

К. А. Неусыпин, Кэ Фан, Д. О. Шолохов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА САМООРГАНИЗАЦИИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Приведен способ коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних датчиков информации, основанный на использовании прогнозирующих моделей. Предложены модифицированный алгоритм прогноза, комбинирующий тренд Демарка и метод самоорганизации. Построены прогнозирующие модели погрешностей навигационных систем. Показана эффективность разработанного алгоритма для построения прогнозирующих моделей в навигационном комплексе летательных аппаратов.

E-mail: neusypin@mail.ru; twowforden@mail.ru

Ключевые слова: построение прогнозирующих моделей, метод самоорганизации, погрешности навигационных систем.

Управление динамическими объектами, в частности летательными аппаратами (ЛА), обычно осуществляется на основе навигационной информации. В настоящее время наиболее точными являются измерительные системы, объединенные в навигационный комплекс (НК). Как правило, базовой системой НК является инерциальная навигационная система (ИНС), а в качестве внешних измерительных систем используются ГЛОНАСС, различные РЛС, доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС), астрокорректоры и т.п. Коррекция ИНС проводится с помощью сигналов от внешних источников информации. Однако иногда воспользоваться корректирующим сигналом невозможно из-за увеличения уровня пассивных помех, постановки активных помех, изменения режима полета, смены рабочего созвездия ГЛОНАСС и т.д. [1].

В настоящей работе рассмотрены алгоритмические методы повышения точности навигационной информации при функционировании систем в условиях исчезновения сигнала от внешних источников информации.

Коррекция ИНС проводится посредством оценки ее погрешностей с помощью алгоритма оценивания (АО) и последующей компенсации в выходном сигнале. Рабочий контур НК в режиме коррекции от ДИСС показан на рис. 1 (при увеличении уровня помех ДИСС использовать его для коррекции не представляется возможным). При исчезновении сигналов от внешних датчиков информации для коррекции ИНС используется прогноз погрешностей, для этого необходима какая-либо математическая модель. В практических приложениях краткосрочный

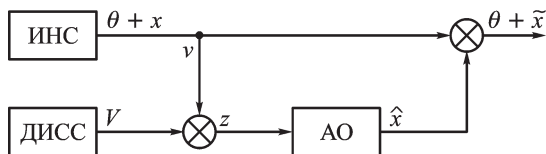


Рис. 1. Рабочий контур НК с использованием ДНСС

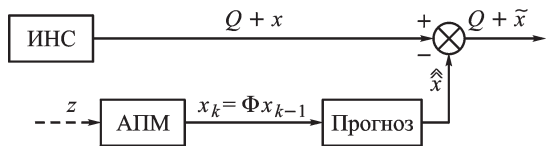


Рис. 2. Рабочий контур НК с использованием прогнозирующей модели

прогноз может быть выполнен с помощью априорных математических моделей. Такие модели совершенно не пригодны для долгосрочного прогноза, поэтому целесообразно осуществлять построение прогнозирующих моделей в процессе функционирования НК на борту ЛА. В этом случае лучшими оказываются нефизические, аппроксимирующие модели.

Известные подходы к построению прогнозирующих моделей [1–4] отличаются по объему необходимой априорной информации об исследуемом объекте. Структурная схема рабочего контура НК с использованием алгоритма построения модели (АПМ) при отключении внешних датчиков приведена на рис. 2.

При функционировании динамического объекта в стохастических условиях объем априорной информации о нем, как правило, минимален. Поэтому целесообразно использовать для построения прогнозирующей модели подход самоорганизации [3].

Реализация алгоритма самоорганизации предполагается на борту динамического объекта. Обычно к таким алгоритмам предъявляются достаточно жесткие требования по быстродействию, компактности и простоте реализации в БЦВМ. Большое значение эти требования имеют при прогнозировании состояния высокоманевренных динамических объектов. Алгоритм самоорганизации, позволяющий построить прогнозирующие модели исследуемого процесса в условиях минимума априорной информации, — это один из перспективных методов построения математических моделей.

Метод самоорганизации (активно пропагандируемый А.Г.Ивахненко в 60-х годах прошлого века [3]) представляет собой метод построения моделей, основанный на математической индукции. Такой метод 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

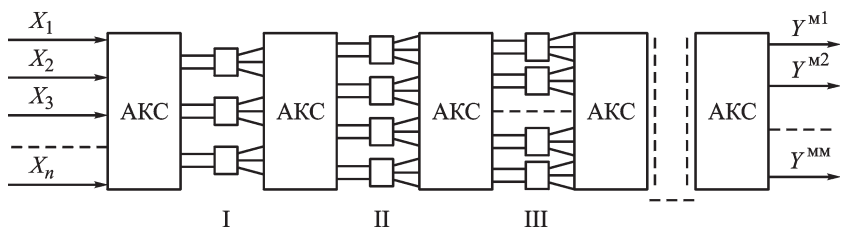


Рис. 3. Структура алгоритма самоорганизации

для конкретной задачи, а также реализации процесса искусственного отбора моделей-претендентов осуществляется построение прогнозирующей модели оптимальной сложности. Построенные таким образом модели могут прогнозировать будущее состояние управляемого объекта и имеют хорошую помехоустойчивость. Структура алгоритма самоорганизации показана на рис. 3, где введены следующие обозначения: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ — модели-претенденты, задаваемые разработчиком на основе априорной информации или по результатам предварительной обработки выборки наблюдений; I, II, III — блоки усложнения моделей, которые генерируют новые промежуточные модели посредством перекрестной комбинации моделей-претендентов; Y^{M1}, Y^{M2}, Y^{MM} — модели, построенные после селекции посредством АКС.

Критерий регулярности $\Delta^2(B)$ определяет в основном средневариационное отклонение значений реальных и значений, вычисляемых с помощью моделей на проверочной выборке, т.е.

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{t \in N_B} (y_t^M - y_t)^2}{\sum_{t \in N} y_t^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где y_t — исходные данные выборки; y_t^M — значения, вычисляемые с помощью моделей; N, N_B — полная и проверочная выборки соответственно.

Критерий минимума смещения $n_{см}^2$ представляет собой значение средневариационного отклонения выходов моделей A, B для всей выборки и обозначает непротиворечивость моделей:

$$n_{см}^2 = \frac{\sum_{t \in N} (y_t^A - y_t^B)^2}{\sum_{t \in N} y_t^2} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Выборка исходных данных делится на две одинаковые части N_A, N_B , на которых соответственно определяются модели A и B с выходами y_t^A, y_t^B и параметрами C_i^A, C_i^B .

В соответствии с теорией самоорганизации метод генерирования последовательных комбинаций и отбора математических моделей при

возрастании их сложности является универсальным методом отыскания модели оптимальной сложности. В процессе отбора значение ансамбля критериев уменьшается и достигает минимума, что соответствует получению модели оптимальной сложности [3].

Классический алгоритм самоорганизации реализуется с помощью громоздких процессов отбора, особенно когда используется полная комбинация моделей-претендентов для синтеза промежуточных моделей. В этом случае резко возрастает требование к вычислительным ресурсам, т.е. необходимо обеспечить высокую скорость вычисления и большой объем памяти БЦВМ.

При высокой маневренности динамического объекта в условиях ограничения вычислительных ресурсов невозможно использовать классический алгоритм самоорганизации для построения моделей. В связи с этим разработан модифицированный алгоритм построения моделей, удовлетворяющий конкретным требованиям при реализации: компактность, простота и быстродействие. Предлагаются компактные прогнозирующие модели, являющиеся модификацией линейных трендов Демарка и алгоритмов самоорганизации. Линейные тренды Демарка отличаются простотой и позволяют определить тенденцию изменения исследуемого процесса. При получении достаточных выборок тренды модифицируются посредством метода самоорганизации и тем самым повышается точность прогноза. Такие 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 [4].

Поскольку ошибки измерительных систем и датчиков являются первичным источником ошибок, повышение точности измерительного комплекса – это одно из важных мероприятий для обеспечения точности СУ в целом. Исследован измерительный комплекс ЛА. Предложены прогнозирующие модели погрешностей навигационных систем, полученные посредством тренда Демарка, модифицированного методом самоорганизации. При маневрировании ЛА измерительные выборки ограничены, в этом случае для прогнозирования погрешностей ИНС используются линейные тренды Демарка, а когда набираются достаточные измерительные данные, то целесообразно использовать нелинейные поправки, реализуемые с помощью метода самоорганизации. Использование модифицированных трендов Демарка позволяет повысить точность прогноза. Модели переключаются в реальном масштабе времени в зависимости от интенсивности маневрирования ЛА. Такой алгоритм отличается простотой и способностью быстро

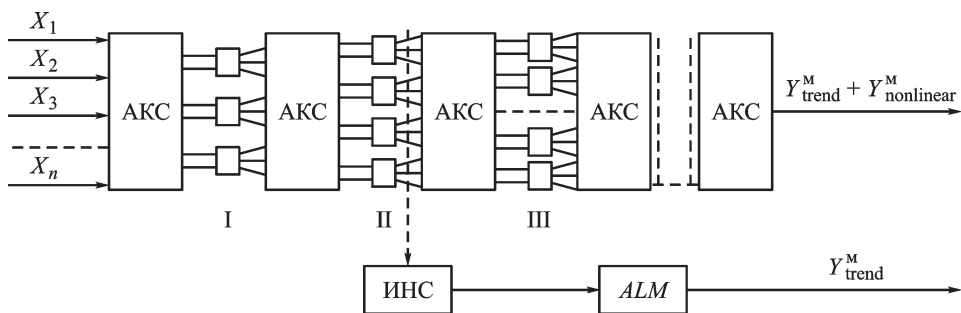


Рис. 4. Структура модифицированного алгоритма самоорганизации

и надежно прогнозировать погрешности ИНС при интенсивном маневрировании ЛА. Предлагаемый алгоритм может эффективно функционировать с необходимой точностью и не требует больших вычислительных ресурсов. Параметры объекта, получаемые с помощью прогнозирующих моделей, поступают в базу данных и используются в дальнейшем в блоке синтеза цели и в динамической экспертной системе.

По сравнению с алгоритмом, приведенным на рис. 3, алгоритм, показанный на рис. 4, отличается блоком *ALM*, который осуществляет построение прогнозирующей модели с помощью линейных трендов Демарка. Блок ИНС предназначен для реализации переключения моделей; Y_{trend}^M является линейной прогнозирующей моделью, построенной с помощью линейных трендов Демарка, а $Y_{\text{nonlinear}}^M$ — нелинейной поправкой, полученной посредством метода самоорганизации. Использование модели, являющейся комбинацией $Y_{\text{trend}}^M + Y_{\text{nonlinear}}^M$, позволяет повысить точность прогноза.

Построение модели Y_{trend}^M с помощью линейных трендов Демарка проводится с помощью следующих двух методов.

1. Тренд, построенный по экстремальным точкам выборки, выражается в виде

$$\hat{z}_{0k} = k_{0k}t_k + d_{0k}, \quad (3)$$

где \hat{z}_{0k} — прогнозируемое значение; k_{0k} , d_{0k} — параметры тренда (крутизна и константа); t_k — время, в течение которого используется модель для получения прогнозируемого значения.

Величины k_{0k} , d_{0k} определяются следующим образом. Измерительная выборка разделяется на две определенные группы в зависимости от ее длительности. Из каждой группы выбираются точки с максимальными и минимальными значениями. Для получения тренда эти две точки соединяются прямой линией в следующей последовательности: при нисходящей тенденции выборки используется максимальное значение, а при восходящей тенденции выборки — минимальное. Такие точки будем называть опорными точками.

Модель (3) имеет преимущество при изменении выборки высокоманевренного ЛА.

2. Классический тренд Демарка, построенный на основе усредненных значений выборки с опорными точками a_1, b_1 , выражается в виде

$$\hat{z}_{1k}(a_1, b_1) = k_{1k}t_k + d_{1k}, \quad (4)$$

где \hat{z}_{1k} — прогнозируемое значение; a_1, b_1 — координаты опорных точек; k_{1k}, d_{1k} — параметры тренда (крутизна и константа). Все значения и параметры определяются в зависимости от времени t_k .

Величины k_{1k}, d_{1k}, a_1, b_1 находят следующим образом: измерительная выборка делится на две части; усредняются значения всех точек в каждой части и получаются два усредненных значения, которые используются как координаты опорных точек в сочетании с выбранными координатами a_1, b_1 .

Модель (4) отличается более точной аппроксимацией к выборке, особенно при крейсерском полете ЛА.

Для моделей-претендентов на начальном этапе получения нелинейной поправки $Y_{\text{nonlinear}}^M$ при построении модели измерительного комплекса ЛА с учетом априорной информации изменения погрешностей ИНС принимается нелинейная функция следующего вида:

$$\hat{x}_{2k} = A_{1mk} \sin(\omega t_k + P_{1k}) + A_{2mk} \cos(\omega t_k + P_{2k}), \quad (5)$$

где \hat{x}_{2k} — прогнозируемая величина; $A_{1mk}, P_{1k}, A_{2mk}, P_{2k}$ — амплитуды и фазы гармонических составляющих, которые подобраны методом самоорганизации. Все значения и параметры определяются в зависимости от времени t_k .

Для данного случая в блоках усложнения моделей сохраняется жесткость заданной структуры моделей с варьированием и перекрестной комбинацией параметров, на основе этого проводится последовательный перебор. С возрастанием рядов селекции увеличивается сложность моделей и уменьшается значение ансамбля критериев отбора моделей. Достижение минимума ансамбля критериев определяет получение модели оптимальной сложности.

Тренд Демарка в комбинации с нелинейной функцией имеет следующий вид:

$$\hat{z}_k = \hat{z}_{k-1} + c_{k-1}, \quad (6)$$

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

$$c_{k-1} = \sum_{i=1}^2 w_i \hat{z}_{ik-1}. \quad (7)$$

В выражение (7) входят \hat{z}_{ik} , $i = \overline{1, 2}$, — линейный тренд и комбинирующая нелинейная функция, выбранные в соответствии с моделями (4) и (5), а также w_i — весовой коэффициент в диапазоне от 0 до 1, определяемый в зависимости от длительности прогноза.

Для оценки точности различных моделей использованы критерий среднеквадратического отклонения Δ_1 и критерий суммарного отклонения Δ_2 :

$$\Delta_1 = \sum_{t \in N_p} (y_t^M - y_t)^2 / \sum_{t \in N} y_t^2; \quad (8)$$

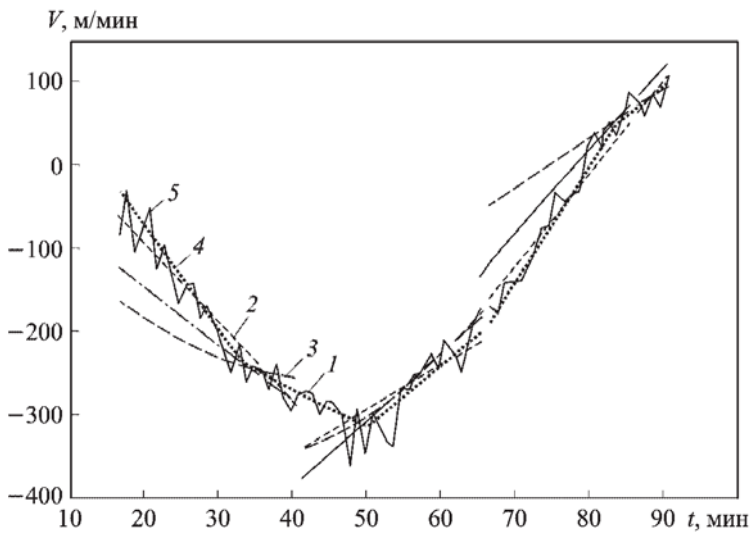
$$\Delta_2 = \begin{cases} \text{dev}_{(L+1)/2}, \\ (\text{dev}_{L/2} + \text{dev}_{L/2+1})/2, \end{cases} \quad (9)$$

где N — число членов выборки; N_p — число членов прогноза; L — число циклов прогноза; y_t , y_t^M — реальные и прогнозируемые величины; Δ_1 — отклонение прогнозируемых значений от реальных в каждом цикле прогноза; Δ_2 — суммарное отклонение прогнозируемых значений от реальных на определенном интервале. Критерий (9) применяется для оценки статистических характеристик прогнозирующих моделей с учетом различных факторов, в том числе длительностей выборки и прогноза, момента поступления измерений и уровня измерительных шумов. По результатам моделирования критерий (9) является адекватным для оценки точности прогнозирующих моделей при условии $L \geq 20$.

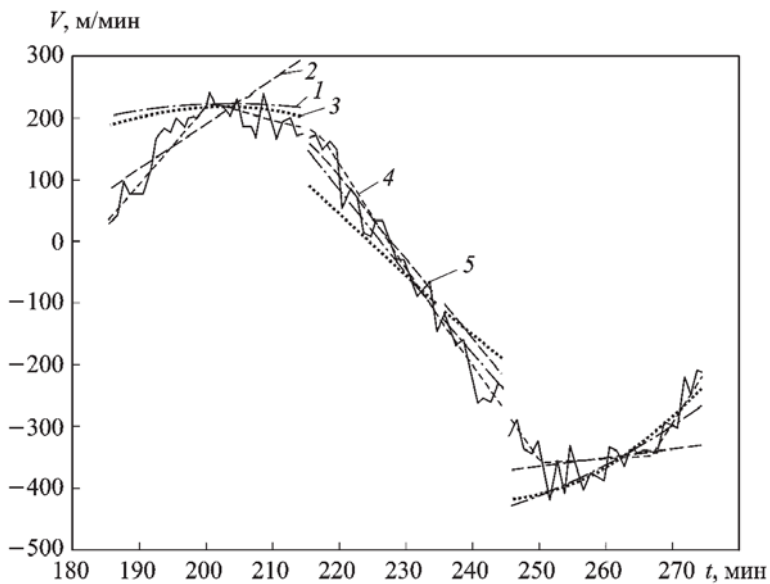
Критерий Δ_2 определяется следующим образом. На определенном интервале, состоящем из L циклов прогноза, вычисляются отклонения прогнозируемых значений от реальных для каждого цикла по критерию (8) и получаются L чисел отклонений. Выстраиваем L чисел в возрастающем порядке. Для нечетного числа L $\text{dev}_{(L+1)/2}$ обозначает отклонение цикла с индексом $(L+1)/2$, а для четного числа критерий Δ_2 равен среднему значению двух отклонений, индексами которых являются $L/2$ и $L/2 + 1$.

С помощью полученной модифицированной модели выполнен прогноз погрешностей ИНС в определении скорости, который используется для коррекции выходного сигнала навигационной системы ЛА. Рассмотрим результаты моделирования модифицированного алгоритма (при моделировании использованы классические тестовые математические модели [1, 2, 4]). На рис. 5 показаны графики кратко- (а), средне- (б) и долгосрочного (в) прогноза погрешностей навигационной системы. В табл. 1–3 приведены статистические данные, которые являются среднеквадратическими отклонениями ошибки прогноза.

Из рис. 5 следует, что при краткосрочном прогнозе классический тренд Демарка может определить тенденцию исследуемого процесса на минимальном интервале с удовлетворительной точностью, т.е.



a



б

Рис. 5 (начало). Сравнение ошибок прогноза погрешностей ИНС, полученных с помощью модифицированного алгоритма (1), линейной модели (2), классического алгоритма самоорганизации (3):

a, б, в — краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогнозы соответственно; 4 — истинные значения погрешностей; 5 — измеренные данные с помехами; время прогнозирования 5 мин (*a*); 10 мин (*б*) и 20 мин (*в*)

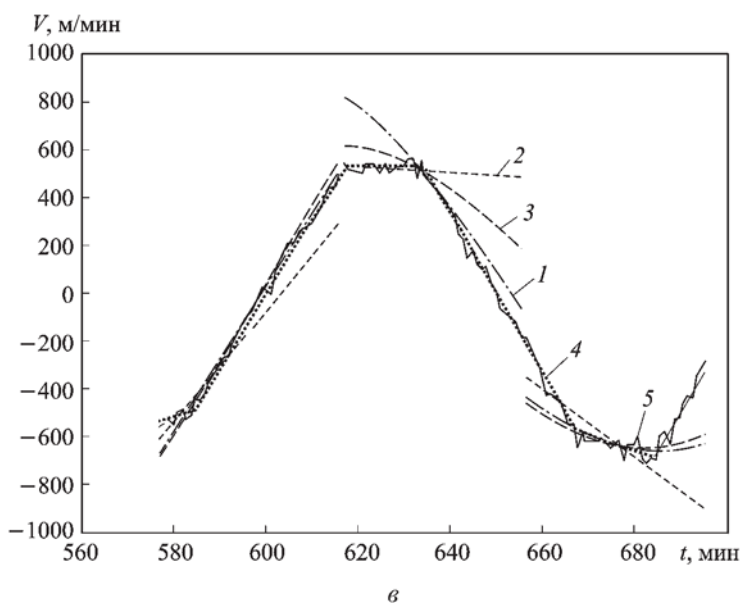


Рис. 5 (окончание)

результаты, прогнозируемые с помощью линейного и модифицированного трендов, совпадают по критериям точности. С возрастанием длительности прогноза использование линейного тренда в чистом виде не представляется возможным. Линейные тренды постоянно модифицируются с помощью нелинейной комбинации, подобранной методом самоорганизации, особенно на участках, где появляются существенно нелинейные характеристики в процессе функционирования исследуемого объекта. За счет модификации методом самоорганизации точность прогноза повышается и вычислительные затраты (времени и машинной памяти БЦВМ) 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 значениям.

Таблица 1

Сравнение точности краткосрочного прогноза погрешностей ИНС

Модель	Точность						Время расчета, с
	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_2	
Модифицированная	8,4	15	12,6	8,9	12,6	12	11
Линейная	12,3	20,5	18,7	19,2	21,2	18	1,54
Нелинейная	10,7	12,7	10,6	12,2	12,3	12	11

Сравнение точности среднесрочного прогноза погрешностей ИНС

Модель	Точность						Время расчета, с
	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_2	
Модифицированная	11,2	10%	11,3	12,5	11	11	12
Линейная	20	22	22	24,4	24,4	22	1,68
Нелинейная	16	13	14,1	16	16	15	12

Таблица 3

Сравнение точности долгосрочного прогноза погрешностей ИНС

Модель	Точность						Время расчета, с
	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_1	Δ_2	
Модифицированная	20	21	35	38,5	22,5	27	12
Линейная	80	58,5	70	64,4	58,5	66	2
Нелинейная	31	31	38	40,2	40,6	36	12

Статистические данные в табл. 1–3 также подтверждают, что точность прогноза посредством модифицированного алгоритма выше, чем точности прогнозов, получаемые двумя другими методами. Для краткосрочного прогноза погрешности с использованием трех моделей сильно не различаются, но время, затраченное на отбор нелинейной поправки, больше, чем затрачено на построение линейной модели. В долгосрочном прогнозе модифицированный тренд Демарка дает результаты, которые в 2 раза точнее, чем результаты линейного тренда без модификации. В таблицах Δ_1 — это ошибки прогноза, вычисляемые с использованием измерительных выборок в различные моменты времени поступления измерений, Δ_2 — математическое ожидание ошибок при прогнозировании в различные моменты времени. При моделировании уровень шумов в измерении скорости выбран 50 м/мин.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н е у с ы п и н К. А. Алгоритмическое обеспечение систем навигации и наведения. – М.: Изд-во Сигнал МПУ, 1999. – 235 с.
2. N e u s i p i n К. А., К е F a n g. The new orientation of development in the field of intelligent systems[C] // Proc. of 2003 Intelligent automation conference. Hong Kong (China), 2003. – P. 30–34.
3. И в а х н е н к о А. Г., М ю л л е р Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Киев: Техника, 1985. – 225 с.
4. Н е у с ы п и н К. А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 500 с.

Статья поступила в редакцию 24.02.2010

Константин Авенирович Неусыпин родился в 1960 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области интеллектуальных систем управления.

K.A. Neusyypin (b. 1960). D. Sc. (Eng.), professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of intellectual control systems.

Кэ Фан — старший научный сотрудник Юго-западного института технической физики (Чэнду, Китай).

Ke Fung — senior researcher of the South-West Institute of Technical Physics (Chengdu, People’s Republic of China).

Денис Олегович Шолохов родился в 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Аспирант кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области систем автоматического управления.

D.O. Sholokhov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Post-graduate of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of automatic control systems.