

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Л.В. Григорьев

Е.И. Степченко

glv19u174@student.bmstu.ru

stepchenkoei@student.bmstu.ru

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

---

### Аннотация

Реализован метод прогнозирования, основанный на алгоритме самоорганизации и позволяющий достаточно точно получить краткосрочный прогноз погрешности тестовой модели инерциальной навигационной системы в автономном режиме работы. Разработка метода прогнозирования на основе алгоритма самоорганизации дает возможность строить модели исследуемого процесса в условиях минимума или даже полного отсутствия априорной информации. Модель, построенную в режиме коррекции инерциальной навигационной системы от внешних датчиков, можно использовать для коррекции в автономном режиме при условии исчезновения корректирующего сигнала, что позволяет повысить точность навигационной информации.

### Ключевые слова

Инерциальная навигационная система, навигационный комплекс, алгоритм самоорганизации, угол отклонения гиростабилизированной платформы, краткосрочный прогноз, беспилотный летательный аппарат, погрешности инерциальной навигационной системы, коррекция

Поступила в редакцию 07.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

---

**Введение.** В последнее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) широко применяются в гражданской и военной сферах, в связи с этим их роль в современном мире становится все более важной. Для выполнения поставленных перед БЛА задач необходимо обеспечить точное управление БЛА, для которого необходима информация от различных измерительных систем. Измерительные системы объединяются в измерительные комплексы, состоящие из инерциальных навигационных систем (ИНС), спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС, различных радиолокационных станций (РЛС) и др. [1]. Измерительные комплексы позволяют наиболее точно контролировать полет БЛА и определять его местоположение. В представленной научно-исследовательской работе реализован один из алгоритмов компенсации погрешности ИНС в автономном режиме — алгоритм прогнозирования, основанный на алгоритме самоорганизации. Этот алгоритм позволяет построить высокоточные модели исследуемых процессов в условиях минимума априорной информации [2].

**Погрешности автономных навигационных систем.** Современные ИНС имеют погрешности, обусловленные различными факторами [3]: методические и инструментальные. Методические погрешности определяются методом проведения измерений [3]. К ним относятся погрешности, вызываемые неточным

знанием структуры и параметров гравитационного поля Земли и количественных характеристик ее формы. Погрешности данного вида могут возникнуть также из-за упрощения алгоритмов, применяемых для решения задачи. Инструментальные погрешности возникают вследствие погрешностей инерциальных датчиков (например, случайный дрейф гироскопов, нестабильность масштабных коэффициентов датчиков момента гироскопов и акселерометров, погрешности передачи информации).

По реакции автономной ИНС на определенные возмущающие факторы можно сделать вывод о характере погрешностей ИНС. Наиболее опасными являются периодические или знакопеременные возмущающие моменты [4]. Например, сигнал, по каким-либо причинам возникающий на выходе акселерометра, в то время как в действительности никакого ускорения нет — нулевой сигнал. Этот сигнал обычно имеет небольшую амплитуду, представляет собой колебания с периодом Шулера и может привести к значительным погрешностям.

Погрешность ИНС имеет вид нарастающей с течением времени составляющей и наложенной на нее синусоидальной составляющей.

Погрешность ИНС в определении пройденного пути представляет собой синусоидальные колебания с частотой Шулера. Доминирующее влияние на суммарную погрешность в определении пройденного пути оказывает скорость дрейфа гироскопов. Систематический дрейф гироскопов вызывает нарастающую со временем составляющую погрешности ИНС, а также колебательную составляющую с периодом Шулера [3].

**Погрешности корректируемых навигационных систем.** Коррекция ИНС осуществляется посредством алгоритмов оценивания выходной информации.

Точность ИНС будет зависеть от погрешностей внешнего источника информации и погрешностей оценивания используемого алгоритма.

Прогноз погрешностей для корректировки ИНС при отключенных внешних источниках можно проводить с помощью алгоритмов экстраполяции. Прогнозы подразделяют на краткосрочные и долгосрочные. Краткосрочные прогнозы — прогнозы со временем упреждения 10...20 % от продолжительности наблюдения. Краткосрочное прогнозирование погрешностей ИНС может быть осуществлено на основе модели, которая получена на последнем этапе работы ИНС с внешним источником информации до момента перехода в автономный режим. Долгосрочный прогноз характеризуется временем упреждения, равным или превышающим время наблюдения. Долгосрочный прогноз применим в условиях значительных помех.

**Постановка задачи.** Обработка информации навигационных систем посредством алгоритмов управления и оценивания предполагает наличие устойчивых выходных сигналов как минимум от двух измерительных систем. Предлагается использовать ансамбль критериев селекции алгоритма самоорганизации, который используется для построения прогнозирующей модели [5].

Алгоритмы прогноза используются в качестве алгоритмического обеспечения в тех случаях, когда сигнал от одной из навигационных систем отсутствует на некоторых интервалах времени.

Задача исследования заключается в разработке алгоритмов компенсации погрешностей в определении навигационной информации для высокоточных современных навигационных систем, применяемых в системах БЛА. Компенсация погрешностей ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных погрешностям системы в определении скорости, углам отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) относительно сопровождающего трехгранника и дрейфам ГСП [6].

Для коррекции навигационной информации с помощью алгоритмов прогноза предварительно необходимо построить математическую прогнозирующую модель.

Путем решения поставленной задачи может быть достигнута цель настоящей работы — повышение точности функционирования навигационных систем БЛА.

**Принцип самоорганизации моделей.** При функционировании динамического объекта в стохастических условиях объем априорной информации о нем, как правило, минимален [7]. В связи с этим стоит применять метод самоорганизации. Принцип самоорганизации моделей можно сформулировать так: при постепенном нарастании числа рядов (следовательно, степени полного полинома, получаемого при помощи развертывания системы частных описаний) значения внешних критериев проходят через глобальный минимум, который соответствует модели оптимальной (для данного критерия) сложности [8].

Алгоритмы самоорганизации основаны на ряде принципов.

1. Принцип самоорганизации модели. Заключается в достижении внешних критериев минимума при усложнении структуры модели.

2. Принцип внешнего дополнения. Под внешним критерием будем понимать критерий, вычисляемый на основе информации, не используемой при оценке параметров (таким образом, по данным обучающей последовательности, которые уже использовались для оценки параметров, невозможно найти единственную модель оптимальной сложности).

3. Геделевский подход при самоорганизации моделей. Существует теорема неполноты Геделя никакая система аксиом не может быть логически замкнутой.

4. Разделение таблицы данных на части: обучающую, проверочную и экзаменационную выборки.

5. Принцип сохранения свободы выбора. Существует принцип неокончательных решений Габора: всякая однорядная процедура может быть заменена многорядной (требующей меньшего времени счета) только при условии сохранения достаточной «свободы выбора» нескольких лучших решений каждого предыдущего ряда.

Для метода самоорганизации необходимо выполнение трех следующих условий:

- 1) существует исходная организация (множество опорных функций);
- 2) имеется механизм для случайных изменений (мутаций) этой организации (множество моделей-претендентов);
- 3) имеется механизм выбора, с помощью которого эти мутации могут быть оценены с точки зрения их полезности для улучшения организации (алгоритм самоорганизации).

**Результаты работы алгоритма.** Математическая модель погрешностей ИНС описывается следующим соотношением [9, 10]:

$$X_k = \Phi X_{k-1} + W_{k-1}. \quad (1)$$

Здесь

$$X_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 - \beta T \end{bmatrix}, \quad W_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix},$$

где  $\delta V_k$  — вектор погрешностей измерения скорости;  $\varphi_k$  — угол отклонения гиросtabilизированной платформы относительно опорной системы координат;  $\varepsilon_k$  — скорость гироскопического дрейфа;  $T$  — период дискретизации, с;  $R$  — радиус Земли;  $g$  — ускорение свободного падения;  $W_k$  — дискретный аналог белого шума;  $\beta$  — средняя частота случайного изменения дрейфа.

Коэффициенты математической модели для алгоритма скрыты. Известными параметрами являются входной и выходной сигналы с «черного ящика» навигационной системы.

Для демонстрации работы алгоритма использованы следующие параметры матрицы  $\Phi$ :

$$g = 35280 \text{ м/мин}^2; \quad T = 1 \text{ с}; \quad R = 6\,370\,000 \text{ м}.$$

За прогнозируемую модель была взята тестовая модель ошибок ИНС, смоделированная в MATLAB с помощью соотношения (1). В связи с тем что модель тестовая, дискретный аналог белого шума  $W_k$  был принят нулевым.

Значение начального вектора входного сигнала  $X_0$  было принято следующим:

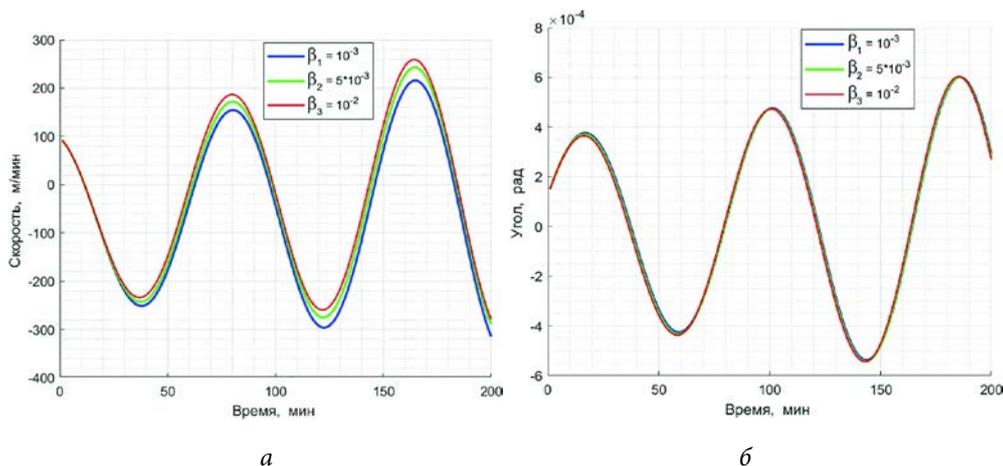
$$X_0 = [100, 10^{-4}, 10^{-5}].$$

Опираясь на «гипотезу селекции», для реализации метода самоорганизации требуется подобрать опорную функцию. Опорная функция, подобранная аналитически, представлена ниже:

$$A e^{(b-t)} \sin(\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Здесь  $A = 100 \text{ м/мин}$  — амплитуда опорной функции;  $b = 0,001$  — коэффициент;  $t = 200 \text{ мин}$  — время прогнозирования;  $\omega = 200\,000 \text{ рад/мин}$  — цикличес-

ская частота;  $\varphi = 1$  рад — сдвиг по фазе. Коэффициенты, указанные выше, подобраны для опорной функции, прогнозирующей погрешности измерения ИНС по скорости.



**Рис. 1.** Тестовые модели погрешности ИНС при средней частоте случайного изменения дрейфа  $\beta_1 = 10^{-3}$  рад/с<sup>-1</sup>;  $\beta_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  рад/с<sup>-1</sup>;  $\beta_3 = 10^{-2}$  рад/с<sup>-1</sup>:  
*a* — по скорости; *б* — по углу отклонения ГСП

Опорная функция для прогноза погрешности измерения ИНС по углам отклонения ГСП имеет вид (2), но значение амплитуды другое:  $A = 5 \cdot 10^{-4}$  рад/мин.

Задача прогнозирования была решена с применением «гипотезы селекции». Амплитуда, циклическая частота, сдвиг по фазе — эквивалент генам, присущим определенному растению, в свою очередь, опорная функция — эквивалент растения с определенным набором генов.

В данном случае алгоритм самоорганизации работает следующим образом. После инициализации начальных данных и задания опорной функции формируется структура, в которой хранятся критерий оценивания, значения 100 функций в каждый момент времени, значения их «генов». Функции формируются произвольно: амплитуда, циклическая частота и сдвиг по фазе, подобранные аналитически первый раз, умножаются на произвольное число из диапазона  $[0, 1]$  и присваиваются каждой функции.

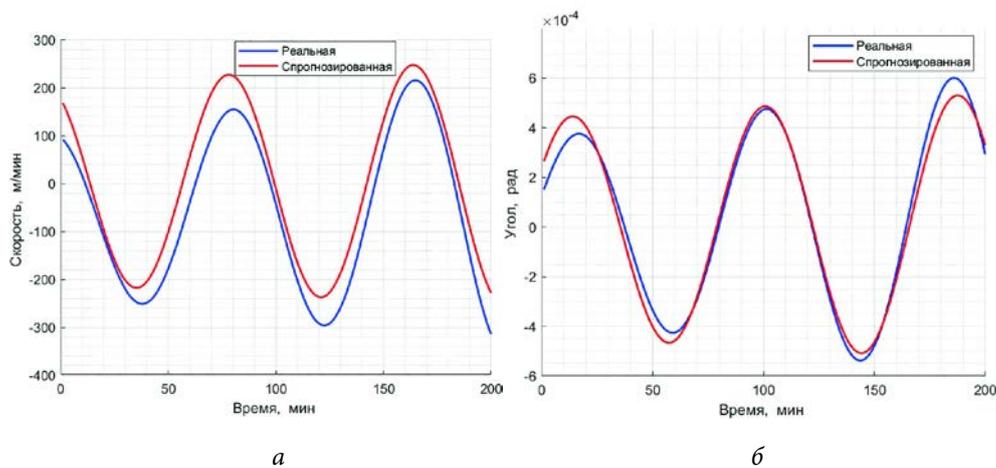
Далее по среднеквадратичному критерию оценивания выбираются пять наилучших функций и из них формируется новая структура, содержащая в себе те же самые параметры, что и структура для 100 функций.

С помощью «генов» лучших функций, отобранных на предыдущем шаге, произвольно формируется новая структура, например, амплитуда первой лучшей функции, циклическая частота пятой лучшей функции и сдвиг по фазе третьей лучшей функции присваиваются новой функции, имеющей вид (2), причем

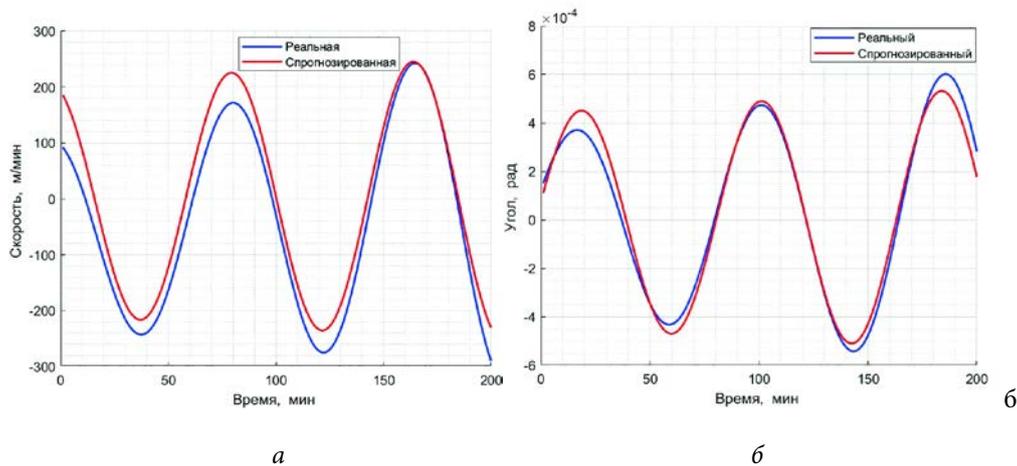
в каждой новой последовательности остаются 5 лучших функций, полученных на прошлой итерации. Для избегания «вырождения» внутри функции присваивания прописано условие, которое может добавлять «мутации», т. е. редактировать численные значения того или иного аргумента. Поиск лучшей функции, описывающей реальную модель погрешности ИНС, идет до тех пор, пока точность по критерию устойчивости не достигнет заданного значения.

После остановки поиска программа выводит графики погрешностей: реальной модели и спрогнозированной в автономном режиме работы ИНС.

Погрешность прогноза по скорости в лучшем случае составляет 3,8 %, а по углу отклонения ГСП во всех трех случаях равна примерно 1,7 %.



**Рис. 2.** Погрешность определения при  $\beta_1 = 10^{-3}$  рад/с<sup>-1</sup>:  
а — скорости; б — угла наклона ГСП



**Рис. 3.** Погрешность определения при  $\beta_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  рад/с<sup>-1</sup>:  
а — скорости; б — угла наклона ГСП

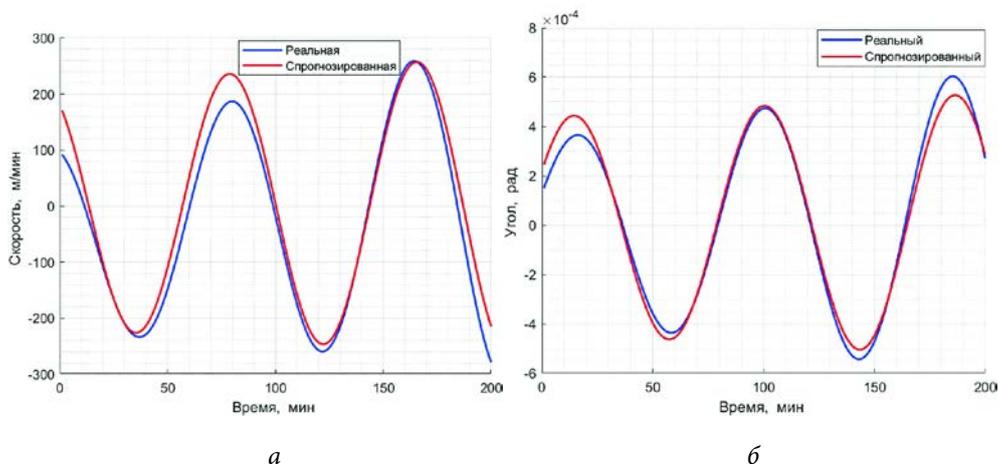


Рис. 4. Погрешность определения при  $\beta_3 = 10^{-2}$  рад/с<sup>-1</sup>:  
 а — скорости; б — угла наклона ГСП

**Заключение.** В статье реализованы тестовая модель погрешностей ИНС без учета внешних возмущений и метод прогнозирования, основанный на алгоритме самоорганизации, позволяющий с достаточной точностью получить краткосрочный прогноз погрешности ИНС в автономном режиме работы.

Точность прогноза можно увеличить путем усложнения опорной функции и добавлением новых критериев оценивания.

Разработанный алгоритм показывает хорошую точность в условиях отсутствия внешних возмущений. При возникновении внешних возмущений алгоритм может работать некорректно. Однако эту проблему можно решить с помощью добавления в структуру фильтра Калмана.

## Литература

- [1] Неусыпин К.А. *Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами*. Москва, МГОУ, 2009, 500 с.
- [2] Неусыпин К.А. Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации. *Автоматизация. Современные технологии*, 2009, № 1, с. 37–39.
- [3] Шэнь Кай, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 2, с. 28–39.  
<http://doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-28-39>
- [4] Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. Метод компенсации динамических ошибок инициальных систем. *Автоматика и телемеханика*, 1992, № 8, с. 19–24.
- [5] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–16.

- [6] Чжао Ян, Шэнь Синь. Разработка алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационных систем. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10 (39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-538>
- [7] Неусыпин К.А., Кэ Фан, Шолохов Д.О. Разработка алгоритма построения моделей с помощью метода самоорганизации для коррекции навигационных систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 3 (80), с. 57–67.
- [8] Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. *Самоорганизация прогнозирующих моделей*. Киев, Техника, 1985, 224 с.
- [9] Цибилова Т.Ю., Нгуен Д.Т. Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале. *Интернет-журнал «Науковедение»*, 2015, т. 7, № 3. <https://dx.doi.org/10.15862/162TVN315>
- [10] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шэнь Кай. Алгоритмические способы коррекции автономных инерциальных навигационных систем. *Управление в морских и аэрокосмических системах. 7-я Рос. мультиконф. по проблемам управления: сб. ст.* Санкт-Петербург, Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014, с. 637–641.

**Григорьев Леонид Владимирович** — студент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Степченко Евгений Игоревич** — аспирант кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Селезнева Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Григорьев Л.В., Степченко Е.И. Методы построения прогнозирующих моделей на основе эволюционных алгоритмов. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-959>

## METHODS IN THE FORECASTING MODELS CONSTRUCTION BASED ON THE EVOLUTIONARY ALGORITHMS

L.V. Grigoryev  
E.I. Stepchenko

glv19u174@student.bmstu.ru  
stepchenkoei@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

A forecasting method was implemented. It is based on the self-organization algorithm and makes it possible to fairly accurately obtain a short-term forecast of the error of the inertial navigation system test model in the autonomous mode. Forecasting method development based on the self-organization algorithm provides a possibility to construct models of the process under consideration with a minimum or even complete absence of the a priori information. A model constructed in the inertial navigation system correction mode with the external sensors could be introduced in the offline correction mode provided that the correction signal disappears, which allows increasing the navigation information accuracy.

### Keywords

Inertial navigation system, navigation system, self-organization algorithm, gyro-stabilized platform deflection angle, short-term forecast, unmanned aerial vehicle, inertial navigation system errors, correction

Received 07.12.2023  
© Bauman Moscow State Technical  
University, 2023

---

### References

- [1] Neusypin K.A. *Sovremennye sistemy i metody navedeniya, navigatsii i upravleniya letatel'nymi apparatami* [Modern systems and methods of guidance, navigation and control of aircraft]. Moscow, MSOU Publ., 2009, 500 p. (In Russ.).
- [2] Neusypin K.A. Development of modified self-organization algorithms for correction of navigation information. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2009, no. 1, pp. 37–39. (In Russ.).
- [3] Shen' Kay, Proletarskiy A.V., Neusypin K.A. The research into correction algorithms for aircraft navigation systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2016, no. 2, pp. 28–39. (In Russ.).  
<http://doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-28-39>
- [4] Afanas'ev V.N., Neusypin K.A. A method of compensating for dynamic errors in inertial system. *Avtomatika i telemekhanika*, 1992, no. 8, pp. 19–24. (In Russ.).
- [5] Neusypin K.A. The intellectual system development directions. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, 2002, no. 12, pp. 12–16. (In Russ.).
- [6] Chzhao Yan, Shen' Sin'. Development of self-organization algorithms for navigation systems correction. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2019, no. 10 (39). (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-538>
- [7] Neusypin K.A., Ke Fan, Sholokhov D.O. Development of algorithm to construct models using self-organization method for correction of navigational systems. *Herald of the*

- Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2010, no. 3 (80), pp. 57–67. (In Russ.).
- [8] Ivakhnenko A.G., Myuller Y.Ya. *Samoorganizatsiya prognoziryuyushchikh modeley* [Self-organization of predictive models]. Kiev, Tekhnika Publ., 1985, 224 p. (In Russ.).
- [9] Tsibizova T.Yu., Nguen D.T. Algorithmic methods of navigation systems' correction in output signal. *Internet zhurnal "Naukovedenie"*, 2015, vol. 7, no. 3. (In Russ.).  
<https://dx.doi.org/10.15862/162TVN315>
- [10] Proletarskiy A.V., Neusylin K.A., Shen' Kay. Algorithmic methods for correcting autonomous inertial navigation systems. *Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh. 7-ya Ross. mul'tikonf. po problemam upravleniya: sb. st.* [Control in marine and aerospace systems. 7th Russian multi-conference on management problems: collection of articles]. Saint Petersburg, Kontsern "TsNII "Elektropribor" Publ., 2014, pp. 637–641. (In Russ.).

**Grigoryev L.V.** — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Stepchenko E.I.** — Postgraduate, Department of Instrumentation Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Selezneva M.S., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Grigoryev L.V., Stepchenko E.I. Methods in the forecasting models construction based on the evolutionary algorithms. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-959>