

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №3 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/162TVN315.pdf>

DOI: 10.15862/162TVN315 (<http://dx.doi.org/10.15862/162TVN315>)

УДК 681.518

Цибизова Татьяна Юрьевна

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Россия, Москва¹

Доцент кафедры «Системы автоматического управления»

Начальник «Управления образовательных технологий»

Доктор педагогических наук

E-mail: vesta952006@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=469594

Нгуен Динь Тхай

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Россия, Москва

Аспирант кафедры «Системы обработки информации и управления»

E-mail: mumc@bmstu.ru

Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале

¹ 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Аннотация. Статья посвящена алгоритмическим методам повышения точности инерциальных навигационных систем. Представлены различные схемы алгоритмической компенсации погрешностей навигационных систем в выходном сигнале. Показана, что наиболее точная коррекция осуществляется при устойчивой информации от ГЛОНАСС с использованием в качестве алгоритма оценивания фильтра Калмана. В практических приложениях априорная информация о статистических характеристиках входного и измерительного шумов достоверно неизвестна, что может приводить к расходящемуся процессу оценивания. В условиях неустойчивой работы ГЛОНАСС рассмотрена другая схема коррекции инерциальных навигационных систем с использованием эволюционных алгоритмов. В качестве такого алгоритма в работе рассмотрен генетический алгоритм.

Проведен эксперимент, заключающийся в моделировании погрешностей инерциальных навигационных систем и обработке данных с помощью генетического алгоритма. Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность и целесообразность использования генетического алгоритма для построения прогнозирующих моделей погрешностей инерциальной навигационной системы в схеме коррекции навигационной информации при исчезновении сигналов от внешних по отношению к ИНС датчиков навигационной информации.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; погрешность; коррекция; прогнозирующая модель; фильтр Калмана; генетический алгоритм.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Цибизова Т.Ю., Нгуен Д.Т. Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №3 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/162TVN315.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/162TVN315

Введение

При исследовании и проектировании систем управления различными динамическими объектами, в частности навигационных систем летательных аппаратов (ЛА) часто необходимо иметь математическую модель исследуемого процесса. При коррекции навигационных систем ЛА используются алгоритмы оценивания, например фильтр Калмана [1,4,5]. В практических приложениях априорная информация о математической модели достоверно неизвестна и ее использование в фильтре Калмана приводит к снижению точности оценивания, а иногда и к расходимости процесса оценивания. Поэтому актуальной задачей является получение адекватных исследуемому процессу математических моделей.

Получить такие модели можно путем использования алгоритмов идентификации [10] или эволюционных алгоритмов построения моделей [2,3,9]. Полученные адекватные модели используются также для прогнозирования ситуации и параметров, на основе которых осуществляется анализ и принятие управленческих решений, а также в задачах коррекции навигационных систем ЛА, когда сигнал от внешнего датчика информации пропадает. Например, при коррекции инерциальных навигационных систем (ИНС) от ГЛОНАСС встречаются ситуации, когда сигнал ГЛОНАСС кратковременно исчезает при переходе на новое рабочее созвездие, при активных и пассивных помехах [7]. При исчезновении сигнала ГЛОНАСС для коррекции ИНС используется прогнозирующая модель погрешностей ИНС, полученная на основе информации при работе ГЛОНАСС. Для построения прогнозирующих моделей могут быть использованы генетические алгоритмы (ГА), а также различные методы самоорганизации и нейронные сети [3,4,7].

Эти методы позволяют построить высокоточные модели исследуемых процессов в условиях минимума априорной информации.

Работоспособность алгоритмов построения математических моделей продемонстрирована на примере построения погрешностей навигационных систем ЛА.

1. Коррекция навигационных систем в выходном сигнале

Наиболее точная коррекция современных ИНС осуществляется алгоритмическим путем с использованием информации от ГЛОНАСС (рис. 1). В качестве алгоритмов коррекции часто используются различные алгоритмы оценивания для вычисления погрешностей измерительных систем [1,4].

В качестве алгоритма оценивания часто используют фильтр Калмана и модификации фильтров Калмана [4,5].

Фильтр Калмана обеспечивает рекурсивное решение для линейной задачи оптимального оценивания в стационарных, а также нестационарных условиях.

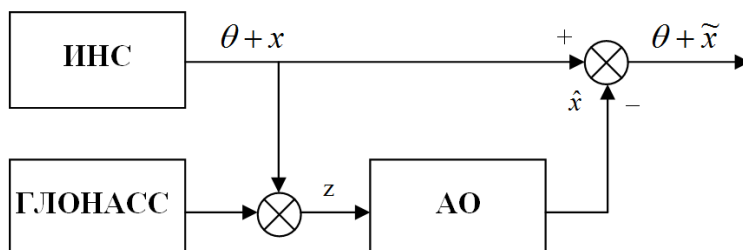


Рис. 1. Схема коррекции ИНС с внешним источником информации ГЛОНАСС:
 θ_k – истинная навигационная информация; x_k – погрешности ИНС; \hat{x}_k – оценки погрешно-

стей ИНС; \tilde{x}_k – ошибка оценивания; AO – алгоритм оценивания (фильтр Калмана); z_k – вектор измерений

Пусть модель погрешностей ИНС имеет вид [1]:

$$x_k = \Phi_k x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (1)$$

где x_k – вектор состояния; Φ_k – линейная матрица модели; w_k – вектор входного возмущения с нулевыми математическими ожиданиями и известными матрицами ковариаций Q_k .

Входные возмущения предполагаются r -мерным дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей:

$$M[W_j W_k^T] = Q_k \delta_{j,k},$$

где Q_k – неотрицательно определенная матрица; $\delta_{j,k}$ – символ Кронекера,

$$\delta_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } j=k \\ 0, & \text{если } j \neq k \end{cases}.$$

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1} + V_{k+1}. \quad (2)$$

Здесь z_{k+1} – вектор измерений; V_{k+1} – вектор ошибок измерения; H_{k+1} – матрица измерений. Ошибки измерений предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума, для которого $M[V_{k+1}] = 0$,

$$M[V_j V_{k+1}^T] = R_{k+1} \delta_{j,k+1}, \quad (3)$$

где R_{k+1} – неотрицательно определенная матрица.

Ошибки измерения и входные возмущения некоррелированы:

$$M[V_j W_k^T] = 0 \quad (4)$$

при любых j и k .

Фильтр Калмана имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k + K_{k+1} v_{k+1} \\ P_{(k+1)/k} &= \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T + Q_k \\ K_{k+1} &= P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1} \\ P_{k+1} &= (1 - K_{k+1} H_{k+1}) P_{(k+1)/k} \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $P_{(k+1)/k}$ – априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; P_{k+1} – апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания.

В практических приложениях априорная информация о статистических характеристиках входного и измерительного шумов достоверно неизвестна, что может приводить к расходящемуся процессу оценивания [4]. Поэтому для коррекции ИНС от

ГЛОНАСС используют адаптивные алгоритмы оценивания [4], являющиеся модификациями фильтра Калмана.

При совершении ЛА маневров углы отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) ИНС относительно выбранной системы координат нарастают, и линейная модель ее погрешностей, полученная с учетом предположения о горизонтальном движении несущего объекта и малости углов стабилизации, становится неадекватной реальному процессу [4].

На погрешность ИНС оказывают влияние многообразные возмущающие факторы, многие из которых коррелированы и, как правило, описываются с помощью вероятностных характеристик или стохастических уравнений. Однако достоверная информация о статистических характеристиках на практике отсутствует. Поэтому при оценивании погрешностей ИНС с использованием сложных моделей необходимо осуществлять идентификацию параметров и структуры модели в процессе функционирования системы [10].

Наиболее полно учесть все особенности характера изменения погрешностей ИНС и, что особенно важно, конкретной ИНС в условиях каждого конкретного полета возможно посредством построения нелинейной модели с помощью одного из эволюционных алгоритмов, однако в этом случае необходимо применять нелинейный фильтр Калмана, который достаточно сложен для реализации на борту ЛА [5,6].

В условиях неустойчивой работы ГЛОНАСС используется другая схема коррекции ИНС с использованием эволюционных алгоритмов, которая представлена на рис. 2.

Предполагается, что автономному режиму работы ИНС предшествовал период работы системы в режиме коррекции от ГЛОНАСС.

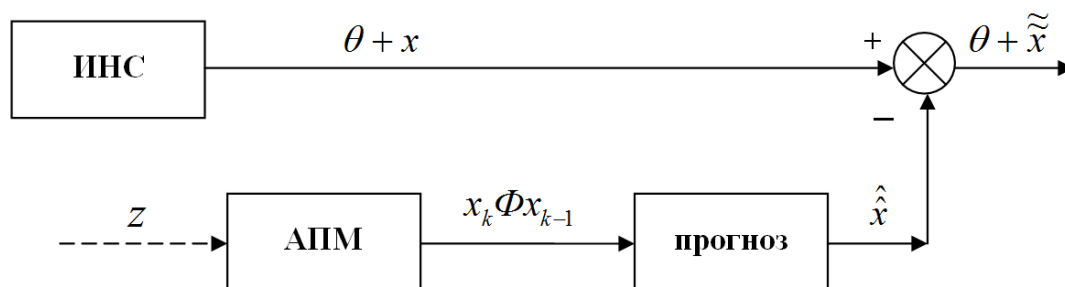


Рис. 2. Схема коррекции ИНС с использованием эволюционного алгоритма

На рис. 2 введены следующие обозначения: АПМ – алгоритм построения моделей; θ_k – истинная навигационная информация; x_k – погрешности ИНС; \hat{x}_k – прогноз погрешностей ИНС; \tilde{x}_k – ошибка прогноза; z_k – измерительная выборка.

Прогнозирующая модель построена на основе измерительной выборки, когда ГЛОНАСС функционировала. В качестве алгоритма построения моделей часто используется генетический алгоритм (ГА).

2. Исследование погрешностей навигационных систем и алгоритмов построения их моделей

Для исследования использована математическая модель погрешностей ИНС [4].

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1},$$

где

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ T & 1 & T \\ R & 0 & 1 - \beta T \\ 0 & 0 & 1 - \beta T \end{bmatrix}, W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix}$$

Здесь δV_k – ошибки ИНС в определении скорости, φ_k – углы отклонения ГСП от сопровождающего трехгранника, ε_k – скорость дрейфа ГСП, g – ускорение свободного падения, R – радиус Земли, T – период дискретизации, B – смещение нуля акселерометра, β – средняя частота случайного изменения дрейфа, ω_{k-1} – дискретный аналог белого гауссова шума.

Предположим, что измеряется только первая компонента вектора состояния, т.е.

$$z_k = Hx_k + V_k,$$

где z_k – вектор измерений; $H = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$; V_k – измерительный шум, который представляет собой дискретный аналог белого гауссова шума; W_{k-1} и V_k – независимые процессы.

Результаты моделирования представлены только для одной компоненты вектора состояния x_1 , так как для остальных компонент моделирование выполняется аналогично. Для непосредственно не измеряемых компонент вектора состояния вектор приведенных измерений формируется с помощью скалярного подхода [8].

При построении математической модели ГА имеет общую структуру, представленную на рис. 3.

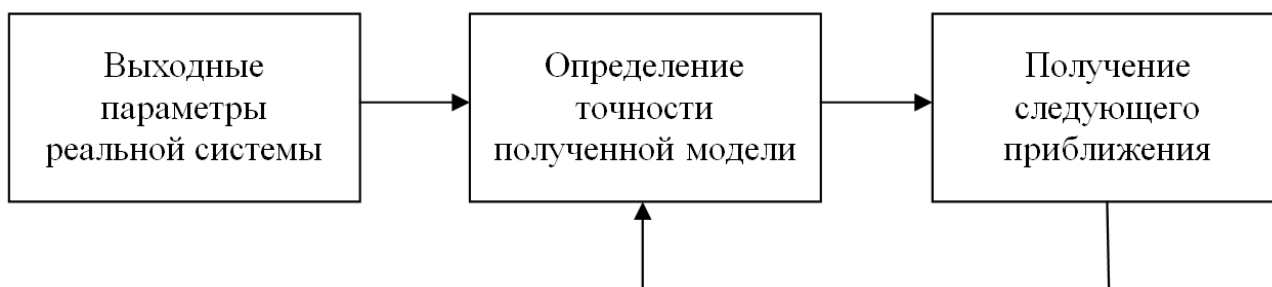


Рис. 3. Общая структура генетического алгоритма

Выбор моделей-претендентов из популяции происходит случайным образом. Вероятность выбора из популяции тем выше, чем больше «приспособленность» (наименьшее расхождение вектора выходных параметров между полученной и реальной моделью).

Выбор замещаемой особи происходит подобно выбору родителей, но с вероятностью быть отобранной тем выше, чем ниже уровень функции приспособленности [9,11].

Простой ГА случайным образом генерирует начальную совокупность (популяцию) особей. Работа ГА представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех

пор, пока не выполнится заданное число поколений или какой-то критерий остановки. На каждом поколении ГА реализуется отбор пропорционально приспособленности, одноточечный кроссовер и мутация.

Эксперимент заключается в моделировании погрешностей ИНС и обработке данных с помощью ГА.

Результаты работы ГА получены авторами и представлены на рис. 4 а) и б).

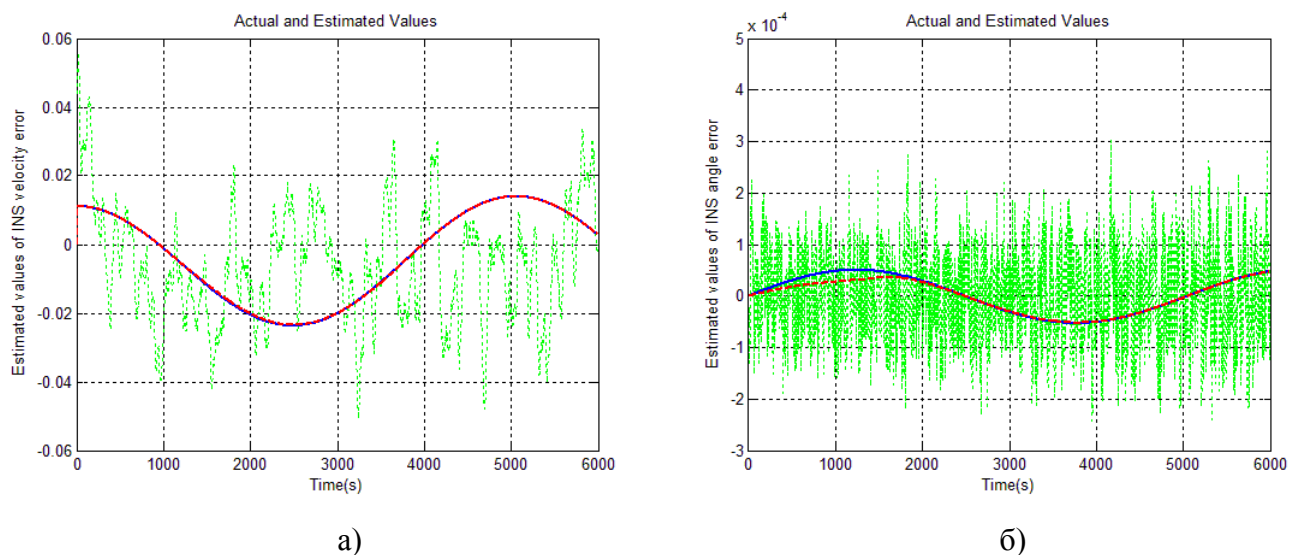


Рис. 4. Результаты работы ГА

На рис. 4а) представлены результаты моделирования погрешностей ИНС в определении скорости и модель ГА. На рис. 4б) показаны результаты моделирования погрешностей ИНС в определении скорости и модель ГА, построенная на основе сглаженной измерительной выборки.

Известно, что в общем случае использование только ГА для решения задачи не очень эффективно [9,11], так как в этом случае поиск оптимального значения параметров аппроксимирующей функции производится недостаточно направленно. В связи с этим, для более быстрого и более точного нахождения решения следует использовать один из математических методов поиска минимума функционала, представляющего собой, например, среднеквадратическое отклонение построенной модели от имеющихся значений выборки реальной функции времени. Найти глобальный минимум достаточно трудно из-за наличия значительного количества локальных экстремумов и такая задача требует значительных вычислительных затрат при практически полном переборе возможных решений с заданной точностью. Приемлемым способом нахождения значений параметров аппроксимирующей функции, приближенных к оптимальным, является поиск локальных экстремумов при помощи градиентного спуска и переход к другим экстремумам, более близким к глобальному при помощи ГА, производящего модификацию найденных векторов решений с критерием минимизации среднеквадратического отклонения. Одним из способов получения прогноза является комбинирование ГА и аппроксимации многочленом по методу наименьших квадратов.

Однако при решении задачи прогноза погрешностей ИНС использование классического ГА позволяет получить удовлетворительный результат. Применение более сложных модифицированных ГА нецелесообразно, так как выигрыш в точности незначительный, а вычислительные затраты существенно увеличиваются.

Таким образом, результаты моделирования показали, что ГА достаточно точно осуществляет построение модели исследуемого процесса – погрешностей ИНС. По результатам математического моделирования ошибка построения модели в среднем не превышает 15% от номинала. При предварительном сглаживании измерительного сигнала точность повышается в среднем на 3-5%.

Заключение

Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность и целесообразность использования ГА для построения прогнозирующих моделей погрешностей ИНС в схеме коррекции навигационной информации при исчезновении сигналов от внешних по отношению к ИНС датчиков навигационной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. – 2005. – №7. – С. 11–15.
2. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Киев: Техника, 1985. – 376 с.
3. Неусыпин К.А. Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – №1. – С. 37-39.
4. Неусыпин К.А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 500 с.
5. Неусыпин К.А., Шелухина Н.А. Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана // Автоматизация и современные технологии. – 2000. – №4. – С. 21-23.
6. Пролетарский А.В. Концепция системного синтеза динамических объектов // Автоматизация. Современные технологии. – 2007. – №8. – С. 28-33.
7. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кэ Фан, Ким Чжэсу. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. – 2013. – №2. – С. 30-34.
8. Салычев О.С. Скалярное оценивание многомерных динамических систем. – М., Машиностроение, 1987. – 215 с.
9. Фам С.Ф., Цибизова Т.Ю. Методы построения математических моделей: генетические алгоритмы // В сборнике: Достижения вузовской науки: Труды международной научно-практической конференции. – М.: ИИУ МГОУ, 2014. – С. 158-162.
10. Цибизова Т.Ю. Методы идентификации нелинейных систем управления // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-1791> (дата обращения 14.05.2015).
11. Цибизова Т.Ю., Чан Нгок Хыонг, Нгуен Динь Тхай. Разработка компактного генетического алгоритма летательного аппарата // Естественные и технические науки. – 2015. – №4(82). – С. 175-178.

Рецензент: Неусыпин Константин Авенирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления», директор Научно-образовательного центра «Интеллектуальные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Tsibizova Tatyana Yuryevna
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
E-mail: vesta952006@yandex.ru

Nguyen Dinh Thai
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
E-mail: mumc@bmstu.ru

Algorithmic methods of navigation systems' correction in output signal

Abstract. This article is devoted to algorithmic methods of accuracy improvement in inertial navigation systems. Different schemes of errors' reduction in navigators' output signal are introduced. The authors show that the most accurate correction is provided by stable GLONASS data with Kalman filter used as estimation algorithm. In practice a priori statistical data regarding input and measuring noise is unknown that might result in divergent estimation process. With unstable GLONASS running another correction scheme for inertial navigation systems focused on evolution algorithms is offered. For example, genetic one, examined in the article.

The experiment of errors' simulation in inertial navigators and data processing via genetic algorithm is carried out. Mathematical modelling results demonstrate genetic algorithm's efficiency and expediency for predictive errors' models used by inertial navigation systems in its correction scheme, should the outside navigation sensor is disappeared.

Keywords: aircraft; inertial navigation system (inertial navigator); error; correction; predictive model; Kalman filter; genetic algorithm.

REFERENCES

1. Buy Van Kyong, Neusypin K.A. Algoritmicheskiy sposob povysheniya tochnosti navigatsionnykh sistem // Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. – 2005. – №7. – S. 11–15.
2. Ivakhnenko A.G., Myuller Y.Ya. Samoorganizatsiya prognoziruyushchikh modeley. – Kiev: Tekhnika, 1985. – 376 s.
3. Neusypin K.A. Razrabotka modifitsirovannykh algoritmov samoorganizatsii dlya korrektsii navigatsionnoy informatsii // Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. – 2009. – №1. – S. 37-39.
4. Neusypin K.A. Sovremennye sistemy i metody navedeniya, navigatsii i upravleniya letatel'nyimi apparatami. – M.: Izd-vo MGOU, 2009. – 500 s.
5. Neusypin K.A., Shelukhina N.A. Korrektsiya navigatsionnoy informatsii posredstvom nelineynogo fil'tra Kalmana // Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. – 2000. – №4. – S. 21-23.
6. Proletarskiy A.V. Kontseptsiya sistemnogo sinteza dinamicheskikh ob"ektov // Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii. – 2007. – №8. – S. 28-33.
7. Proletarskiy A.V., Neusypin K.A., Ke Fan, Kim Chzhesu. Metody korrektsii navigatsionnykh sistem bespilotnykh letatel'nykh apparatov // Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii. – 2013. – №2. – S. 30-34.
8. Salychev O.S. Skalyarnoe otsenivanie mnogomernykh dinamicheskikh sistem. – M., Mashinostroenie, 1987. – 215 s.
9. Fam S.F., Tsibizova T.Yu. Metody postroeniya matematicheskikh modeley: geneticheskie algoritmy // V sbornike: Dostizheniya vuzovskoy nauki: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – M.: IIU MGOU, 2014. – S. 158-162.
10. Tsibizova T.Yu. Metody identifikatsii nelineynykh sistem upravleniya // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2015. – №1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-1791> (data obrashcheniya 14.05.2015).
11. Tsibizova T.Yu., Chan Ngok Khyong, Nguen Din' Tkhay. Razrabotka kompaktnogo geneticheskogo algoritma letatel'nogo apparata // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2015. – №4(82). – S. 175-178.