

9. Головин Ю. И., Тюрин А. И., Хлебников В. В. Влияние режимов динамического наноиндентирования на коэффициент скоростной чувствительности твёрдости тел различной структуры // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 91—95.

10. Головин Ю. И., Иволгин В. И., Тюрин А. И., Потапов С. В., Бенгус В. З., Табачникова Е. Д. О соотношении монотонной и скачкообразной деформации объёмного аморфного сплава $ZR_{46,8}Ti_{18}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ при наноиндентировании // Кристаллография. 2005. Т. 50. № 2. С. 326—331.

11. Oliver W. C., Pharr G. M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // J. Mater. Res. 1992. V. 7. N. 6. P. 1564—1583.

12. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. V. 19. N. 1. P. 3—20.

13. Herrmann K., Jennett N. M., Kuypers S., McEntegart I., Ingelbrecht C., Hagen U., Chudoba T., Pohlenz F., Menelao F. Investigation of the properties of candidate reference materials suited for the calibration of nanoindentation instruments // Zeitschrift fur Metallkunde. 2003. V. 94. N. 7. P. 802—806.

14. ISO 14577. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. P. 1—4.

15. ГОСТ Р 8.748—2011. Металлы и сплавы. Измерение твёрдости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний.

16. Асланян А. Э., Асланян Э. Г., Гаврилкин С. М., Щипунов А. Н. Исследование неоднородности мер твёрдости для передачи шкал Мартенса при наноиндентировании // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 32—34.

17. Асланян Э. Г., Дойников А. С. О выражении неопределённости результатов измерений твёрдости // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 4. С. 38—42.

Дата принятия: 18.11.2015.

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

681.513

Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой

М. С. СЕЛЕЗНЁВА, К. А. НЕУСЫПИН

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: m.s.selezneva@mail.ru

Исследован способ построения селективного измерительного комплекса с переменной структурой. Разработан измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой, состоящей из алгоритмов построения прогнозирующих моделей и сравнения прогноза с текущим результатом измерений, для высокоточного определения параметров динамического объекта. Сформировано алгоритмическое обеспечение комплекса на основе теории функциональных систем П. К. Анохина с использованием скалярного алгоритма оценивания, алгоритма самоорганизации с резервированием трендов и критерия степени наблюдаемости переменных состояния. В алгоритмах обработки информации комплекса использованы модели с повышенными степенями наблюдаемости переменных состояния.

Ключевые слова: измерительный комплекс, навигационная система, интеллектуальная система, алгоритм самоорганизации, прогнозирующая модель, критерий степени наблюдаемости.

The ways of building a measuring system with an alternating structure are investigated. The measuring system with an intelligent component is developed to determine the parameters of dynamic objects with high precision. The algorithmic support of the system is provided on the basis of P.K.Anokhin theory of functional systems, using a scalar estimation algorithm, self-organization algorithm with trend reservation, and criterion of the observability degree of state variables. Models with a higher degree of observability of state variables are used in the data processing algorithms of the system. The intelligent component consists of algorithms for constructing forecast models and comparing the forecasting with the current measurement results.

Key words: measuring system, navigation system, intelligent system, self-organization algorithm, forecast model, criterion of observability degree.

Точность измерений параметров динамических объектов, в частности летательных аппаратов (ЛА), зависит от условий эксплуатации, конструктивных особенностей измерительных систем и их алгоритмического обеспечения [1, 2]. Алгоритмическое обеспечение измерительных систем ЛА

включает алгоритмы оценивания, управления, прогнозирования и комплексирования [1]. Наиболее точную информацию удастся получить при использовании алгоритмов комплексирования. Измерительные системы, основанные на разных физических принципах, с помощью этих алгоритмов

объединяются в измерительные комплексы, способы построения которых зависят от типа и условий функционирования динамического объекта, конструктивных и финансовых возможностей, требуемой точности измерений. Например, измерительные комплексы малогабаритных беспилотных ЛА состоят из инерциальных навигационных систем (ИНС) и приёмников спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, а возвращающиеся в атмосферу аппараты многоразового действия снабжены ИНС, ГЛОНАСС, радиолокационными, лазерными измерительными системами, астрокорректорами, сигналы которых подвергаются совместной обработке.

Для получения максимально возможной точности измерений необходимо учитывать все особенности функционирования измерительных систем и условия полёта ЛА. Поэтому авторы разработали способ построения измерительного комплекса, базирующийся на элементах теории интеллектуальных систем, методе самоорганизации и численном критерии степени наблюдаемости параметров исследуемой системы. Результаты, полученные при исследованиях измерительных комплексов ЛА, можно использовать в других практических приложениях.

Селективный измерительный комплекс. В настоящее время существуют два подхода к решению задачи комплексирования: размещение на борту ЛА наибольшего количества датчиков, информация с которых подвергается совместной обработке и использование их минимального количества в навигационном комплексе. Первый подход требует повышенной производительности бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ). Теоретически такие навигационные комплексы должны обеспечивать высокую точность и отличаться надёжностью, но на практике из-за погрешностей внешних возмущений (активных и пассивных помех) этого не происходит. Требование для реализации алгоритмического обеспечения навигационных комплексов БЦВМ повышенной мощности также ограничивает применение подобных комплексов в современных ЛА. Второй подход широко применяют в современных навигационных комплексах, так как он гарантирует высокую точность определения параметров ЛА, надёжность комплекса и не требует больших вычислительных затрат. Подобные комплексы обычно включают ИНС и доплеровский измеритель скорости и угла сноса или ИНС и ГЛОНАСС, также ИНС комплексировуют с другими датчиками навигационной информации.

Логическое завершение идеи комплексирования — селективный подход, включающий преимущества рассмотренных выше способов. Навигационные комплексы, в которых он реализован, состоят из максимально возможного количества систем и датчиков навигационной информации [3]. Алгоритмическое обеспечение селективного измерительного комплекса (СИК) содержит алгоритмы выбора наиболее достоверной навигационной информации и её обработки.

Во время функционирования ЛА периодически происходит изменение конфигурации СИК с целью получения наиболее достоверной измерительной информации, т. е. на разных интервалах работы с ИНС комплексировуются различные внешние измерительные системы. Переключение на одну или другую структуру проводится после анализа степеней наблюдаемости погрешностей этих систем [3]. В СИК обычно используют бортовые радиолокационные станции, наземные радиотехнические системы ближней и дальней навигации, астрокорректоры, спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС и др.

Структурная схема СИК, предусматривающего функционирование базовой системы в автономном режиме, представлена на рис. 1. Измерительные системы $D1, \dots, DN$ измеряют параметры ЛА с погрешностями. В качестве базовой измерительной системы БИС обычно выбирают ИНС, которая измеряет истинную информацию θ_k о навигационных параметрах ЛА с погрешностью x_k .

В блоке комплексирования БК найденные сигналы подвергаются селекции с целью выявления наиболее точной их совокупности. Выбранные измерительные сигналы поступают в алгоритм оценивания АО, где происходит подавление измерительного шума и восстановление всего вектора погрешностей БИС. Затем сигнал, пропорциональный оценке вектора состояния $\hat{x}_k$ с погрешностью оценивания

$\tilde{x}_k$, вычитается из выходного сигнала БИС, при этом повышается точность информации ЛА. В случае отключения внешних источников информации $D1, \dots, DN$ последняя сохранившаяся измерительная выборка с БК поступает в блок «Модель» М, где происходит построение прогнозирующей модели погрешностей системы БИС с помощью эволюционного алгоритма. Далее по этой модели в блоке «Прогноз» П

вычисляются прогнозные значения погрешностей БИС ($\hat{\tilde{x}}_k$ с погрешностью прогноза $\tilde{\tilde{x}}_k$) и осуществляется компенсация в выходном сигнале. В условиях автономной работы ИНС коррекция происходит с помощью прогнозирующей модели, построенной на основе измерительной выборки во время работы внешних систем.

В СИК определяется наиболее достоверная информация, которая обрабатывается согласно алгоритму оценивания. Затем результат оценки вектора состояния поступает в выходной сигнал БИС для коррекции. В качестве алгоритма оценивания используют фильтр Калмана и его модификации [3–6]. Для упрощения реализации алгоритма авторы применили скалярный подход [4].

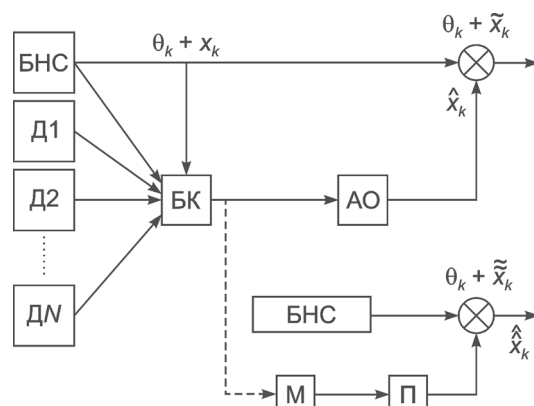


Рис. 1. Селективный измерительный комплекс, функционирующий в режиме коррекции и в автономном режиме:

БНС — базовая навигационная система; $D1, \dots, DN$ — датчики и измерительные системы внешней информации; БК — блок комплексирования; АО — алгоритм оценивания; θ_k — истинная навигационная информация; М — блок «Модель»; П — блок «Прогноз»; x_k — погрешности ИНС; $\hat{x}_k$ — оценки погрешностей ИНС; $\tilde{x}_k$ — ошибка оценивания; $\hat{\tilde{x}}_k$ — прогноз погрешностей ИНС; $\tilde{\tilde{x}}_k$ — ошибка прогноза

Скалярные алгоритмы — формулы с переменными коэффициентами, позволяющие отдельно оценивать каждую компоненту вектора состояния. Для синтеза таких алгоритмов необходимо сформировать скалярное уравнение модели для интересующей компоненты вектора состояния.

Пусть объект описан уравнением вида

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G} \mathbf{w}_{k-1},$$

где $\mathbf{x}_{k-1}$ — вектор состояния; $\mathbf{w}_{k-1}$ — вектор входного шума, дискретный аналог белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; $\Phi(n \times m)$ — матрица системы; $\mathbf{G}$ — $(n \times 1)$ — матрица входного шума.

Часть вектора состояния измеряется следующим образом:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k,$$

где $\mathbf{z}_k$ — m -мерный вектор измерений; $\mathbf{H}$ — $(m \times n)$ — матрица измерений; $\mathbf{v}_k$ — m -мерный вектор измерительного шума, дискретный аналог белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; $\mathbf{v}$, $\mathbf{w}$ некоррелированы между собой, т. е. $M[\mathbf{v}_j \mathbf{w}_k^T] = 0$.

Предположим, что измеряется одна компонента вектора состояния, т. е. $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$. Разобьём каждый шаг измерений на n подтактов, и выразим эти измерения через вектор состояния на первом подтакте:

$$\mathbf{z}^* = \mathbf{S} \mathbf{x}_1 + \mathbf{v}^*,$$

$$\text{где } \mathbf{z}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \dots \\ \mathbf{z}_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}\Phi \\ \dots \\ \mathbf{H}\Phi^{n-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{H}\mathbf{w}_1 + \mathbf{v}_2 \\ \dots \\ \mathbf{H}\Phi^{n-2}\mathbf{w}_1 + \dots + \mathbf{H}\mathbf{w}_{n-1} + \mathbf{v}_n \end{bmatrix}.$$

Для упрощения реализации СИК целесообразно использовать адаптивную модификацию фильтра Калмана в скалярном виде [4]:

$$\hat{x}_{nk+1}^i = a_{ii} \hat{x}_{n(k-1)+1}^i + s_k^i + k_{k+1}^i (z_{k+1}^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{n(k-1)+1}^i - s_k^i);$$

$$k_k^i = p_{k,k-1}^i / (p_{k,k-1}^i + \hat{r}_k^i);$$

$$p_{k,k-1}^i = a_{ii}^2 p_{k-1}^i + (k_{k-1}^i)^2 (\vartheta_k^i)^2; \quad p_k^i = (1 - k_k^i) p_{k,k-1}^i;$$

$$\begin{cases} \hat{r}_k^i = (\vartheta_k^i)^2 - p_{k,k-1}^i; & (\vartheta_k^i)^2 > p_{k,k-1}^i; \\ \hat{r}_k^i = 0; & (\vartheta_k^i)^2 \leq p_{k,k-1}^i, \end{cases}$$

где $s_k^i = a_{i1} z_k^{*1} + a_{i2} z_k^{*2} + \dots + a_{in} z_k^{*n}$; a_i — i -я строка обратной матрицы наблюдаемости $\mathbf{S}^{-1}$; $\vartheta_k^i = z_k^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{k-1}^i - s_{k-1}^i$ — обновляемая последовательность в адаптивном скалярном алгоритме фильтрации; $\hat{r}_k^i$ — оценка дисперсии измерительного шума, приведённая к i -й компоненте вектора состояния.

Представленный алгоритм оценивания может функционировать в отсутствие априорной информации о дисперсиях входного и измерительного шумов. Для получения наиболее достоверной информации в блоке комплексирования использован критерий степени наблюдаемости [3, 7, 8]. Состав измерительного комплекса зависит от наибольшего значения критерия степени наблюдаемости конкретной компоненты вектора состояния.

Дисперсия приведенного к i -й компоненте измерительного шума определяется коэффициентами $a_1, a_2, \dots, a_n$ [4]:

$$r^{*i} = M[\mathbf{v}^{*i}] = [a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2] r,$$

где $r = M[\mathbf{v}^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума $\mathbf{v}$.

Степень наблюдаемости обусловлена точностью оценивания и временем сходимости. Критерий степени наблюдаемости имеет вид [3]

$$\lambda^i = M[(x^i)^2] r / M[(y^i)^2] r^{*i}, \quad (1)$$

где $M[(x^i)^2]$ — дисперсия произвольной i -й компоненты вектора состояния; $M[(y^i)^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния.

В критерии (1) мерой наблюдаемости является скаляр, что позволяет сравнивать степени наблюдаемости компонент различных векторов состояния. Этот скаляр можно использовать в блоке комплексирования и включать в критерий селекции при построении моделей [8].

При изменении режима функционирования ЛА в СИК анализируются степени наблюдаемости переменных состояний и осуществляется автоматический выбор наилучшей структуры комплекса. Измеренные с помощью выбранных датчиков сигналы задействованы в алгоритме оценивания для формирования оценок погрешностей базовой навигационной системы, которые затем используются для коррекции информации.

Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой. Недостатком СИК является способ выбора математической модели в алгоритме оценивания. Так как набор математических моделей ограничен и их синтез происходит на основе априорных данных, то часто имеющиеся модели недостаточно точно описывают реальный исследуемый процесс. Поэтому точность оценивания и, следовательно, достоверность информации о состоянии ЛА может существенно снижаться.

Для определения структуры комплекса применяется информация, полученная на предыдущем этапе функционирования. Выбранная таким образом структура может быть не оптимальной на следующем интервале работы комплекса. В этом заключается другой недостаток СИК.

Указанные несовершенства можно скомпенсировать алгоритмически, используя концепцию интеллектуальных систем [5, 7]. В рамках этой концепции современную сложную систему разрабатывают согласно теории функциональных систем П. К. Анохина [9].

Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой (ИИК) является модификацией СИК. Отличительная особенность ИИК — механизм полезного приспособительного результата, основанный на принципе саморегуляции и обладающий специфическими узловыми механизмами, в частности акцептором действия [7, 9]. Акцептор действия —

интеллектуальная компонента — включает алгоритм построения модели исследуемых параметров, прогноз и сравнение текущих измерений с прогнозом. Структура ИИК представлена на рис. 2.

В блоке комплексирования и сравнения БКС, помимо определения степеней наблюдаемости и формирования измерений, сравнивается апостериорная информация с результатом прогноза. Полученную на основе проведенных измерений математическую модель используют в алгоритме оценивания для определения состояния исследуемой системы, а также в численном критерии селекции измерительных сигналов. С помощью математической модели прогнозируют состояние системы на некотором интервале времени, который выбирают из практических соображений в соответствии с режимом функционирования ЛА. По результатам прогноза определяют состав ИИК. В процессе функционирования оценивают состояние системы и с помощью численного критерия селекции находят оптимальную структуру ИИК, которая будет использована на этом интервале функционирования.

Для прогнозирования погрешностей измерительных систем необходимо сформировать математическую модель. Известно много способов построения прогнозирующих моделей [1, 3, 10—12]. Например, при коррекции навигационных систем ЛА в случае потери информационного контакта с дополнительными измерительными системами (ГЛОНАСС и др.) для построения прогнозирующей модели применяют алгоритм самоорганизации [11].

Введём некоторое множество непрерывно дифференцируемых функций, которые далее будем называть базисными:

$$F = \{\mu_i(x) \mid i = 1, \dots, N\}.$$

Каждой базисной функции поставим в соответствие вектор параметров. Рассмотрим случай двухмерного вектора $(b, f)^T$, где b — амплитуда, f — частота. Тогда имеем параметризованное множество базисных функций

$$F_n = \{b_{ji}(f_i x) \mid i = 1, \dots, N\}.$$

Набор базисных функций определяется с учётом априорной информации об исследуемом объекте.

Алгоритм самоорганизации основан на гипотезе селекции моделей с использованием ансамбля критериев. Получаемая в результате модель имеет вид [12]

$$M(x) = \sum_{i=1}^N b_i \mu_{ni}(f_i x),$$

где N — число базисных функций в модели; μ_{ni} — базисные функции из F_n .

Для построения прогнозирующей модели погрешностей автономной ИНС применяют измерительную выборку, сформированную в корректируемом режиме работы системы, например при комплексировании ИНС и ГЛОНАСС. При исчезновении сигнала от ГЛОНАСС последнюю измерительную выборку, представляющую смесь погрешностей ИНС и ГЛОНАСС, используют для построения высокоточных нелинейных математических моделей и последующей коррекции автономной ИНС.

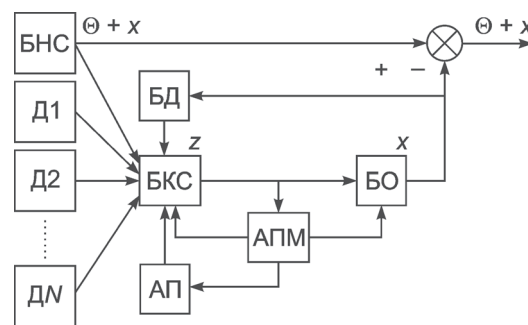


Рис. 2. Структура измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой:

БКС — блок комплексирования и сравнения; БД — динамическая база данных; АПМ — алгоритм построения модели; АП — алгоритм прогноза; БО — блок оценивания; БНС — базовая навигационная система; Д1, Д2, ..., ДN — датчики и измерительные системы внешней информации

Однако для функционирования ИИК необходима линейная модель, которую можно применять в критерии (1) и скалярном алгоритме оценивания. Поэтому выбирают алгоритм с резервированием линейных трендов на каждом ряду селекции [12]. На основе результатов прогноза определяют структуру ИИК, действующую на этом интервале функционирования.

Таким образом, применена концепция построения интеллектуальных систем при синтезе ИИК. Принятие решения о выборе структуры комплекса сопровождается формированием программы действия с одновременным прогнозом результата. Это важнейший феномен интеллектуальных систем — когда в конце процесса получается результат, который уже в начале операции имелся в её представлении.

Использование ИИК вместо СИК немного усложняет алгоритмическое обеспечение. Необходимо дополнительно реализовать алгоритм самоорганизации, прогноза и динамическую базу данных, состоящую из предсказанных характеристик погрешностей базовой измерительной системы, а также алгоритм сравнения получаемой информации с прогнозированной. Применение принципа построения ИИК и рассмотренного алгоритмического обеспечения в задачах навигации является лишь одной из областей применения изложенной концепции.

В качестве практических результатов представлены графики моделирования работы СИК и ИИК. Моделирование выполнено в среде MATLAB. Результаты представлены на рис. 3. Исследованы результаты моделирования погрешности ИНС в определении скорости $\dot{v}$ и её оценки, найденные с помощью СИК и ИИК. На интервале $0-t_1$ структуры СИК и ИИК совпадают (ИНС и ГЛОНАСС). С момента t_1 происходит увеличение шумов ГЛОНАСС. На интервале t_1-t_2 на основании прогноза вычисляются степени наблюдаемости и после сравнения результатов осуществляется выбор конфигурации ИИК, т. е. принимается решение о целесообразности использования для определения оценки вектора состояния конкретной измерительной системы в качестве источника внешней информации. Если же основываться не на прогнозе, а на непосредственных измерениях на предыду-

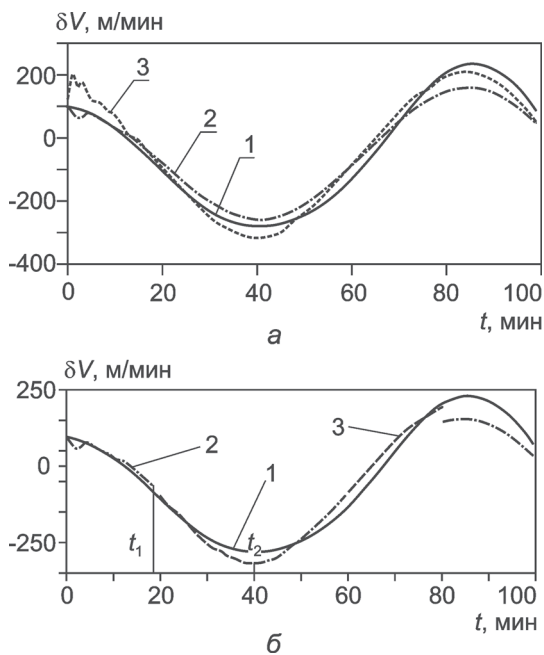


Рис. 3. Результаты работы селективного навигационного комплекса (а) и комплекса с интеллектуальной компонентой (б): 1 — модель погрешности ИНС в определении скорости; 2, 3 — оценка погрешности ИНС в определении скорости, полученная с помощью СИК и ИИК, соответственно

щем интервале $0-t_1$, как в СИК, то можно получить недостоверную информацию и в диапазоне t_1-t_2 сделать неоптимальный выбор структуры комплекса. Прогноз даёт более точный результат определения структуры комплекса, чем по непосредственным измерениям (полученным на предыдущем интервале работы комплекса). В СИК на интервале t_1-t_2 оценка δv определяется с помощью сигналов ИНС и ГЛОНАСС, а в ИИК использованы ИНС и доплеровский измеритель скорости и угла сноса. Точность оценивания погрешности ИНС в ИИК выше, чем в СИК (см. рис. 3, а). Следовательно, решение о конфигурации измерительного комплекса целесообразно принимать по результатам прогноза (см. рис. 3, б). Выбор конфигурации этого комплекса на основе анализа непосредственно последней измерительной выборки даёт худшие результаты.

Заключение. Представлена концепция синтеза оптимальной структуры измерительного комплекса, основанной на селективном методе комплексирования с использованием принципов построения интеллектуальных систем. При реализации ИИК использованы критерий степени наблюдаемости, динамическая база данных, скалярная адаптивная модификация фильтра Калмана и акцептор действия, вклю-

чающий алгоритм самоорганизации с резервированием трендов, алгоритм прогноза и сличения результата действия (терминология П. К. Анохина).

При определении оптимальной структуры измерительного комплекса в критерии комплексирования вместо априорной информации о наблюдаемых компонентах вектора состояния использованы результаты прогноза.

Литература

1. Агеев В. М., Павлова Н. В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990.
2. Джанджгава Г. И., Роголев А. П., Сухоруков С. Я., Бабиченко А. В. Комплексная обработка информации навигационных и обзорно-прицельных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 6. С. 15—29.
3. Неусыпин К. А., Пролетарский А. В., Цибизова Т. Ю. Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд-во. МГОУ, 2006.
4. Салычев О. С. Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987.
5. Neusipin K. A., Ke Fang. Research Progress of Intelligent Control Systems of Aerocrafts. Acta Armamentarii. 2010. V. 7. N. 8. P. 247—251.
6. Proletarsky A. V., Neusipin K. A. Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science & military. 2010. V. 5. P. 75—80.
7. Neusipin K. A., Ke Fang. Algorithm in intelligent control systems of aerocrafts. China. Chendu: Sichuan university press. 2011.
8. Fang Ke, Proletarsky A. V., Neusipin K. Selection of Measured Signals in the Navigation Measuring Complex // J. Measurement Science and Instrumentation. 2011. V. 02. N. 12. P. 346—348.
9. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968.
10. Proletarsky A. V., Neusipin K. A. Reserch scalar filtering algorithm with selforganization method for modeling control system // Science & military. 2010. V. 5. N. 2. P. 36—39.
11. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985.
12. Неусыпин К. А., Пролетарский А. В., Вайс Ю. Л., Шолохов Д. О. Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 11. С. 14—16.

Дата принятия: 28.09.2015.