

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION SYSTEM AND TECHNOLOGIES

УДК 621.391

DOI: 10.18413/2518-1092-2020-5-1-0-1

Сансевич В.К.  
Безручко В.В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия

*e-mail: sans115@mail.ru*

### Аннотация

В статье рассмотрены вопросы компьютерного моделирования процессов образования погрешности прогнозирования состояния объекта контроля. Для анализа процесса образования погрешностей при реализации методов прогнозирования выделены основные этапы решения этой задачи.

Представлена структурно-функциональная организация прогнозирования состояния объекта контроля. Разработана модель образования погрешностей при решении задачи прогнозирования в автоматизированной системе контроля технического состояния. Моделирование производилось по разработанному алгоритму оценки погрешностей при реализации метода индивидуального прогнозирования.

По результатам моделирования установлены аналитические зависимости случайной составляющей погрешности прогнозирования от длины учитываемой предыстории и уровня зашумленности идеального тренда.

**Ключевые слова:** прогностический контроль; принцип минимакса; метод гарантированного прогнозирования; погрешность прогнозирования.

UDC 621.391

Sansevich V.K.  
Bezruchko V.V.

**MODELING THE ERROR ESTIMATION PROCESS WHEN  
IMPLEMENTING THE METHOD OF INDIVIDUAL  
FORECASTING**

Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302034, Russia

*e-mail: sans115@mail.ru*

### Abstract

The article deals with the issues of computer modeling of the formation of error in forecasting the state of the object of control. To analyze the process of error formation in the implementation of forecasting methods, the main stages of solving this problem are highlighted.

The structural and functional organization of forecasting the state of the object of control is presented. A model of error generation in solving the forecasting problem in an automated technical condition control system has been developed. The simulation was performed according to the developed algorithm for estimating errors in the implementation of the method of individual forecasting.

Based on the simulation results, analytical dependences of the random component of the prediction error on the length of the prehistory taken into account and the noise level of the ideal trend are established.

**Keywords:** predictive control; minimax principle; guaranteed prediction method; prediction error.

### ВВЕДЕНИЕ

Для анализа процесса образования погрешностей при реализации методов прогнозирования необходимо выделить основные этапы решения этой задачи. Это – разработка моделей объекта контроля (ОК) и моделей воздействующих факторов, оптимизация параметров ОК, формирование определяющего параметра ОК, измерение, прогнозирование, верификация прогноза.

Следует отметить, что отмеченные выше этапы, связаны с описанием ОК как в многомерном пространстве параметров, так и с помощью обобщенного (определяющего) параметра (ОП).

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Этап моделирования ОК и изменения его ТС под действием различных факторов имеет две основные цели. Первая цель – формирование как набора контролируемых параметров ОК, так и единого параметра, определяющего обобщенное состояние ОК. Это обобщенное состояние должно характеризовать не только возможность реализации функциональных нагрузок, определенных функцией ОК, но и остаточный его ресурс. Таким образом понятие обобщенного состояния гораздо шире понятия технического состояния (ТС). Второй целью этапа моделирования является определение законов изменения как отдельных параметров ОК, так и обобщенного его состояния во времени. Тогда модель системы можно представить следующими подмоделями (см. рис. 1): - модель 1 (модель статики ОК или модель описания ОК), модель 2 (модель описания воздействующих факторов), модель 3 (модель изменения статики ОК за счет управляющих и регулирующих воздействий), модель 4 (модель изменения состояния ОК под действием естественных процессов старения).

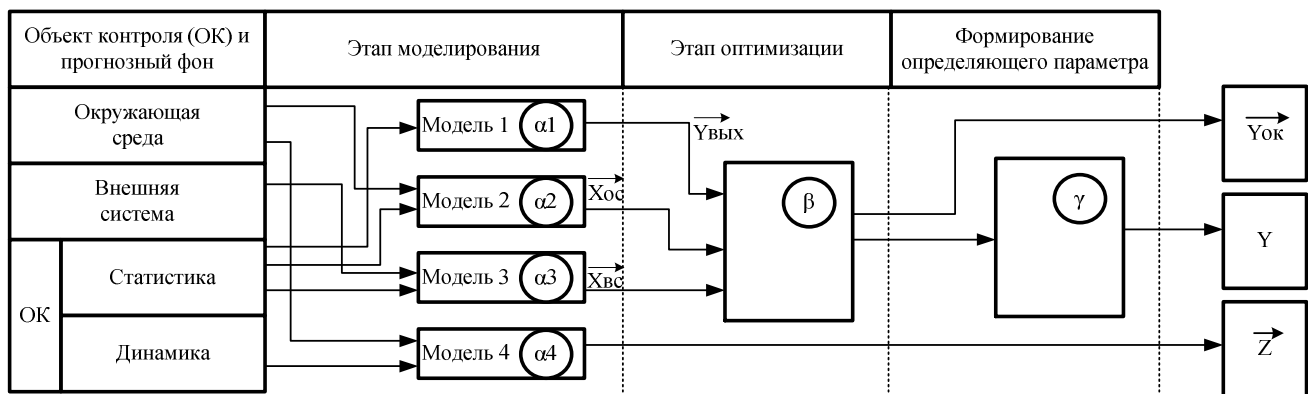


Рис. 1. Структурно-функциональная организация прогнозирования состояния объекта контроля  
Fig. 1. Structural and functional organization of forecasting the state of the object of control

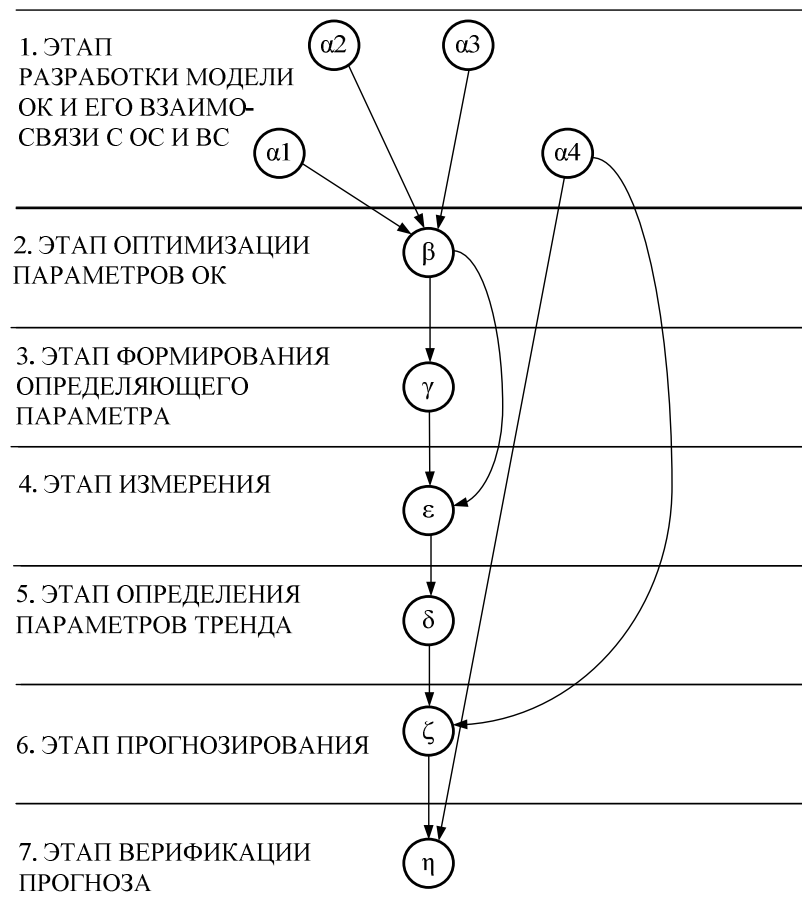


Рис. 2. Граф образования погрешностей при решении задачи прогнозирования в автоматизированной системе контроля технического состояния

Fig. 2. Graph of error formation in the solution the problem of forecasting in an automated system technical condition monitoring

Каждая из выделенных подмоделей обладает рядом первичных методических погрешностей  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ , где  $\alpha_1$  – методическая погрешность, обусловленная неточностью описания состояния ОК моделью 1 в фазовом пространстве состояний;  $\alpha_2$  – методическая погрешность, обусловленная неточностью описания воздействий окружающей среды на состояние ОК (неточность модели 2);  $\alpha_3$  – методическая погрешность, обусловленная неточностью описания воздействий внешней среды на состояние ОК (неточность модели 3);  $\alpha_4$  – методическая погрешность, обусловленная неточностью описания процессов изменения состояния во времени при износе и старении ОК (погрешность выбора вида изменения дрейфа прогнозируемой величины).

В технической диагностике кардинальным понятием является понятие ОП, основная идея которого заключается в трансформации  $n$ -мерного пространства параметров (состояний) в одномерное.

Естественно, что переход от многомерного пространства параметров к одномерному не всегда происходит однозначно и является источником некоторой дополнительной неопределенности. Таким образом, само введение понятия ОП и его дальнейшее использование связано с первичной погрешностью  $\beta$ , являющуюся методической погрешностью, обусловленной выбором из всего множества параметров  $\{Y_{вых}\}$ ,  $\{Y_{ос}\}$ ,  $\{Y_{вс}\}$  оптимального их количества. Этот выбор осуществляется с помощью функционального преобразования, рассматриваемого как

алгоритмическое преобразование множества параметров указанных моделей в оптимизированное множество собственно параметров, включающее их нормирование.

Вся совокупность первичных методических погрешностей  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , и  $\beta$  при выполнении функционального преобразования трансформируется в погрешность  $\gamma$ , представляющую собой методическую погрешность, обусловленную неточностью описания состояния ОК с помощью ОП. Следует заметить, что  $\gamma$  из-за замены описания состояния ОК фазовым пространством параметров  $\{Y_{вх}\}$ ,  $\{Y_{ос}\}$ ,  $\{Y_{ес}\}$  на некоторое искусственное точечно-линейное множество  $Y$ , представляет также методическую погрешность выбора фазового пространства упомянутых параметров, при помощи которых определяется ОП. В таком случае  $\gamma$  представляет собой источник методической погрешности характера моделирования и может использоваться как условие прерывания структурных связей в моделях образования погрешностей при решении задачи прогнозирования остаточного ресурса ОК.

Описание погрешности  $\gamma$  представляет собой результат реализации трех первых этапов решения задачи прогнозирования ТС ОК. Погрешность  $\gamma$  является результирующей погрешностью первичных методических погрешностей  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ . Методическая погрешность  $\alpha_4$  целиком зависит от выбора модели 4 (см. рис.1), описывающей динамику состояний ОК под влиянием ОС. Поэтому погрешность, которая заложена в модель 4, проявится на более поздних этапах решения задачи прогнозирования ТС ОК.

Следует заметить, что все первичные измерительные погрешности в конечном счете определяются погрешностью  $\beta$ . Причем уменьшение  $\beta$  (предположим, за счет увеличения числа параметров  $Y_{ок}$  для определения ОП) влечет за собой увеличение  $\gamma$ .

Поскольку ОП является параметром высокого иерархического уровня, то в присущих на измерительном этапе инструментальных погрешностях будут присутствовать как аппаратные погрешности, так и методические.

Кроме того, при увеличении длины учитываемой предыстории  $L$  методические погрешности аппроксимации уменьшается. В то же время методические погрешности, связанные с экстраполяцией параметров модели 4, увеличивается. Для реализации этапа собственно прогнозирования служит функционально-алгоритмическое преобразование, вид которого зависит от принятой модели 4, вектора  $Z$  текущих параметров воздействия ОС на динамику необратимых процессов износа и старения ОК и от целей прогнозирования.

Последним этапом решения задач прогнозирования является этап верификации значения прогноза, полученного на предыдущем этапе. Целью этапа верификации служит установление адекватности системы принятых моделей и гипотез действительным процессам старения ОК.

Исходя из вышесказанного предлагается граф образования погрешностей при прогнозировании (рис. 2), вершинами которого служат упомянутые источники погрешностей, представленные подмножествами:

$$M\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}, M\beta = \{\beta\}, M\gamma = \{\gamma\}, M\delta = \{\delta\}, M\varepsilon = \{\varepsilon\}, M\zeta = \{\zeta\}, M\eta = \{\eta\}.$$

В этой системе сложность отношений между отдельными подмножествами обусловлена не только взаимосвязью самих подмножеств, но и наличием отношений между внутренними элементами подмножеств.

Из рассмотренного графа (см. рис. 2) образования погрешностей при реализации алгоритмов прогнозирования представляют интерес три последних этапа – этап определения параметров тренда, этап собственно прогнозирования и этап верификации. Исследование этих этапов даст возможность, не рассматривая всей сложности первых четырех этапов, оценить эффективность методов прогнозирования в зависимости от различных факторов влияния на процесс изменения состояния ОК.

Из которого следует, что наиболее целесообразно в нашем случае использовать метод имитационного моделирования.

Анализ факторов образования погрешностей индивидуального прогнозирования и погрешностей реализации алгоритмов прогнозирования показывает дискретность вариантов моделирования их образования. Сюда относятся различные комбинации возможных длин учитываемой предыстории  $L$  и уровней зашумленности  $W$  тренда  $Y(t)$ .

Учитывая необходимость анализа процесса образования погрешностей прогнозирования при различных факторах влияния и реализациях алгоритма прогнозирования, а также с целью обеспечения полноты исследований процессов образования погрешностей в рассматриваемых автоматизированных системах контроля (АСК), включающих в себя блоки с реальным математическим обеспечением, наиболее целесообразным является применение метода имитационного моделирования. Для составления схемы алгоритма имитационного моделирования может быть использован граф образования погрешностей, изображенный на рис. 2.

Предложенный вариант моделирования имеет своей целью исследование основных свойств погрешностей прогнозирования. Данный вариант имитационного моделирования процессов образования погрешностей прогнозирования может быть реализован алгоритмом, схема которого приведена на рис. 3.

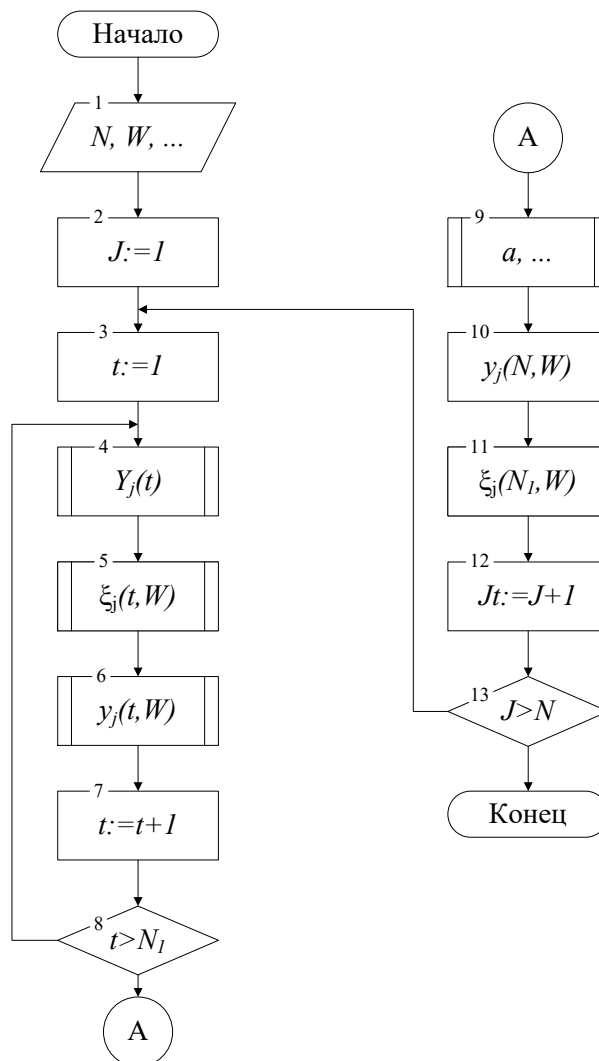


Рис. 3. Алгоритм моделирования процесса оценки погрешностей при реализации метода индивидуального прогнозирования

Fig. 3. Algorithm for modeling the error estimation process when implementing the method of individual forecasting

Имитационное моделирование предусматривает реализацию следующих четырех этапов исследований:

- 1) генерирование идеального тренда  $Y(t)$  на практически неограниченном количестве временных сечений  $t$ ;
- 2) генерирование помехи  $\xi(t, W)$  с различными видами ее закона распределения;
- 3) генерирование реального тренда  $y(t, W)$  для данного уровня зашумленности  $W$  и реализация прогнозирования, согласно исследуемого алгоритма;
- 4) сравнение результатов прогноза по идеальному  $Y(t)$  и реальному  $y(t, W)$  трендам.

Сущность этапа генерирования идеального тренда заключается в формировании с помощью вычислительной машины значения  $Y_j(t)$  (блок 4). Тренд  $Y(t)$  может быть представлен линейной, параболической и экспоненциальной зависимостями.

Второй этап исследования процесса образования погрешностей (блок 5) предусматривает генерирование помехи  $\xi_j(t, W)$  для заданного в блоке 1 уровня зашумленности  $W$ , где  $\xi_j(t, W)$  определяется умножением случайно выдаваемых ЭВМ чисел на величину  $W$ . Предлагается генерировать помеху с нормальным или равномерным законами распределения.

Особую важность представляет правильная реализация второго этапа, т.к. характер погрешности прогнозирования существенно зависит от закона распределения генерируемой помехи. Например, использование равномерно распределенной помехи вместо обычно встречаемой нормально распределенной приводит к достаточно большому увеличению усредненной погрешности прогнозирования, в то же время уменьшая количество выбросов  $y_j(t, W)$  и тем самым повышая устойчивость алгоритмов прогнозирования. Следует отметить, что устойчивость алгоритмов прогнозирования чрезвычайно важна для построения АСК, реализующих прогноз на достаточно большой интервал времени.

Сущность третьего этапа (блок 6) заключается в формировании на основе первого и второго этапов реального тренда  $y_j(t, W)$ .

Здесь предусмотрены аддитивный  $y(t, W) = Y(t) + \xi(t, W)$  или мультипликативный  $y(t, W) = Y(t) \cdot \xi(t, W)$  виды соединений помехи с идеальным трендом. Четвертый этап включает блоки 9-11. Здесь сперва происходит определение методом наименьших квадратов коэффициентов (блок 9), принятого на этапе моделирования вида тренда  $Y(t)$ .

Это определение производится для уровня  $W$  и заданного блоком 1 начального объема временных сечений  $N_1$  (блок 8). Блок 10 определяет значение прогнозов  $y_j^{+i}(N_1, W)$  на  $i$  временных сечений вперед, используя при этом результаты реализации блока 9. В блоке 11 определяется погрешность прогнозирования по формуле

$$\zeta_j(N_1, W) = y_j^{+i}(N_1, W) - Y_j^{+i}(N_1), \quad (1)$$

где  $Y_j^{+i}(N_1)$  - результат прогноза по идеальному тренду на  $i$  шагов вперед,  $j$  - номер операции сравнения результатов прогнозирования для заданных  $N_1$  и  $W$ . По аналогичным с (1) формулам в блоке 11 определяются погрешности полученных в блоке 9 коэффициентов тренда  $Y(t)$ . Количество  $N$  операций сравнения (объем выборки) задается в блоке 1, где  $j \in 1..N$ .

Поскольку четвертый этап практически соответствует рабочим программам, заложенным в АСК (программно или алгоритмически), то предусматривается возможность реализации произвольных алгоритмов индивидуального прогнозирования.

На рис. 3 не показан цикл, который осуществляет изменение длины учитываемой предыстории  $L$  в границах от  $N_1$  до заданной блоком 2  $N_2$ . В этот цикл входят блоки 2-13. Данный вариант имитационного моделирования процессов образования погрешностей при индивидуальном прогнозировании согласно вышеописанной схеме алгоритма реализован на ЭВМ.

В силу возможных трансформаций изменения состояния ОК, например, под действием управляющих воздействий, необходимо предусмотреть возможность автоматического (программного или случайного) изменения начального участка третьего этапа имитационного моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:



анализ процессов образования погрешностей, возникающих при реализации методов прогнозирования, позволил разработать обобщенную модель процессов образования погрешностей, их снижения в процессе прогнозирования, а также оценку достоверностей производимых результатов;

на основе теоретических и экспериментальных исследований, включающих в себя вычислительный эксперимент, реализованный на ЭВМ, возможно определение свойств, характеризующих погрешности определения различных параметров математической модели изменения технического состояния электронных устройств, на основе которых возможно осуществлять не только управление этими устройствами в процессе эксплуатации, но и разрабатывать новые методы коррекции результатов прогнозирования;

также по результатам моделирования появляется возможность установить аналитические зависимости случайной составляющей погрешности прогнозирования от длины учитываемой предыстории и уровня зашумленности идеального тренда.

### Список литературы

1. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. – М., 1975. – 12 с.
2. Снитюк В.Е. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы. Учебное пособие. – К.: «Маклаут», 2008. – 364 с.
3. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
4. Карлин С., Стадден В. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике / пер. с англ. под ред. С.М.Ермакова. – М.: Наука, 1976. – 586 с.
5. Клячкнн, В.Н. Прогнозирование состояния объекта с использованием систем временных рядов / В.Н. Клячкнн, Ю.Е. Кувайскова, Д.С. Бубырь // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 45-47.
6. Кувайскова, Ю.Е. Методика структурно-параметрической идентификации системы временных рядов / Ю.Е. Кувайскова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4-4. – С. 914-918.
7. Винограденко А.М. Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов / А.М. Винограденко, П.А. Будко, А.С. Юров, А.И. Литвинов // Датчики и системы – 2014. – №9. – С. 8-14.
8. Дорошенко Г.П. Анализ состояния и перспективы развития системы технического обеспечения связи и автоматизации / Г.П. Дорошенко, Е.Б. Харченко, А.В. Чихачев // Сборник трудов научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». – СПб.: ВАС, 2016. – С. 205–208.

### References

1. GOST 19919-74. Automated control of the technical condition of aircraft products. Terms and definitions. – Moscow, 1975. – 12 p.
2. Snityuk V.E. Forecasting. Models, methods, and algorithms. Textbook. – K.: "Macleod", 2008. – 364 p.
3. Himmelblau D. Analysis of processes by statistical methods. – M.: Mir, 1973. – 957 p.
4. Karlin S., Stadden V. Chebyshev systems and their application in analysis and statistics / Trans. from English under the editorship of S.M. Ermakova. – M.: Nauka, 1976. – 586 p.
5. Klyachkin, V.N. Forecasting the state of an object using time series systems / V.N. Klyachkin, Y.E. Kuliskova, D.S. Bubyr // Radiotechnics. – 2015. – No. 6. – Pp. 45-47.
6. Kubickova, J.E. A method of structural-parametric identification of the system time series / Y.E. Kuliskova // proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 15, No. 4-4. – Pp. 914-918.
7. Vinogradenko A.M. Method for monitoring the pre-accident state of controlled objects / A.M. Vinogradenko, P.A. Budko, A.S. Yurov, A.I. Litvinov // Sensors and systems – 2014. – №9. – Pp. 8-14.
8. Doroshenko G.P. Analysis of the state and prospects of development of the system of technical support of communications and automation / G.P. Doroshenko, E.B. Kharchenko, A.V. Chikhachev // Proceedings of the scientific and practical conference " Problems of technical support of troops in modern conditions". – SPb.: VAZ, 2016. – Pp. 205-208.

**Сансевич Валерий Константинович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

**Безручко Валерий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

**Sansevich Valery Konstantinovich**, candidate of technical sciences, Senior Research Fellow, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

**Bezruchko Valery Vladimirovich**, candidate of technical sciences, Associate Professor, Academy of the Federal security service of the Russian Federation