

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МОДЕЛЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Д.С. Волкова

dianavolkova98@gmail.com

SPIN-код: 6383-3717

Ч. Мунхуу

chukana.cm.cm@gmail.com

SPIN-код: 3487-4990

В.А. Худояров

vkhudoyarov@gmail.com

SPIN-код: 1982-6474

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

### Аннотация

*Рассмотрен интеллектуальный алгоритм построения прогнозирующих математических моделей с помощью метода самоорганизации, который является основным алгоритмом в современной интеллектуальной системе управления, основанной на теории функциональных систем. Для преодоления недостатков традиционного метода самоорганизации, реализация которого требует громоздких вычислительных ресурсов, предложен модифицированный алгоритм прогноза, комбинирующий тренд Демарка и метод самоорганизации. На основе модифицированного алгоритма построены прогнозирующие модели погрешностей навигационных систем. Результаты математического моделирования прогнозирования погрешностей навигационных систем продемонстрировали простоту, быстрдействие и повышенную точность разработанного алгоритма для построения прогнозирующих моделей в интеллектуальной системе управления летательными аппаратами.*

### Ключевые слова

*Метод самоорганизации, интеллектуальные системы управления, навигационные системы, прогнозирующие математические модели, алгоритмы построения моделей управления, управление техническими системами, коррекция управления, точность прогнозирования*

Поступила в редакцию 10.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

**Введение.** Традиционные теории управления представляют собой действенный инструмент для решения проблем управления практической жизни в определенные периоды. Но наука и техника задают управлению все более высокие требования. В связи с тем что, во-первых, в системах управления всегда существует немоделируемая динамика, которую ожидается уточнить путем получения недостающей информации на этапе обучения или в режиме реального времени, во-вторых, в ряде случаев зависимости управления не допускают обычного аналитического представления, в сложных системах управления предполагается использовать интеллектуальные компоненты, которые приводят к новым технологиям, расширяющим потенциал проектирования и управления динамическими системами.

На стыке современной теории управления, искусственного интеллекта (ИИ), нейрофизиологии и микроэлектроники активно формируется и развивается область исследования и разработок — интеллектуальное управление.

Система интеллектуального управления должна иметь способность воспринимать информацию о процессах, возмущениях и условиях функционирования, выводить заключения и обучаться. Для управления летательными аппаратами (ЛА) предлагается использовать интеллектуальную систему (ИС), построенную на основе теории функциональных систем П.К. Анохина [1–3]. В статье представлена структура ИС и разработан алгоритм самоорганизации для этой системы.

**Интеллектуальная система управления.** Одним из перспективных направлений синтеза ИС является симбиоз экспертных систем, методов самоорганизации, принятия решений, адаптивного управления и оценивания, а также алгоритмов формирования цели, объединенных в рамках функциональной структуры академика П.К. Анохина [1, 4, 5]. Отличительной чертой данной системы является то, что любой результат функционирования ИС, который способствует достижению цели, получается на основе принципа саморегуляции независимо от уровня сложности и обладает одинаковыми узловыми механизмами, а именно: афферентным синтезом цели, принятием решения к действию, акцептором действия. Акцептор действия ИС включает алгоритм построения прогнозирующих моделей, прогноз параметров будущего результата и сравнение параметров реально полученного результата с прогнозом этих параметров [5, 6].

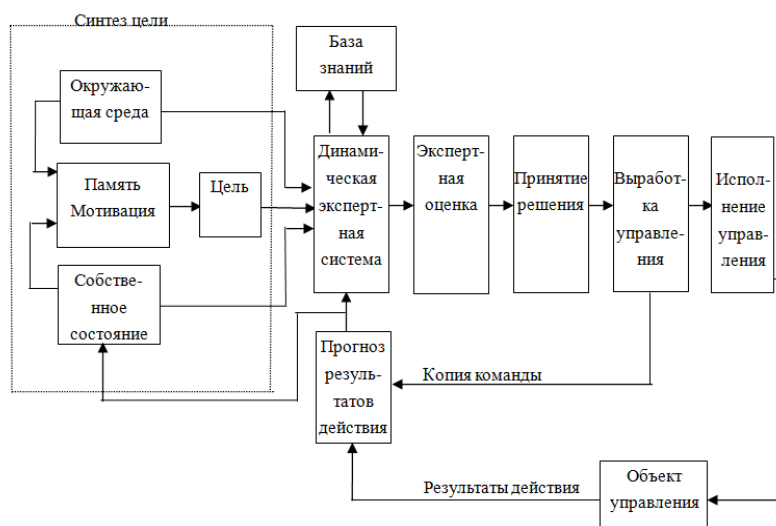


Рис. 1. Принципиальная схема интеллектуальной системы

Основными особенностями представленной на рис. 1 ИС является использование теории функциональных систем и принципов эволюции живых организмов. Она также обладает универсальной архитектурой с блоками, которые являются функциональными системами, реализованными с помощью автоном-

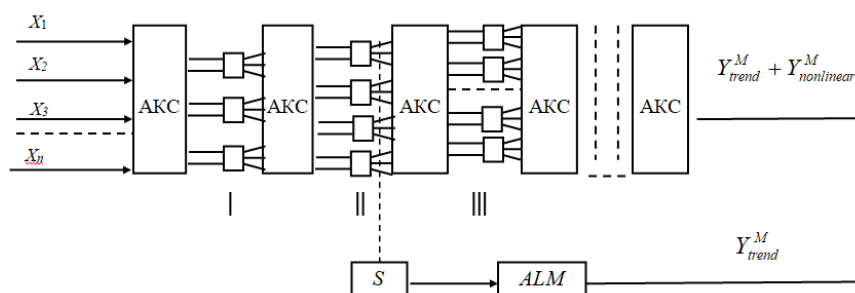
но разработанных универсальных алгоритмов и соответствующих технологий в различных предметных областях.

В акцепторе действия используется алгоритм самоорганизации, который позволяет построить прогнозирующие модели исследуемого процесса в условиях минимума априорной информации. Полученные прогнозируемые данные и результаты сопоставления параметров с реальным состоянием передаются в экспертную систему и блок синтеза цели для формирования цели функционирования несущего объекта и использования ее при принятии решений.

Синтез цели осуществляется с учетом информации о внешней среде, собственном состоянии ИС, мотивации и (при наличии) памяти. Синтезируемая цель поступает в экспертную систему. Она проводит оценку, которая лежит в основе принятия решения. После того как решение выработано, реализуется управление. Так, при отсутствии соответствия результатов действия и прогноза вырабатывается новая экспертная оценка, принимается другое решение и реализуется новое управляющее воздействие. Если соответствия достичь невозможно, происходит изменение цели ИС. Если результаты действия соответствуют прогнозу, то цель ИС достигается.

Данная универсальная структура ИС может служить основой разработки систем управления динамическими объектами различных типов [5–7]. На основе данной структуры построен интеллектуальный измерительный комплекс навигационных параметров и исследовано построение прогнозирующих моделей погрешностей навигационных систем с помощью метода самоорганизации.

**Алгоритм самоорганизации.** Метод самоорганизации представляет собой метод построения моделей, основанный на математической индукции А.Г. Ивахненко [8]. Он позволяет автоматически построить модель объекта оптимальной сложности посредством многорядного перебора с использованием ансамбля критериев селекции. Построенные методом самоорганизации модели могут прогнозировать будущее состояние управляемого объекта и обладают хорошей помехоустойчивостью.



**Рис. 2.** Основная структура модифицированного алгоритма самоорганизации

Структура модифицированного алгоритма показана на рис. 2. Здесь введены следующие обозначения:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  — модели-претенденты, которые задаются разработчиком на основе априорной информации или по результатам

предварительной обработки выборки наблюдений; АКС — ансамбль критериев селекции, в котором обычно используются критерий регулярности  $\Delta^2(B)$ , критерий минимума смещения  $n_{\text{см}}^2$  и критерий простоты модели, а также специальные критерии [8]; I, II, III — блоки усложнения моделей, которые генерируют новые промежуточные модели посредством перекрестной комбинации моделей-претендентов; блок *ALM* осуществляет построение прогнозирующей модели с помощью линейных трендов Демарка; блок *S* предназначен для реализации переключения моделей. Модель  $Y_{\text{trend}}^M$  является линейной прогнозирующей моделью, построенной с помощью линейных трендов Демарка,  $Y_{\text{nonlinear}}^M$  — нелинейной поправкой, полученной посредством метода самоорганизации.

Когда динамический объект обладает высокой маневренностью и ограничен по вычислительным ресурсам, использовать классический алгоритм самоорганизации для построения моделей невозможно. В связи с этим разработан модифицированный алгоритм построения моделей, удовлетворяющий конкретным требованиям при реализации: компактности, простоте и быстрдействию. Предлагаются компактные прогнозирующие модели, являющиеся модификацией линейных трендов Демарка и алгоритмов самоорганизации [8–10]. Линейные тренды Демарка отличаются простотой и позволяют определить тенденцию изменения исследуемого процесса. При достаточных выборках тренды модифицируются посредством метода самоорганизации, тем самым способствуя повышению точности прогноза. Данные модели способны быстро реагировать на маневр объекта и одновременно обеспечивают необходимую точность прогнозирования. При ограниченной длительности выборки и даже в условиях сенсорной депривации разработанные модели могут эффективно прогнозировать состояния управляемого объекта [5].

Поскольку ошибки измерительных систем и датчиков являются первичным источником ошибок, повышение точности измерительного комплекса является одним из важных мероприятий для обеспечения точности ИС в целом. Исследован измерительный комплекс ЛА. Для ИС ЛА предложены прогнозирующие модели погрешностей навигационных систем, полученные посредством тренда Демарка, модифицированного методом самоорганизации. При совершении ЛА маневров измерительные выборки ограничены. В этом случае используются линейные тренды Демарка для прогнозирования погрешностей навигационных систем, а когда набираются достаточные измерительные данные, целесообразно использовать нелинейные поправки, которые реализуются с помощью метода самоорганизации. Использование модифицированных трендов Демарка позволяет повысить точность прогноза. Модели переключаются в реальном времени в зависимости от интенсивности маневрирования ЛА. Данный алгоритм отличается простотой и способностью быстро и надежно прогнозировать погрешности навигационных систем при интенсивном маневрировании ЛА. Параметры объекта, получаемые с помощью прогнозирующих моделей, поступают в базу данных и используются в дальнейшем в блоке синтеза цели и в динамической экспертной системе.

Тренд Демарка, модифицированный методом самоорганизации в комбинации с нелинейной функцией имеет следующий вид:

$$\hat{z}_k = \hat{z}_{k-1} + c_{k-1}, \quad (1)$$

где  $\hat{z}_k$  — прогноз переменной состояния динамического объекта в момент времени  $k$ , прогнозируемая с помощью модифицированного тренда Демарка:

$$c_{k-1} = \sum_{i=1}^2 w_i \hat{z}_{ik-1}.$$

Здесь  $\hat{z}_{ik}$ ,  $i = \overline{1, 2}$  — являются линейным трендом и комбинирующей нелинейной функцией;  $w_i$  — весовой коэффициент в диапазоне от нуля до единицы, определяемый в зависимости от длительности прогноза.

Для оценки точности различных моделей использованы критерий среднеквадратического отклонения  $\Delta_1$  и критерий суммарного отклонения  $\Delta_2$ , которые определяются следующим образом:

$$\Delta_1 = \frac{\sum_{t \in N_p} (y_t^M - y_t)^2}{\sum_{t \in N} y_t^2}; \quad (2)$$

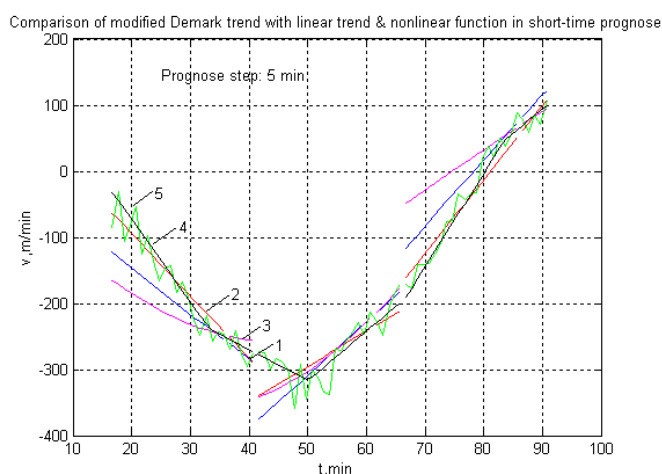
$$\Delta_2 = \begin{cases} \text{dev}_{(L+1)/2}; \\ (\text{dev}_{L/2} + \text{dev}_{L/2+1})/2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $N$  — количество членов выборки;  $N_p$  — количество членов прогноза;  $L$  — число циклов прогноза;  $y_t$ ,  $y_t^M$  — реальные значения и прогнозируемые величины соответственно;  $\Delta_1$  — отклонение прогнозируемых значений от реальных в каждом цикле прогноза;  $\Delta_2$  — суммарное отклонение прогнозируемых значений от реальных на определенном интервале.

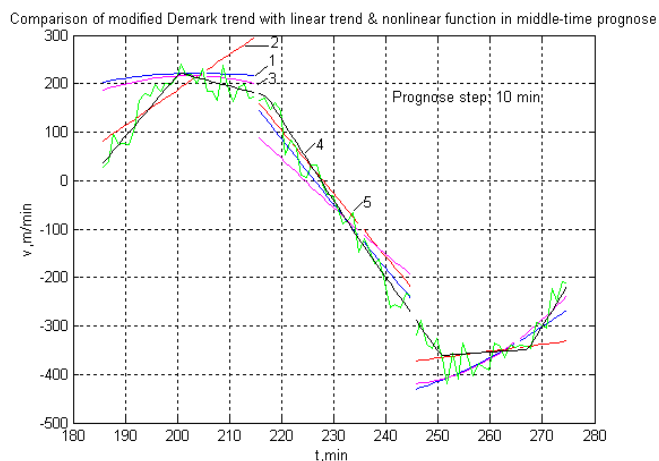
Критерий (3) применяется для оценки статистических характеристик прогнозирующих моделей с учетом различных факторов, в том числе длительностей выборки и прогноза, момента доступа измерений и уровня измерительных шумов и является адекватным для оценки точности прогнозирующих моделей при условии  $L \geq 20$ .

Критерий  $\Delta_2$  определяется следующим образом. На определенном интервале, состоящем из  $L$  циклов прогноза, вычисляют отклонения прогнозируемых значений от реальных для каждого цикла по критерию (2) и получают  $L$  чисел — значения отклонений. Выстраивают  $L$  чисел в возрастающем порядке. Для нечетного числа  $L$  запись  $\text{dev}_{(L+1)/2}$  означает отклонение такого цикла, индекс которого является  $(L+1)/2$ . А для четного числа, критерий  $\Delta_2$  равен среднему двух отклонений с индексами  $L/2$  и  $L/2+1$ .

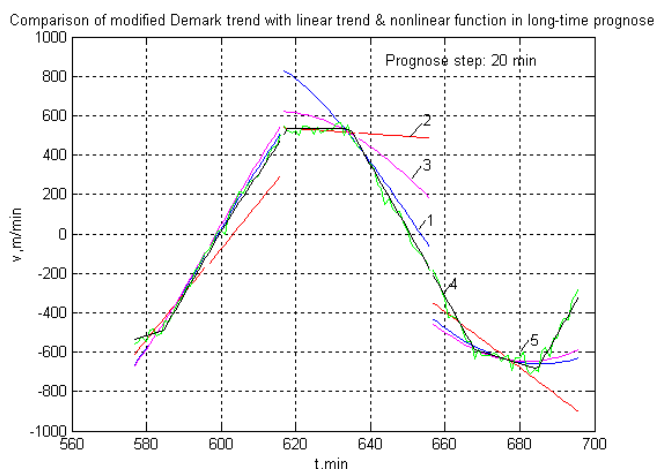
Результаты моделирования. С помощью полученной модифицированной модели, описываемой выражением (1), сделан прогноз погрешностей навигационной системы в определении скорости, который используется для коррекции выходного сигнала навигационной системы ЛА. Представлены результаты моделирования модифицированного алгоритма. При моделировании использованы данные, полученные при проведении натурных испытаний комплекса. На рис. 4–6 представлены графики краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогноза погрешностей навигационной системы. Статистические данные, отображенные на рис. 4–6, являются среднеквадратическими отклонениями ошибки прогноза.



**Рис. 4.** Сравнение ошибок прогноза погрешностей навигационных систем, полученных с помощью модифицированного алгоритма и другими методами (краткосрочный прогноз)



**Рис. 5.** Сравнение ошибок прогноза погрешностей навигационных систем, полученных с помощью модифицированного алгоритма и другими методами (среднесрочный прогноз)



**Рис. 6.** Сравнение ошибок прогноза погрешностей навигационных систем, полученных с помощью модифицированного алгоритма и другими методами (долгосрочный прогноз)

На рис. 4–6 введены следующие обозначения: 1 — погрешности навигационных систем, полученные посредством модифицированного алгоритма, 2 — погрешности, полученные посредством линейной модели, 3 — погрешности, полученные с помощью классического алгоритма самоорганизации, 4 — истинные значения погрешностей; 5 — данные измерений с помехами.

На рис. 4–6 видно, что при краткосрочном прогнозе классический тренд Демарка может определить тенденцию исследуемого процесса на минимальном интервале с удовлетворительной точностью, т. е. результаты, прогнозируемые с помощью линейного и модифицированного трендов, совпадают по критерию точности. С возрастанием длительности прогноза использование линейного тренда в чистом виде не представляется возможным. Как показано на рисунках, линейные тренды постоянно модифицируются нелинейной комбинацией, подобранной методом самоорганизации, особенно на участках, где появляются существенно нелинейные характеристики в процессе функционирования исследуемого объекта. В результате модификации методом самоорганизации точность прогноза повышается и вычислительные затраты по времени и машинной памяти цифровой бортовой вычислительной машины увеличиваются незначительно в связи с тем, что при селекции нелинейной комбинации используется скудный набор базисных функций. В итоге значения погрешностей, прогнозируемые модифицированным алгоритмом, являются самыми близкими к истинным.

Статистические данные также подтверждают тенденцию: точность прогноза посредством модифицированного алгоритма выше, чем точность двух других методов. При краткосрочном прогнозировании погрешности с использованием трех моделей сильно не различаются, зато время, затраченное на отбор нелинейной поправки, в 7 раз больше, чем на построение линейной модели. При долгосрочном прогнозировании модифицированный тренд Демарка дает результаты на 2 раза точнее, чем линейный тренд в чистом виде. При моделирова-

нии уровень шумов в измерении скорости выбран 50 м/мин из практических требований реальной навигационной системы.

Результаты моделирования подтверждают эффективность применения модифицированного алгоритма самоорганизации для построения прогнозирующих моделей.

**Заключение.** Метод самоорганизации как один из интеллектуальных алгоритмов построения моделей может быть использован для эффективного построения прогнозирующих моделей погрешностей навигационных систем после модификации. Предложенный модифицированный алгоритм построения прогнозирующих моделей используется в ИС интенсивно маневрирующих ЛА. Алгоритм отличается высокой точностью и достаточно прост в реализации на борту ЛА.

### Литература

- [1] Анохин П.К. Проблемы центра и периферии в физиологии нервной деятельности. Горький, Полиграф, 1935.
- [2] Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Разработка акцептора действия измерительного комплекса с использованием концепции динамического системного синтеза. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 2, с. 73–77.
- [3] Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Разработка навигационного комплекса с интеллектуальной компонентой. *Будущее машиностроения России. Сб. док. Восьмой Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 1115–1118.
- [4] Кэ Ф., Фам С.Ф., Ким Ч. Исследование интеллектуальных систем управления летательными аппаратами. *Автоматизация и современные технологии*, 2006, № 7, с. 10–15.
- [5] Неусыпин К.А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М., МГОУ, 2009.
- [6] Селезнева М.С., Оглоблина Ю.С. Построение самоорганизующейся модели с высокой степенью наблюдаемости. *Научный взгляд. Тр. межд. науч.-практ. конф.* М., МГОУ, 2015, с. 250–253.
- [7] Neusipin K.A., Ke Fang. The new orientation of development in the field of intelligent systems [C]. *Proc. 2003 Intelligent automation conf.* Hong Kong, 2003, pp. 30–34.
- [8] Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев, Техника, 1985.
- [9] Бабиченко А.В., Пролетарская В.А., Селезнева М.С. и др. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами. *Инженерная физика*, 2018, № 5, с. 94–102.
- [10] Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. и др. Алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 12, с. 555–563.

**Волкова Диана Сергеевна** — студентка кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Мунхуу Чулуун-Эрдэнэ** — студентка кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Худояров Вадим Артурович** — студент кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.



**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CONSTRUCTING  
SELF-ORGANIZING MODELS IN AN INTEL-LIGENT  
AIRCRAFT CONTROL SYSTEM**

**D.S. Volkova**

dianavolkova98@gmail.com

SPIN-code: 6383-3717

**Ch. Munkhuu**

chukana.cm.cm@gmail.com

SPIN-code: 3487-4990

**V.A. Khudoyarov**

vkhudoyarov@gmail.com

SPIN-code: 1982-6474

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

*This article presents the intellectual algorithm for constructing predictive mathematical models using the method of self-organization, which is the main algorithm in the modern intellectual control system based on the theory of functional systems. To overcome the shortcomings of the traditional method of self-organization, the implementation of which requires formidable computational resources, a modified predictive algorithm is proposed, combining the DeMark trend and the method of self-organization. Based on the modified algorithm, predictive models of navigation system inaccuracies are constructed. The results of mathematical modeling of predicting inaccuracies in navigation systems have demonstrated the simplicity, speed and increased accuracy of the developed algorithm for constructing predictive models in an intelligent aircraft control system.*

**Keywords**

*Self-organization method, intelligent control systems, navigation systems, predictive mathematical models, control model design algorithms, control of technical systems, control correction, prediction accuracy*

Received 10.04.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

**References**

- [1] Anokhin P.K. Problemy tsentra i periferii v fiziologii nervnoy deyatel'nosti [Problems of center and periphery in neural activity physiology]. Gor'kiy, Poligraf Publ., 1935 (in Russ.).
- [2] Selezneva M.S., Neusyypin K.A., Proletarskiy A.V. Development of an action acceptor for a measuring complex through the use of the dynamic system synthesis concept. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 2, pp. 73–77 (in Russ.).
- [3] Neusyypin K.A., Selezneva M.S. [Development of navigational complex with intellectual component]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. Sb. dok. Vos'moy Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov* [The future of Russian Mechanical Engineering. Proc. 8<sup>th</sup> Russ. Conf. of Young Scientists and Specialists]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015, pp. 1115-1118 (in Russ.).
- [4] Ke F., Fam S.F., Kim Ch. Research on intellectual control systems for aircraft. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, 2006, no. 7, pp. 10–15 (in Russ.).
- [5] Neusyypin K.A. *Sovremennye sistemy i metody navedeniya, navigatsii i upravleniya letatel'nymi apparatami* [Modern systems and methods of aircraft guidance, navigation and control]. Moscow, MRSU Publ., 2009 (in Russ.).

- [6] Selezneva M.S., Ogloblina Yu.S. Postroenie samoorganizuyushchey modeli s vysokoy stepen'yu nablyudaemosti [Self-organizing model generation with high observability degree]. *Nauchnyy vzglyad. Trudy mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Scientific view. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, MRSU Publ., 2015, pp. 250–253 (in Russ.).
- [7] Neusypin K.A., Ke Fang. The new orientation of development in the field of intelligent systems [C]. *Proc. 2003 Intelligent automation conf.* Hong Kong, 2003, pp. 30–34.
- [8] Ivakhnenko A.G., Myuller Y.A. Samoorganizatsiya prognoziryushchikh modeley [Self-organization of predictive models]. Kiev, Tekhnika, 1985 (in Russ.).
- [9] Babichenko A.V., Proletarskaya V.A., Selezneva M.S., et al. Intelligent control systems for unmanned aerial vehicles. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2018, no. 5, pp. 94–102 (in Russ.).
- [10] Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A., et al. Information processing algorithms of inertial navigation systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 12, pp. 555–563 (in Russ.).

**Volkova D.S.** — Student, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Munkhuu Ch.** — Student, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Khudoyarov V.A.** — Student, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.