УДК 681.518 DOI: 10.18698/2541-8009-2020-08-635

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПАЛУБЫ АВИАНОСЦА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

**Чжао Сюетин**

chs201718@mail.ru
SPIN-код: 5822-2441

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

**Аннотация**

*Исследована задача посадки самолета на палубу авианосца в условиях волнения моря. Для построения модели вертикального перемещения палубы предложено применять метод группового учета аргументов. Данная тема актуальна в области морской инженерии, поскольку она является основной для поддержки морских операций авианосцев в суровых морских условиях. Результаты моделирования алгоритма показали, что он служит эффективным и точным инструментом для построения модели движений палубы, вызванных волнами. Результаты данного исследования также имеют большое значение для решения проблем в сложных изменяющихся условиях волнения моря и могут быть использованы в качестве входной информации для компенсации перемещения палубы.*

**Ключевые слова**

*Авианосец, самолет, посадка, вертикальное перемещение палубы, прогноз, метод группового учета аргументов, алгоритм, построение модели, компенсация перемещения палубы*

Поступила в редакцию 19.06.2020
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

**Введение.** Посадка самолета на авианосец является сложной задачей, поскольку точка приземления перемещается случайным образом в результате движения палубы, вызванного волнением моря. Кроме того, автоматическая система посадки имеет дефекты перерегулирования и фазового запаздывания. Примерами неудачных результатов посадки могут быть столкновение (при перемещении палубы вверх) или уход самолета на второй круг (при перемещении палубы вниз).

Чтобы самолет мог успешно приземлиться на авианосец, он должен точно следовать движению палубы за последние несколько секунд до посадки. Используем результаты прогнозирования движения палубы, чтобы предоставить системе управления самолетом информацию об этом движении. Информация поступает к системе управления самолетом от различных измерительных систем: инерциальных навигационных систем, радиолокаторов, оптических систем и др. [1–5]. Эти системы имеют погрешности, которые успешно компенсируются алгоритмическим путем [6–9].

Зона посадки самолета — это палуба авианосца с шестью степенями свободы (рис. 1). На идеальную точку приземления самолета на авианосец оказывают

**Рис. 1.** Движение палубы с шестью степенями свободы

влияние не только вертикальное перемещение палубы, но и углы тангажа и крена [10, 11]. Однако самую важную роль играет вертикальное перемещение палубы. Таким образом, в данной работе исследуемым объектом служит вертикальное перемещение палубы, т. е. изменение высоты идеальной точки приземления.

Прогнозирование движения палубы авианосца может осуществляться путем анализа в частотной области (статистический метод прогноза, метод свертки), анализа во временной области (например, генетический алгоритм, нейронная сеть, анализ временных рядов). Метод свертки не может быть наилучшим вариантом для оперативных применений по причине большого объема вычислений. Другие упомянутые методы также имеют недостатки [12–14]. В последние годы для учета нелинейных характеристик движения палубы активно применяется метод нейронной сети [12]. Для реализации нейронных сетей необходимы бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ) повышенной производительности. При проведении вычислений на борту авианосца это ограничение не является существенным. Однако в условиях радиомолчания авианосца приходится строить модель качки палубы в БЦВМ самолета. В этом случае требования по быстродействию и малому объему памяти, необходимые для реализации алгоритма построения модели и прогнозирования, становятся чрезвычайно жесткими. Среди методов построения моделей для данного исследования можно применять алгоритмы самоорганизации, в частности, алгоритм, основанный на методе группового учета аргументов (МГУА).

Алгоритм основан на методе самоорганизации (активно пропагандируемом советским ученым, специалистом в области систем управления А.Г. Ивахненко в 60-х годах прошлого века [15]). Этот метод основан на математической индукции. Он позволяет автоматически построить модель объекта оптимальной сложности посредством многорядного перебора с использованием ансамбля критериев селекции (АКС), заданного разработчиком, и данных наблюдений с помехами. С помощью разделения выборки наблюдений специальным образом, выбора ансамбля критериев селекции для конкретной задачи, а также реализации процесса искусственного отбора моделей-претендентов осуществляется построение прогнозирующей модели оптимальной сложности. Алгоритм МГУА используют для различных целей: примеры его применения включают идентификацию физических законов, экстраполяцию физических полей, распознавания образов, кластеризацию, аппроксимацию многомерных процессов и др. [16].

**Алгоритм метода группового учета аргументов.** Алгоритм МГУА — это эвристический метод самоорганизации для моделирования сложных нелинейных систем. Его можно применять в различных областях: для коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних датчиков информации, основанной на использовании метода самоорганизации [6–9]; при построении моделей для краткосрочного прогнозирования погрешностей инерциальной навигационной системы с помощью алгоритма МГУА [11–14]; для прогноза параметров по критерию степени наблюдаемости переменных состояния систем [15] и в нелинейном фильтре Калмана [9]. Этот алгоритм позволяет быстро строить более простые и эффективные прогнозирующие модели, делать прогноз на борту самолета и использовать результаты прогноза в системе управления посадкой самолета.

Алгоритм МГУА был впервые использован А.Г. Ивахненко при моделировании сложных систем. Этот алгоритм включал в себя набор данных с несколькими входами и одним выходом (рис. 2). На входе заданы модели-претенденты (или частные модели), на основе которых образуют случайные комбинации и проводят отборы. Модели-претенденты выбраны по некоторой априорной информации (например, частоте движения), или просто заданы случайным образом [16]. Ансамбль критериев селекции включает общие и специальные критерии [18–20].

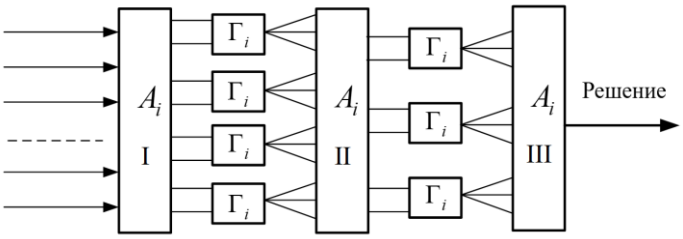


**Рис. 2.** Система, построенная по принципу МГУА:

$A_i$ — пороговые самоотборы полезной информации;

$\Gamma_i$ — генератор случайных комбинаций (гипотез); I, II, III — критерии самоотбора

Отображение между входными и выходными переменными, выполненное через ряд МГУА, является нелинейной функцией, называемой рядом Вольтерра, в форме уравнения

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^{m} a_i x_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} x_j a_{ijk} x_i x_j x_k + \cdots$$

Ряд Вольтерра как многочлен второй степени с двумя переменными анализируется с использованием уравнения

$$G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j .$$

В данной работе в качестве общего критерия используется принцип среднеквадратичной ошибки:

$$\Delta^2(B) = MSE = \sum_{i=1}^{M} (y_i - G_i)^2 \to \min,$$

где $y_i$ — данные выборки наблюдений, служащие контрольной целью, $i = 1, 2, 3, \ldots, m$, $m$ — количество данных выборки.

**Реализация метода группового учета аргументов.** В данном исследовании с помощью спектра мощности движения палубы авианосца имитируются данные о вертикальном перемещении палубы за 50 с. Этот ряд принят как «целевой» и «контрольный» для моделирования входных переменных. В качестве опорных функций используем десять тригонометрических функций:

$$X_1 = \cos(0,4t);\ X_2 = \sin(0,4t);\ X_3 = \cos(0,5t);\ X_4 = \sin(0,5t);$$
$$X_5 = \cos(0,6t);\ X_6 = \sin(0,6t);\ X_7 = \cos(0,7t);\ X_8 = \sin(0,7t);$$
$$X_9 = \cos(0,8t);\ X_{10} = \sin(0,8t).$$

С помощью этих функций создано десять рядов значений перемещения, которые считаются входными переменными. Таким образом, у входных и контрольного рядов одинаковый размер (1×501). В каждом ряду входной переменной данные подразделяются на две группы: одна для моделирования, другая — для тестирования.

Алгоритм моделируется в среде MATLAB. Проведено пять экспериментов при одних и тех же входных параметрах:

– максимальное число слоев сети $L_{\max} = 1$;

– максимальное число нейронов в каждой слоем сети $m = 15$;

– процент тренировки $p = 0,85$;

– реальное число слоев сети $L = 1$.

Выходным параметром служит минимальная ошибка в последнем слое сети $E_{\min} = 0,3118$.

В соответствии с принципом наименьшей ошибки выбраны результаты эксперимента 1, т. е. опорные функции $\cos(0,5t)$ и $\cos(0,6t)$. Соответственно, коэффициенты имеют следующие значения:

$$\begin{bmatrix} 0,0521 & -0,6497 & 3,0197 & -0,2435 & -0,1868 & -0,0550 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, модель, соответствующая имитированным (истинным) переменным движения, выражается в следующем виде:

$$X = 0,0521 - 0,6497\cos(0,5t) + 3,0197\cos(0,6t) -$$

$$-0,2435\cos^2(0,5t) - 0,1868\cos^2(0,6t) - 0,0550\cos(0,5t)\cos(0,6t).$$

Результаты реализации МГУА представлены на рис. 3–5.

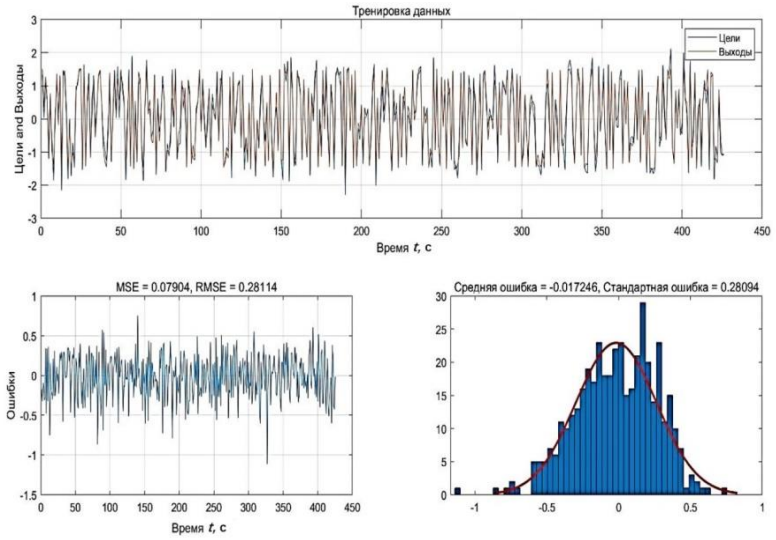


**Рис. 3.** Результат тренировки данных

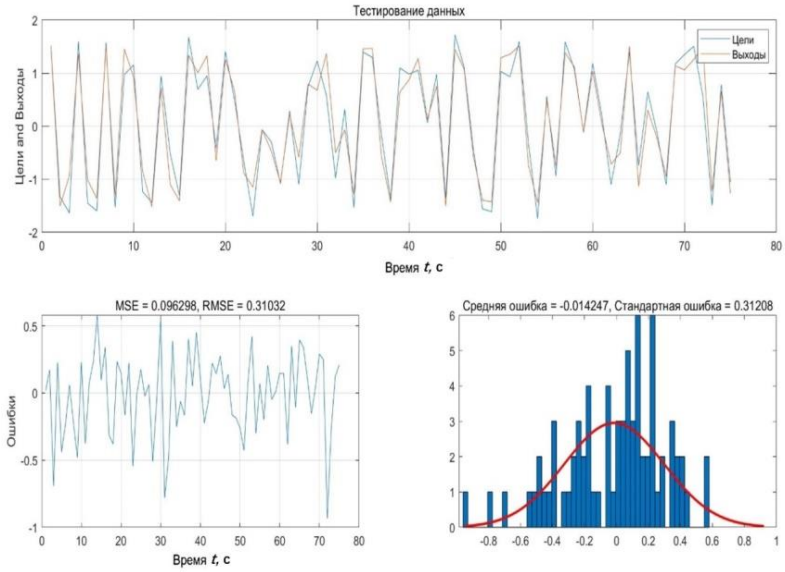


**Рис. 4.** Результат тестирования данных

Поскольку построенные модели не являются физическими, их можно применять для коррекции систем ТОЛЬКО в выходном сигнале. Для задач управления необходимо применять другие подходы [21].

**Заключение.** В данной работе рассмотрено построение модели вертикального перемещения палубы авианосца с помощью МГУА. На основании результатов работы можно сделать следующие выводы:

1) алгоритм МГУА представляет собой эффективный метод для построения модели вертикального перемещения палубы авианосца;

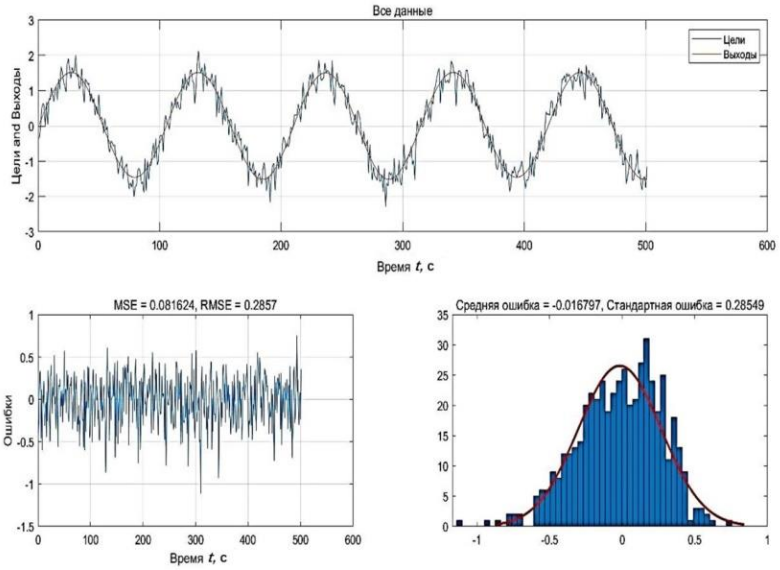


**Рис. 5.** Результат сравнения полученной модели с имитированной

2) при разных условиях сближения самолета с авианосцем модели относительного движения палубы различаются, поэтому в реальных условиях необходимо использовать разнообразные датчики информации, измеряющие не только перемещения палубы, но и параметры спутного следа авианосца, влияющего на положение самолета относительно палубы авианосца.

## Литература

[1] Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация. Современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–17.

[2] Кай Ш., Селезнёва М.С., Неусыпин К.А. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме. *Измерительная техника*, 2017, № 10, с. 16–20.

[3] Неусыпин К.А., Селезнёва М.С., Клычников В.В. Схемы алгоритмической коррекции инерциальных навигационных систем. *Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления*, 2018, № 2(44), с. 28–29.

[4] Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A. development of an algorithm for correction of an inertial navigation system in off-line mode. *Meas. Tech.*, 2018, vol. 60, no. 10, pp. 991–997. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-018-1306-8

[5] Neusypin K.A., Selezneva M.S., Proletarsky A.V., et al. Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability. *25th Saint Petersburg ICINS*, 2018, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405848

[6] Ху Ц., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Моделирование алгоритмов оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем по данным лабораторного эксперимента. *Автоматизация. Современные технологии*, 2019, № 11, с. 524–528.

[7] Пролетарский А.В., Селезнёва М.С., Клычников В.В. Оценка точности измерительной информации беспилотных летательных аппаратов. *Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления*, 2018, № 2(44), с. 33–35.

[8] Шахтарин Б.И., Шэнь К., Неусыпин К.А. Модификация нелинейного фильтра калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов. *Радиотехника и электроника*, 2016, т. 61, № 11, с. 1065–1072. DOI: https://doi.org/ 10.7868/S0033849416110115

[9] Urnes J.M., Hess R.K. Development of the F /A-18A automatic carrier landing system. *J. Guid.*, 1985, vol. 8, no. 3, pp. 289–295. DOI: https://doi.org/10.2514/3.19978

[10] Peng Yan. research on the automatic guidance and control of carrier aircraft entering and carrying on board. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.

[11] Ai Ling. Review of several methods for extreme short-term forecast of ship motion. Silicon Valley, 2009.

[12] Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев, Техника, 1985.

[13] Ebtehaj I., Bonakdari H., Zaji A.H., et al. GMDH-type neural network approach for modeling the discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. *JESTECH*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 746–757. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.04.012

[14] 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, с. 57–67.

[15] Neusypin K.A., Ke Fang. The new orientation of development in the field of intelligent systems. *Proc. 2003 Intelligent automation conf.* Hong Kong, 2003, pp. 30–34.

[16] Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component. *Meas. Tech.*, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 916–922. DOI: https://doi.org/ 10.1007/s11018-016-1067-1

[17] Селезнева М.С. Селективный измерительный комплекс для летательного аппарата. *Наука сегодня: проблемы и пути решения. Мат. межд. науч.-практ. конф.* Вологда. Маркер, 2016, 66–67.

[18] 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.

[19] Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанный на теории дифференциальной геометрии. *Автоматизация. Современные технологии*, 2012, № 1, с. 16– 20.

[20] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация. Современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–27.

[21] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация. Современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–15.

**Чжао Сюетин** — студентка кафедры «Технология приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Неусыпин Константин Авенирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Систем автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**
Чжао Сюетин. Построение модели вертикального перемещения палубы авианосца на основе метода группового учета аргументов. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 08(49). http://dx.doi.org/ 10.18698/2541-8009-2020-08-635

# BUILDING A MODEL OF VERTICAL MOVEMENT OF THE AIRCRAFT CARRIER DECK BASED ON THE METHOD OF GROUP CONSIDERATION OF ARGUMENTS

**Zhao Xueting**

chs201718@mail.ru
SPIN-code: 5822-2441

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

## Abstract

*The paper investigates the problem of landing an aircraft on the deck of an aircraft carrier in rough seas. The method of group consideration of arguments is used to build a model of vertical movement of the deck. This topic is relevant in the field of naval engineering, as it is central to supporting the naval operations of aircraft carriers in harsh maritime conditions. Modeling results from the algorithm have shown that it serves as an efficient and accurate tool for modeling wave-induced deck movements. The results of this study are also important for solving problems in difficult changing sea conditions and can be used as input information to compensate for deck movement.*

## Keywords

*Aircraft carrier, aircraft, landing, vertical movement of the deck, forecast, method of group consideration of arguments, algorithm, model building, compensation of deck movement*

Received 19.06.2020
© Bauman Moscow State Technical University, 2020

## References

[1] Buy Van Kyong, Neusypin K.A. Algorithmic method for raising efficiency of navigation systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2005, no. 7, pp. 11–17 (in Russ.).

[2] Kay Sh., Selezneva M.S., Neusypin K.A. Developing algorithm for navigation system correction in autonomous regime. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2017, no. 10, pp. 16–20 (in Russ.).

[3] Neusypin K.A., Selezneva M.S., Klychnikov V.V. Algorithmic correction schemes for inertial navigation systems. *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2018, no. 2(44), pp. 28–29 (in Russ.).

[4] Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A. development of an algorithm for correction of an inertial navigation system in off-line mode. *Meas. Tech.*, 2018, vol. 60, no. 10, pp. 991–997. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-018-1306-8

[5] Neusypin K.A., Selezneva M.S., Proletarsky A.V., et al. Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability. *25th Saint Petersburg ICINS*, 2018, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405848

[6] Khu Ts., Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Selezneva M.S. Modeling of algorithms for estimating errors of inertial navigation systems according to a laboratory experiment data are. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2019, no. 11, pp. 524–528 (in Russ.).

[7] Proletarskiy A.V., Selezneva M.S., Klychnikov V.V. Estimation of the UAV measurement data accuracy. *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2018, no. 2(44), pp. 33–35 (in Russ.).

[8] Shakhtarin B.I., Shen' K., Neusypin K.A. Modification of the nonlinear kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems. *Radiotekhnika i elektronika*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 1065–1072. DOI: https://doi.org/10.7868/S0033849416110115 (in Russ.).

(Eng. version: *J. Commun. Technol. Electron.*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 1252–1258. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064226916110115)

[9] Urnes J.M., Hess R.K. Development of the F /A-18A automatic carrier landing system. *J. Guid.*, 1985, vol. 8, no. 3, pp. 289–295. DOI: https://doi.org/10.2514/3.19978

[10] Peng Yan. research on the automatic guidance and control of carrier aircraft entering and carrying on board. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.

[11] Ai Ling. Review of several methods for extreme short-term forecast of ship motion. Silicon Valley, 2009.

[12] Müller J.A. Selbstorganisation von Vorhersagemodellen. Berlin, Technik, 1984. (Russ. ed.: Samoorganizatsiya prognoziruyushchikh modeley. Kiev, Tekhnika Publ., 1985.)

[13] Ebtehaj I., Bonakdari H., Zaji A.H., et al. GMDH-type neural network approach for modeling the discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. *JESTECH*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 746–757. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.04.012

[14] Neusypin K.A., Ke Fan, Sholokhov D.O. Development of algorithm to construct models using self-organization method for correction of navigational systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 3, pp. 57–67 (in Russ.).

[15] Neusypin K.A., Ke Fang. The new orientation of development in the field of intelligent systems. *Proc. 2003 Intelligent automation conf.* Hong Kong, 2003, pp. 30–34.

[16] Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component. *Meas. Tech.*, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 916–922. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-016-1067-1

[17] Selezneva M.S. [Selective measuring system for aircraft]. *Nauka segodnya: problemy i puti resheniya. Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Science Today: Problems and Methods of Their Solving. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Vologda. Marker Publ., 2016, 66–67 (in Russ.).

[18] Selezneva M.S., Ogloblina Yu.S. [Building self-organising model with high level of observability]. *Nauchnyy vzglyad. Tr. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Scientific View. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, MGOU Publ., 2015, pp. 250–253 (in Russ.).

[19] Neusypin K.A., Ke F., Dzya L.S. Rockets control and pointing based on the differential geometry theory. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 16– 20 (in Russ.).

[20] Neusypin K.A. Conceptual synthesis of intelligent systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2000, no. 6, pp. 23–27 (in Russ.).

[21] Neusypin K.A. The intellectual system development directions. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2002, no. 12, pp. 12–15 (in Russ.).

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

**Scientific advisor** — Neusypin K.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**
Zhao Xueting. Building a model of vertical movement of the aircraft carrier deck based on the method of group consideration of arguments**.** *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 08(49). http://dx.doi.org/ 10.18698/2541-8009-2020-08-635.html (in Russ.).