0 - \Delta\omega$ ), на гармонику боковой составляющей ЗС ( $\omega_0 - \Delta\omega$ ) соответственно.

*Операция 4.* Повышается мощность излучения ЗС на заданный коэффициент  $\Delta_{power}$ :

$$power2 = power1 + \Delta_{power}. \quad (6)$$

Амплитуды излучаемых боковых составляющих ЗС принимают вид

$$\begin{cases} U_{m3} = (U_0 + \Delta U) \cdot power2, \\ U_{m4} = (U_0) \cdot power2. \end{cases} \quad (7)$$

Сформированный ЗС излучается в направлении на РЭС.

*Операция 5.* Фиксируется значения амплитуд выявленных комбинационных составляющих  $A_0^2$  и  $A_3^2$ , соответствующих частотам  $2\omega_0$  и  $3\omega_0 - \Delta\omega$  соответственно.

$$A_0^2 = 20 \lg(a_2 U_{m3} U_{m4}) + КУ0. \quad (8)$$

$$A_3^2 = 20 \lg\left(\frac{3a_3 U_{m4} U_{m3}^2}{4}\right) + КУ3. \quad (9)$$

*Операция 6.* Увеличивается разница амплитуд боковых составляющих ЗС на удвоенное значение  $\Delta U$ .

$$\begin{cases} U_{m5} = (U_0 + 2 \cdot \Delta U) \cdot power2, \\ U_{m6} = (U_0) \cdot power2. \end{cases} \quad (10)$$

Сформированный ЗС излучается в направлении на РЭС.

*Операция 7.* Фиксируется значения амплитуд комбинационных составляющих  $A_0^3$  и  $A_3^3$ , соответствующих частотам  $2\omega_0$  и  $3\omega_0 - \Delta\omega$  соответственно.

$$A_0^3 = 20\lg(a_2 U_{m5} U_{m6}) + \text{КУ}0. \quad (11)$$

$$A_3^3 = 20\lg\left(\frac{4a_2}{3a_3 U_{m5}}\right) + \text{КУ}3. \quad (12)$$

*Операция 8.* По измеренным значениям уровней на операциях 3, 5, 7 рассчитывается мощность НРЛ, с которой был излучен ЗС.

Оценивается разность уровней комбинационной составляющей на частоте удвоенной несущей ЗС, измеренных на операциях 3 и 5, отличающихся между собой мощностью излучения в соответствии с выражениями (4) и (8).

$$A_0^2 - A_0^1 = 20\lg(a_2 U_{m3} U_{m4}) + \text{КУ}0 - (20\lg(a_2 U_{m1} U_{m2}) + \text{КУ}0).$$

$$A_0^2 - A_0^1 = 20\lg\left(\frac{a_2 U_{m3} U_{m4}}{a_2 U_{m1} U_{m2}}\right) + \text{КУ}0 - \text{КУ}0.$$

$$\frac{U_{m3} U_{m4}}{U_{m1} U_{m2}} = 10^{\frac{A_0^2 - A_0^1}{20}}. \quad (13)$$

Выразив амплитуды напряжений через базовое значение  $U_0$  и мощность излучения ЗС, соответствующие выражениям (2) и (7), получим:

$$\frac{(U_0 + \Delta U) \cdot \text{power}2 \cdot (U_0) \cdot \text{power}2}{(U_0 + \Delta U) \cdot \text{power}1 \cdot (U_0) \cdot \text{power}1} = 10^{\frac{A_0^2 - A_0^1}{20}},$$

$$\frac{\text{power}2 \cdot \text{power}2}{\text{power}1 \cdot \text{power}1} = 10^{\frac{A_0^2 - A_0^1}{20}},$$

$$\frac{\text{power}2}{\text{power}1} = \sqrt{10^{\frac{A_0^2 - A_0^1}{20}}}. \quad (14)$$

Так как значение  $\Delta_{\text{power}}$  повышения мощности известно и фиксировано, то можно составить систему уравнений из выражений (14) и (6):

$$\begin{cases} \frac{\text{power}2}{\text{power}1} = \sqrt{10^{\frac{A_0^2 - A_0^1}{20}}}, \\ \text{power}2 = \text{power}1 + \Delta_{\text{power}}. \end{cases} \quad (15)$$

Решением системы уравнений (15) является расчетная мощность ЗС, излученного НРЛ.

*Операция 9.* Рассчитывается фиксированное начальное значение уровня амплитуды для формирования ЗС. Оценим разность гармоник на частоте удвоенной несущей ЗС, измеренных на операциях 5 и 7, отличающихся между собой разностью амплитуд боковых составляющих ЗС, в соответствии с выражениями (7) и (10):

$$A_0^3 - A_0^2 = 20\lg(a_2 U_{m5} U_{m6}) + \text{КУ}0 - (20\lg(a_2 U_{m3} U_{m4}) + \text{КУ}0),$$

$$A_0^3 - A_0^2 = 20\lg\left(\frac{a_2 U_{m5} U_{m6}}{a_2 U_{m3} U_{m4}}\right) + \text{КУ}0 - \text{КУ}0,$$

$$\frac{U_{m5} U_{m6}}{U_{m3} U_{m4}} = 10^{\frac{A_0^3 - A_0^2}{20}}. \quad (16)$$

Выразив значение напряжений через базовое значение и мощность излучения ЗС, соответствующие выражениям (2) и (7), получим

$$\frac{(U_0 + 2 \cdot \Delta U) \cdot \text{power}2 \cdot (U_0) \cdot \text{power}2}{(U_0 + \Delta U) \cdot \text{power}2 \cdot (U_0) \cdot \text{power}2} = 10^{\frac{A_0^3 - A_0^2}{20}}. \quad (17)$$

Принимая во внимание тот факт, что  $\Delta U$  известно и фиксировано, можно определить базовое значение уровня амплитуды  $U_0$  для формирования ЗС в НРЛ:

$$U_0 = \frac{\Delta U \cdot \left( 2 - 10^{\frac{A_0^3 - A_0^2}{20}} \right)}{10^{\frac{A_0^3 - A_0^2}{20}} - 1} \quad (18)$$

*Операция 10.* Фиксирование расчетных и измеренных данных во внешней памяти.

На основании полученных расчетным путем данных на операциях 8 и 9, которые соответствуют выражениям (15) и (18), определяются значения уровней амплитуд боковых составляющих  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  ЗС. В память заносятся данные, полученные в процессе оценки численных значений уровней комбинационных составляющих  $A_0^1$ ,  $A_1^1$  и  $A_3^1$ , согласно операции 3, и расчетные значения амплитуд  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ . Прежде чем алгоритм перейдет к операции 11, будет произведено накопление данных путем повторений всех предыдущих операций. Количество повторений напрямую влияет на точность определения типа нелинейности ВАХ. Для высокой точности необходимо выполнить как минимум пять повторений. Также для повышения точности применяется процедура усреднения многократного измерения значений уровней на операциях 3, 5 и 7.

*Операция 11.* Аппроксимация накопленных данных для определения степенных коэффициентов.

Накопленные данные аппроксимируются методом наименьших квадратов для каждого степенного коэффициента по отдельности. Вычисление квадратичного коэффициента  $a_2$  степенного полинома, аппроксимирующего ВАХ, выполняется по функции  $y = 20 \lg(a_2 \cdot x) + КУ0$ , где в качестве аргумента  $x$  подставляются значения амплитуд боковых составляющих излучаемого ЗС, а в качестве  $y$  – измеренные значения уровней на частоте удвоенной несущей сигнала отклика, которые соответствует выражению (4), где коэффициент  $\hat{E}00$  является постоянным и соответствует коэффициенту усиления приемного модуля НРЛ соответствующего канала приема, поэтому считается известной величиной. Реальное же его числовое значение определяется до начала проведения исследований специальными тестовыми маркерами, позволяющими откалибровать приемные модули НРЛ.

Вычисление линейного и кубического степенных коэффициентов производится аналогичным образом в соответствии с выражениями (3) и (5).

### Результаты вычислительного эксперимента

Для проведения вычислительного эксперимента по определению нелинейности ВАХ, задаваемой численными значениями степенных коэффициентов полинома третьей степени путем задания соответствующих коэффициентов, устанавливались следующие значения: степенные коэффициенты, числовые равные:  $a_3 = 0,23$ ;  $a_2 = 0,54$ ;  $a_1 = 0,13$ ; фиксированное базовое значение уровня амплитуды для формирования ЗС в НРЛ  $U_0 = 0,001$  В, которое в процессе перехода к следующему эксперту меняет свое значение добавлением случайного числа в пределах от 0 до 0,1 В; разница в значениях уровней боковых составляющих зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей на фиксированное значение  $\Delta U = 0,0001$  В; начальная мощность излучения  $power1 = 3$  дБм, которая в процессе перехода к следующему эксперту меняет свое значение, добавляя случайное число в пределах от 0 до 3 дБм; КУ0 – коэффициент усиления приемного модуля НРЛ, настроенного на гармонику с частотой удвоенной несущей ЗС; КУ3 – коэффициент усиления приемного модуля НРЛ, настроенного на гармонику с частотой удвоенной несущей ЗС; КУ1 – коэффициент усиления приемного модуля НРЛ, настроенного на гармонику боковой составляющей ЗС; повышение мощности излучения ЗС на заданный коэффициент  $\Delta_{power} = 3$  дБм.

На рис. 2 переставлены результаты вычислительных экспериментов по расчету кубического и квадратичного коэффициентов степенного полинома.

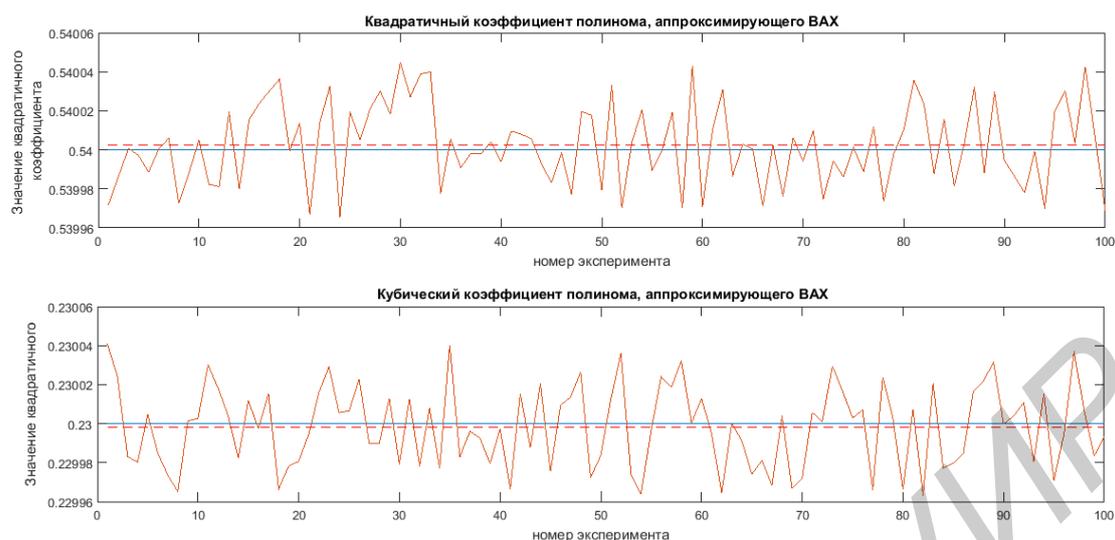


Рис. 2. Расчет степенных коэффициентов второго и третьего порядков полинома, аппроксимирующего ВАХ РЭС

Разность между максимальным и минимальным значением расчетного значения квадратичного коэффициента степенного полинома составляет  $7,9262 \cdot 10^{-5}$ , разность максимального и минимального значения для кубического коэффициента составляет  $7,7477 \cdot 10^{-5}$ . Это свидетельствует о высокой точности получения коэффициентов степенного полинома, аппроксимирующего ВАХ исследуемого объекта.

### Заключение

Предложен принципиально новый способ получения типа нелинейности ВАХ объекта исследования на основе использования специального зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей. Разработанный способ позволяет установить тип нелинейности определением числовых значений коэффициентов полинома, аппроксимирующего нелинейную ВАХ РЭС, по полученным данным уровней комбинационных составляющих от боковых гармоник ЗС. В результате вычислительных экспериментов установлено, что точность расчета коэффициентов степенного полинома зависит от стабильности коэффициентов усиления каждого канала приема, которые должны устанавливаться, калиброваться перед началом работы и контролироваться в процессе работы НРЛ. Оценка точности соответствия расчетных степенных коэффициентов производилась на основе вычисления максимального отклонения от задаваемых значений и соответствует порядку  $10^{-4}$ , что существенно повлияет на повышение вероятности правильного обнаружения РЭС.

### Список литературы

1. Чертков В.М., Мальцев С.В. Поиск и обнаружение нелинейных объектов с распознаванием типа нелинейности на основе их электрофизических свойств // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2013. № 4. С. 105–109.
2. Чертков В.М., Железняк В.К. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации радиоэлектронных средств скрытого съема информации // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 4. С. 99–105.
3. Чертков В.М., Мальцев С.В. Использование фазоманипулированного сигнала в задачах нелинейной радиолокации // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2010. № 3. С. 129–134.
4. Чертков В.М., Железняк В.К. Математическая модель оценки избирательным приемом уровней высших гармоник зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей для определения типа нелинейности цели // Современные средства связи: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 20–21 октября 2016 г. С. 227–228.
5. Чертков В.М., Железняк В.К. Повышение вероятности обнаружения радиоэлектронных средств на основе оценки параметров переотраженного зондирующего сигнала // Комплексная защита информации: материалы XXII науч.-практ. конф., Полоцк, 16–19 мая 2017 г. С. 129–131.

## References

1. Chertkov V.M., Mal'cev S.V. Poisk i obnaruzhenie nelinejnyh ob#ektov s raspoznavaniem tipa nelinejnosti na osnove ih jelektrofizicheskih svojstv // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija S. Fundamental'nye nauki. 2013. № 4. S. 105–109. (in Russ.)
2. Chertkov V.M., Zheleznyak V.K. Apparato-programmnyj kompleks avtomatizirovannogo poiska s vozmozhnost'ju identifikacii radioelektronnyh sredstv skrytogo s#ema informacii // Izvestija NAN Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk. 2016. № 4. S. 99–105. (in Russ.)
3. Chertkov V.M., Mal'cev S.V. Ispol'zovanie fazomanipulirovannogo signala v zadachah nelinejnoj radiolokacii // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija S. Fundamental'nye nauki. 2010. № 3. S. 129–134. (in Russ.)
4. Chertkov V.M., Zheleznyak V.K. Matematicheskaja model' ocenki izbiratel'nym priemom urovnej vysshih garmonik zondirujushhego AM-signalu s podavlennoj nesushhej dlja opredelenija tipa nelinejnosti celi // Sovremennye sredstva svjazi: materialy XXI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Minsk, 20–21 oktjabrja 2016 g. S. 227–228. (in Russ.)
5. Chertkov V.M., Zheleznyak V.K. Povyshenie verojatnosti obnaruzhenija radioelektronnyh sredstv na osnove ocenki parametrov pereotrazhennogo zondirujushhego signala // Kompleksnaja zashhita informacii: materialy XIII nauch.-prakt. konf., Polock, 16–19 maja 2017 g. S. 129–131. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Железняк В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники Полоцкого государственного университета.

Чертков В.М., м.т.н., старший преподаватель кафедры радиоэлектроники Полоцкого государственного университета.

### Information about the authors

Zheleznyak V.K., D. Sci., professor, head of the department of radioelectronics of Polotsk state university.

Chertkov V.M., master of engineering, lecturer of the department of radioelectronics of Polotsk state university.

### Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь  
г. Новополоцк, Блохина, д. 29,  
Витебская область  
Полоцкий государственный университет  
тел.: +375-29-510-64-39;  
e-mail: v.chertkov@psu.by  
Чертков Валерий Михайлович

### Address for correspondence

211440, Republic of Belarus  
Novopolotsk, Blokhin str., 29,  
Vitebsk region  
Polotsk state university  
tel.: +375-29-510-64-39;  
e-mail: v.chertkov@psu.by  
Chertkov Valery Mikhailovich