

### **Обобщенная схема преобразователя сигналов в акустолокационных системах на основе аппарата непрерывных кусочно-линейных функций**

В.В. Булкин<sup>1</sup>, О.Р. Кузичкин<sup>2</sup>, Г.С. Васильев<sup>2</sup>, Д.И. Суржик<sup>1</sup>, С.М.Курилова-Харчук<sup>1</sup>, И.А.Курилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муромский институт  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: kia\_s@list.ru

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.  
E-mail: oldolkuz@yandex.ru

*Предложен метод анализа устройств акустолокационных систем на основе структурной аппроксимации. Аппроксимация осуществляется на основе разработанной обобщенной схемы преобразователя сигналов. При этом анализ проводится на основе аппарата непрерывных кусочно-линейных функций и передаточных функций преобразователя сигналов.*

*Ключевые слова: структурная аппроксимация, преобразователь сигналов, непрерывные кусочно-линейные функции*

### **Generalized circuit of a signal converter in acoustic-location systems based on the apparatus of continuous piecewise linear functions**

V.V. Bulkin<sup>1</sup>, O.R. Kuzichkin<sup>2</sup>, G.S. Vasilyev<sup>2</sup>, D.I. Surzhik<sup>2</sup>, S.M. Kurilova-Kharchuk<sup>1</sup>, I.A. Kurilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vladimir State University

<sup>2</sup> Belgorod State University

*A method for analyzing the devices of acoustic radar systems based on structural approximation is proposed. Approximation is carried out on the basis of the developed generalized scheme of the signal converter. In this case, the analysis is carried out on the basis of the apparatus of continuous piecewise linear functions and transfer functions of the signal converter.*

*Keywords: structural approximation, signal converter, continuous piecewise linear functions*

#### **Введение**

Работа большого класса устройств и систем (УиС) основана на использовании принципов электронного формирования сигнала с заданными характеристиками и последующем преобразовании его в акустический сигнал с требуемыми параметрами. Широко используется и обратное преобразование. Ряд систем, например, системы акустолокации, системы акустического зондирования атмосферы и др., используют оба принципа работы с электрическими и акустическими сигналами.

Анализ и теоретические исследования электроакустических и акустико-электрических устройств (систем) различных видов, обычно осуществляются по следующему алгоритму [1-3]: составление уравнений устройства (системы); подстановка в полученные уравнения аналитических выражений характеристик составляющих устройства блоков; исследование устойчивости устройств; решение полученных уравнений для заданных типов и параметров формируемых и обрабатываемых сигналов.

При изменении конфигурации конкретного устройства (системы) или изменении параметров, функциональных зависимостей составляющих структурных блоков, снова требуется проведение всего указанного алгоритма.

При этом нахождение реакции устройства даже численными методами обычно сопряжено с организацией громоздкого и сугубо индивидуального для каждого варианта устройства (системы), алгоритма вычислений.

### **Структурная аппроксимация и анализ электроакустических и акустико-электрических устройств и систем на основе преобразователей сигналов и непрерывных кусочно-линейных функций**

Применение непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [4-10] позволяет от нелинейных уравнений, описывающих поведение устройств перейти к линейным, но справедливым во всех областях изменения параметров устройств, сигналов и дестабилизирующих факторов. А реакция устройств (систем) на конкретное воздействие может быть аналитически представлена в виде совокупности передаточных функций.

Применение НКЛФ позволяет также полученные линейные дифференциальные уравнения УиС произвольного порядка, аппроксимировать, привести к эквивалентным уравнениям первого порядка и получить их решения в виде аналитических выражений.

Исследования показали, что эффективным методом анализа УиС является разработанный авторами метод структурной аппроксимации.

Формирование и обработка электрических сигналов в различных УиС может рассматриваться как амплитудно-фазовое преобразование сигнала. Данное обстоятельство позволяет процесс формирования и обработки сигналов в различных блоках УиС рассматривать как последовательно-параллельно осуществляемые амплитудно-фазовые преобразования и структурно аппроксимировать его в виде схемы последовательно-параллельно соединенных амплитудно-фазовых преобразователей сигналов.

А исследование конкретного блока (звена) УиС проводить на основе конечных аналитических выражений обобщенной схемы преобразователя, что исключает большую часть этапов традиционного анализа.

При этом, изменение конфигурации конкретного устройства, изменение характеристик и параметров составляющих устройство блоков и звеньев, учитывается простым изменением значений коэффициентов в конечных выражениях преобразователя.

Обобщенная схема ПС аналогично [11] содержит произвольное число, в общем случае зависимых между собой каналов – «строк», которые образуют «кадр». Каждая строка представляет собой последовательно-параллельное соединение свернутых преобразователей нулевого уровня раскрытия. Каждый такой преобразователь может раскрываться до уровня произвольного номера, поскольку в его состав входят аналогичные ему преобразователи. Количество «строк» в кадре так же не ограничено и определяется только схемой конкретного устройства (системы).

Ни рис.1 и рис.2 представлены обобщенные схемы амплитудно-фазового преобразователя сигналов (ПС), нулевого и первого уровня раскрытия.

На схеме обозначены: ПС – преобразователь сигналов, АЭП – акустоэлектрический преобразователь сигналов, С – линейный сумматор, УУ – управляющее устройство, ЭАП – электроакустический преобразователь, ТО – тракт обработки, ВР – весовой распределитель.

В УУ в общем виде осуществляется управление амплитудой и (или) фазой электрического сигнала (два управляющих входа). Тракты  $ТО_1^1$  и  $ТО_2^1$ , соответственно

реализуют принципы управления с регулированием по возмущению и по отклонению. При одновременном включении трактов реализуется принцип комбинированного регулирования. Тракт обработки содержит последовательно соединенные, функциональный преобразователь (ФП) и фильтр (Ф).

Функциональный преобразователь включает в себя усилитель (У), перемножитель (П), фазовращатель (ФВ) и эквивалентный генератор (ЭГ). Блок ВР осуществляет распределение сигналов с каждого его входа на каждый выход, с заданными пропорциями.

На схемах (рис.1, рис.2), приняты следующие обозначения блоков:  $ПС_{x_2}^{x_1}$ , где  $x_1$  – номер уровня раскрытия,  $x_2$  – номер блока. Символами  $P$  и  $U$  обозначены внешние основные соответственно акустические и электрические сигналы. Символами  $u$  – вспомогательные электрические сигналы.

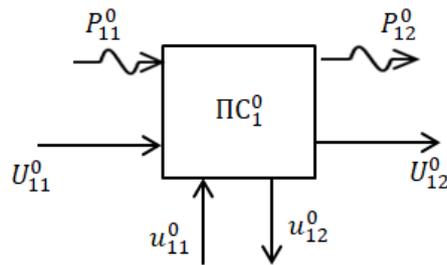


Рис. 1

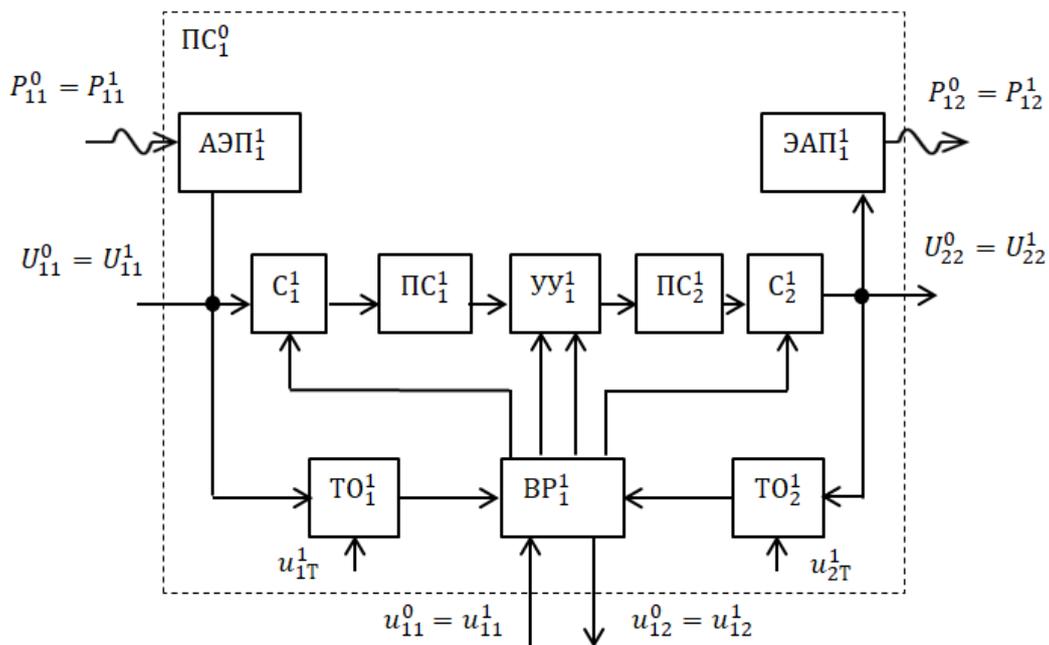


Рис. 2

Верхние и нижние индексы сигналов обозначены как  $U_{y_2 y_3}^{y_1}$ , где  $y_1$  – номер уровня,  $y_2$  – номер блока к которому относится сигнал,  $y_3$  – идентификатор сигнала. Идентификатор сигнала  $y_3$  может принимать численные или буквенные обозначения. Численные: 1-входной сигнал блока, 2-выходной сигнал. При наличии у конкретного блока, более одного входа и (или) более одного выхода, нечетные индексы соответствуют входным сигналам (1;3;5;7...), а четные – выходным (2;4;6;8...).

Буквенные символы обозначают тип (характер) соответствующего блока: Т – сигнал тракта обработки и т.д.

Стрелки « $\leftrightarrow$ » и  $\curvearrowright$  показывают, соответственно, направления прохождения электрического и акустического сигналов по идеальным трактам.

### Уровни раскрытия схемы преобразователя

Рассмотрим несколько уровней раскрытия схемы преобразователя. Уровень 1 (рис.2), является базовым ПС. Его дальнейшее раскрытие позволяет произвольно увеличивать количество преобразований сигнала в «строке». Каждое раскрытие последующего уровня осуществляется раскрытием в схеме свернутых преобразователей (в данном случае ПС<sub>1</sub><sup>1</sup> и ПС<sub>2</sub><sup>1</sup>), содержащихся в предыдущем уровне.

Обозначим передаточные функции блоков: ПС  $\rightarrow$  П, УУ  $\rightarrow$  К, ВР  $\rightarrow$  n, ТО  $\rightarrow$  W. Пусть верхние и нижние индексы функций полностью соответствуют верхним и нижним индексам своих блоков. В соответствии с рис.1, рис.2 передаточные функции ПС различных уровней получают перемножением передаточных функций составляющих блоков и имеют вид

уровень 0  $Q^0 = \Pi_1^0$  – свернутый ПС,

уровень 1  $Q^1 = \Pi_1^1 K_1^1 \Pi_2^1$ ,

уровень 2  $Q^2 = \Pi_1^2 K_1^2 \Pi_2^2 K_2^1 \Pi_3^2 K_2^2 \Pi_4^2$ ,

уровень 3  $Q^3 = \Pi_1^3 K_1^3 \Pi_2^3 K_2^3 \Pi_3^3 K_3^1 \Pi_4^3 K_3^3 \Pi_5^3 K_3^3 \Pi_6^3 K_2^3 \Pi_7^3 K_4^3 \Pi_8^3$

Общее выражение передаточной функции для произвольного числа раскрытых уровней  $A \geq 1$

$$Q^A = \prod_{\alpha=1}^A \prod_{\beta=1}^B \prod_{\gamma=1}^G \Pi_{\beta}^{\alpha} K_{\gamma}^{\alpha},$$

где  $\alpha$  - текущий номер раскрываемого слоя,  $A$  - максимальное число раскрытых в ПС слоев,  $\beta, \gamma$  - коэффициенты (номера передаточных функций) соответственно ПС и УУ,  $B = 2\alpha, G = 2\alpha - 1$  – максимальные значения  $\beta, \gamma$ .

Обобщенная схема преобразования, содержащая  $M$  «строк», представлена на рис.3. Правые верхние индексы блоков, сигналов и передаточных функций соответствуют номеру «строки».

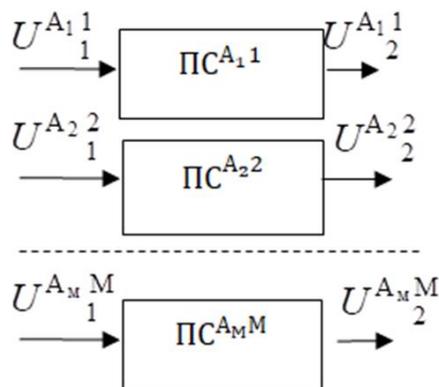


Рис. 3

Совокупности входных и выходных сигналов обозначим через матрицы  $U_{1,2}^{A_M M}$ , а через матрицу  $Q^{A_M M}$  -совокупность передаточных функций. Тогда обобщенная схема описывается системой уравнений

$$U_2^{AMM} = Q_{AMM} U_1^{AMM}.$$

Для структурной аппроксимации электрической части передающего тракта, метеорологической системы акустического зондирования атмосферы, включающего задающий генератор, формирователь зондирующего сигнала, предварительный и управляемый выходной усилители мощности, а также детектор, фильтр и усилитель системы автоматического регулирования уровня выходного сигнала, потребуется одна «строка» и два уровня раскрытия ПС.

### Передаточные функции нелинейного преобразователя сигналов

Рассмотрим передаточные функции нелинейного преобразователя (рис.2) со следующими параметрами: передаточные функции АЭП<sub>1</sub><sup>1</sup>, ЭАП<sub>1</sub><sup>1</sup>, ПС<sub>1</sub><sup>1</sup> и ПС<sub>2</sub><sup>1</sup> равны 1; коэффициенты передачи ВР<sub>1</sub><sup>1</sup> для сумматоров С<sub>1</sub><sup>1</sup> и С<sub>2</sub><sup>1</sup> равны 0; управление УУ<sub>1</sub><sup>1</sup> осуществляется по одному каналу и  $u_{11}^0 = u_{12}^0 = 0$ . Для уменьшения громоздкости записи обозначим  $u_{1T}^1 = x_{\Gamma 1}$  и  $u_{2T}^1 = x_{\Gamma 2}$ .

Обозначим параметр входного электрического или акустического сигнала –  $x$ , а параметр выходного электрического или акустического сигнала –  $y$ . Кроме того пусть на УУ<sub>1</sub><sup>1</sup> воздействует и дестабилизирующий фактор  $\varepsilon$ .

Сигналы на выходе первого (ФП<sub>1</sub>) и второго (ФП<sub>2</sub>), функциональных преобразователей трактов ТО<sub>1</sub><sup>1</sup> и ТО<sub>2</sub><sup>1</sup> являются функциями разностей параметров их входного и опорного сигналов  $d_1 = x - x_{\Gamma 1}$ ,  $d_2 = y - x_{\Gamma 2}$ . Уравнение управляющего сигнала УУ<sub>1</sub><sup>1</sup>, при отклонениях  $x$  и  $x_{\Gamma 1,2}$

$$u = n_1 M_1(p) \tilde{F}_1(x - x_{\Gamma 1}) + n_2 M_2(p) \tilde{F}_2(y - x_{\Gamma 2}),$$

где  $\tilde{F}_1(d_1) = \tilde{F}_1(x - x_{\Gamma 1})$  и  $\tilde{F}_2(d_2) = \tilde{F}_2(y - x_{\Gamma 2})$  – характеристики функциональных преобразователей ТО<sub>1</sub><sup>1</sup> и ТО<sub>2</sub><sup>1</sup>,  $n_{1,2}$  – коэффициенты передачи ВР для цепей регулирования по возмущению и по отклонению соответственно,  $M_{1,2}(p)$  – коэффициенты передачи фильтров ТО<sub>1</sub><sup>1</sup> и ТО<sub>2</sub><sup>1</sup>,  $p = d/dt$  – оператор.

Обозначим  $\tilde{K}(u_p)$  – функцию передачи УУ<sub>1</sub><sup>1</sup> с учетом воздействия дестабилизирующего фактора, где  $u_p = u + \varepsilon$ . Характеристики УУ<sub>1</sub><sup>1</sup> и ФП<sub>1,2</sub> аппроксимируем при помощи НКЛФ и обозначим их соответственно  $K(u + \varepsilon)$  и  $F_{1,2}(x - x_{\Gamma 1,2})$ . Так же обозначим  $K_m$ ,  $K_{1n}$ ,  $K_{2n}$ ,  $B_m$ ,  $B_{1n}$ ,  $B_{2n}$  – коэффициенты отрезков прямых, аппроксимирующих характеристики УУ<sub>1</sub><sup>1</sup>, ФП<sub>1</sub>, ФП<sub>2</sub> в узлах аппроксимации  $m$  и  $n$ ,  $M$  и  $N$  – максимальные номера узлов аппроксимации,  $U_{pm}$  и  $D_{1n}$ , – значения  $u_p$  и  $d_1$   $d_2$  в узлах аппроксимации  $m$  и  $n$  соответственно,  $\Delta_{u,d_1,d_2}$  – шаг аппроксимации переменных  $u_p$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $Q_m = Q_m(u + \varepsilon)$ ,  $Q_{1n} = Q_{1n}(x - x_{\Gamma 1})$ ,  $Q_{2n} = Q_{2n}(y - x_{\Gamma 2})$  – функции включения отрезков аппроксимирующих прямых.

Функции включения  $Q_m$  или  $Q_{1,2n}$  отличны от нуля и равны единице только на интервале между узлами  $m$  и  $m+1$  или между узлами  $n$  и  $n+1$  соответственно. Так

$$Q_m(u + \varepsilon) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 (-1)^{\lambda+\gamma} |u + \varepsilon - U_{pm} - \gamma\Delta_u + \Delta(1 - \lambda)|,$$

где  $\Delta$  – произвольно малая величина ( $\Delta \rightarrow 0$ ),  $\lambda$  и  $\gamma$  – целые числа,

$$u = n_1 M_1(p) \sum_{n=0}^{N-1} [K_{1n}(x - x_{\Gamma 1}) + B_{1n}] Q_{1n} + n_2 M_2(p) \sum_{n=0}^{N-1} [K_{2n}(y - x_{\Gamma 2}) + B_{2n}] Q_{2n}.$$

Тогда уравнение преобразователя для изменений параметров входного сигнала, параметров опорных сигналов и дестабилизирующего фактора принимает вид

$$y = x - \sum_{m=0}^{M-1} [K_m(u + \varepsilon) + B_m] Q_m. \quad (1)$$

Обозначим

$$N_{1mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_m K_{1n} Q_m Q_{1n}, N_{2mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_m K_{2n} Q_m Q_{2n}, N_m = \sum_{m=0}^{M-1} K_m Q_m, \\ R_{1mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_m B_{1n} Q_m Q_{1n}, R_{2mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_m B_{2n} Q_m Q_{2n}, E_m = \sum_{m=0}^{M-1} B_m Q_m.$$

Подставим выражение для  $u$  в (1) и после преобразования получим

$$y = K_{xy}x + K_{x_{\Gamma 1}y}x_{\Gamma 1} + K_{x_{\Gamma 2}y}x_{\Gamma 2} + K_{\varepsilon y}\varepsilon - G, \quad (2)$$

где  $K_{\alpha\beta} = \frac{\beta}{\alpha}$  – передаточные функции нелинейного преобразователя сигналов с характеристиками звеньев, аппроксимированными НКЛФ,  $\alpha$  и  $\beta$  – воздействие и отклик преобразователя,  $K_{xy} = \frac{1-n_1M_1(p)N_{1mn}}{1+n_2M_2(p)N_{2mn}}$ ,  $K_{x_{\Gamma 1}y} = \frac{n_1M_1(p)N_{1mn}}{1+n_2M_2(p)N_{2mn}}$ ,  $K_{x_{\Gamma 2}y} = \frac{n_2M_2(p)N_{2mn}}{1+n_2M_2(p)N_{2mn}}$ ,  $K_{\varepsilon y} = \frac{N_m}{1+n_2M_2(p)N_{2mn}}$ ,  $G = \frac{n_1M_1(p)R_{1mn}+n_2M_2(p)N_{2mn}+E_m}{1+n_2M_2(p)N_{2mn}}$  – отклонение параметра  $y$ , вследствие воздействия постоянных составляющих характеристик звеньев преобразователя.

В отличие от передаточных функций линеаризованной системы, данные функции справедливы при любых изменениях  $\alpha$  и  $\beta$ .

Выражение (2) полностью описывает статический и динамический режимы нелинейного ПС с комбинированным регулированием. Для вывода аналитических выражений конкретных характеристик достаточно в (2) подставить значения действующих возмущений и передаточные функции фильтров.

### Заключение

Предложен новый метод анализа и исследования электроакустических и акустико-электрических устройств и систем. Метод предполагает проведение структурной аппроксимации УиС на основе разработанной обобщенной схемы.

Применение НКЛФ позволяет исследовать устройства (системы), произвольной структуры, с произвольными нелинейными характеристиками и произвольными видами инерционной составляющих блоков и звеньев. Исследование конкретных УиС проводится на основе конечных выражений передаточных функций обобщенной схемы преобразователя сигналов.

Метод позволяет осуществить разработку специализированной программной среды (оболочки), позволяющей существенно упростить и автоматизировать процессы комплексного анализа и исследования произвольных электрических, электроакустических и акустико-электрических УиС.

### Литература

1. Григорюк Е.Н., Булкин В.В. Система управления сложным технологическим процессом промышленного предприятия / Системный анализ в проектировании и управлении: Сб. науч. тр. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Ч.2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. –С.147-148.
2. Булкин В.В., Григорюк Е.Н., Лашин А.Е. Структурный анализ системы управления воздушным движением с точки зрения повышения безопасности в системе «человек-машина» / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. №12, 2013. С.1-7.
3. Grigoryuk E.N., Bulkin V.V. Problems of Automation and Management Principles Information Flow in Manufacturing / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 221, 2017, 012006. doi:10.1088/1757-899X/221/1/012006.
4. Курилов И.А., Булкин В.В., Васильев Г.С. Динамические характеристики формирователя калибровочного сигнала метеорадиолокатора на основе НКЛФ / Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред [Электронный ресурс]: сб. докладов Четвёртой Всероссийской научной школы и конференции, Муром, 30

июня – 3 июля 2009 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009. -С.319-323. –№ гос. регистрации 0320901239.

5. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence, 2013, International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013. DOI:10.1109/SIBCON.2013.6693641.

6. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М., Суржик Д.И. Исследование устойчивости преобразователя сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 1 (5). С. 4-7.

7. Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control systems for thermoelectric modules / Advances in Dynamical Systems and Applications. - Volume 15, Issue 2. – 2021. – Pp. 187-197(Scopus).

8. Surzhik D.I., Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R. Modeling the dynamic properties of communication channels in UAV-based networks based on spectral piecewise linear approximation method / International Journal of Engineering Research and Technology. - Volume 13, Issue 12. – 2021. – Pp. 4653-4657(Scopus).

9. Vasilyev GS, Kuzichkin OR, Kurilov IA, Surzhik DI. Method for analyzing the stability of information transfer between unmanned aerial vehicles in the formation / REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DEL ZULIA. - Volume 11, Issue: 30,Pp. 125-136. – 2020 (Web of Science).

10. Kuzichkin OR, Vasilyev GS, Surzhik DI. Design an algorithm for analyzing the stability of information exchange between UAVS in the high-order agent formation / INGENIERIA UC. - Volume 27, Issue: 2,Pp. 224-232. – 2020 (Web of Science).

11. Курилов И.А. Обобщенная схема амплитудно-фазового преобразования сигналов / Радиотехника. 2006. № 6. С. 91-93.