

УДК 629.7.05

## КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

©2016 А.В. Чернодаров<sup>1</sup>, А.П. Патрикеев<sup>1</sup>, А.Б. Борзов<sup>2</sup>, И.И. Меркулова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Общество с ограниченной ответственностью

«Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Статья поступила в редакцию 09.06.2016

Статья посвящена проблеме повышения информационной надежности распределенных инерциальных навигационных систем (ИНС) на базе измерителей различного принципа действия. Предлагаемое решение проблемы опирается на мажоритарную схему стохастического контроля, диагностирования и оптимизацию структуры ИНС по обобщенным параметрам состояния. Представлена технология формирования диагностических моделей для обнаружения, парирования и предотвращения нарушений. Приводятся результаты практической реализации ИНС описанной архитектуры, структурная схема программно-аппаратного обеспечения распределенной ИНС. Получены результаты математического моделирования совместной обработки информации в распределенной ИНС на базе измерителей различного принципа действия.

*Ключевые слова:* инерциальная навигационная система, мажоритарный контроль, обобщенный параметр состояния, критерии согласия.

### ВВЕДЕНИЕ

Инерциальные навигационные системы (ИНС) [1] относятся к бортовым измерительно-вычислительным комплексам (ИВК), существенно влияющим на безопасность полетов. Современное состояние ИВК характеризуется включением в их состав распределенных бесплатформенных ИНС (БИНС). Это связано с необходимостью навигационного обеспечения не только летательных аппаратов (ЛА), но и бортовых систем обзора земной поверхности [2]. К таким системам относятся радиолокационные (РЛС), видеоконтрольные (ВКУ) и другие обзорные устройства. Построение распределенных БИНС на базе измерителей различного принципа действия создает необходимую основу для резервирования и повышения информационной надежности ИВК. Информационная надежность, в свою очередь, тесно связана с целостностью навигационных определений, которая отражает

*Чернодаров Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, профессор филиала «Стрела» МАИ.*

*E-mail: achernodarov@xlab-ns.ru*

*Патрикеев Андрей Павлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт».*

*E-mail: apatrikееv@xlab-ns.ru*

*Борзов Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автономные информационные и управляющие системы».*

*E-mail: borzov@rambler.ru*

*Меркулова Ирина Игоревна, аспирант.*

*E-mail: merkulova\_irina90@mail.ru*

способность БИНС непрерывно поддерживать требуемые тактико-технические характеристики в изменяющихся условиях эксплуатации. Задача в этом случае состоит в обнаружении отказавших БИНС, исключении их из структуры ИВК и восстановлении работоспособности путем реконфигурации и перераспределения функций.

Цель работы: исследование возможностей объединения распределенных БИНС в тесно связанную структуру и повышения на этой основе информационной надежности ИВК.

### 1. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Современное состояние авиационного оборудования характеризуется внедрением ИВК нового поколения [3]. Информационным ядром таких ИВК являются интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИСНС) на базе квантово-оптических и микромеханических измерителей. В настоящее время актуальной остается проблема повышения информационной надежности [4] ИСНС. Аналитические подходы к решению указанной проблемы опираются на применение диагностических моделей для обнаружения, парирования и предотвращения нарушений. Технология формирования таких моделей опирается на математическое описание функционирования эталонной (невозмущенной) и реальной (возмущенной) ИСНС, которым ставятся в соответствие идеальный  $Y(t)$  и реальный  $Y_p(t)$  векторы параметров состояния. Динамика изменения указанных векторов описывается сле-

дующими дифференциальными уравнениями:  
 $\dot{Y}(t) = F[Y(t)]$  для идеальной ИСНС; (1)

$\dot{Y}_p(t) = F[Y_p(t)] + G(t)\xi(t)$  для реальной ИСНС, (2)  
 где  $\xi(t) = [\xi_1(t) \dots \xi_r(t)]^T$  – вектор возмущений, действующих на ИСНС, характеризующийся ковариационной матрицей  $M[\xi(t)\xi^T(t-\tau)] = Q(t)\delta(t-\tau)$ ;  $\delta(t-\tau)$  – дельта-функция;  $M[\dots]$  – оператор математического ожидания;  $G(t)$  – матрица интенсивностей возмущений.

Параметры идеальной и реальной ИСНС связаны через уравнение ошибок

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + G(t)\xi(t), \quad (3)$$

где  $x(t) = \Delta Y(t) = Y_p(t) - Y(t)$  – вектор ошибок ИСНС;

$A(t) = \frac{\partial F[Y_p(t)]}{\partial Y}$  – матрица коэффициентов, характеризующих динамику изменения ошибок ИСНС.

Оценки  $\hat{x}(t)$  ошибок ИСНС могут быть получены с помощью оптимального фильтра Калмана (ОФК) [5] путем обработки наблюдений

$$z(t) = h[Y_p(t)] - h[Y(t)]_{\text{ДВИ}}. \quad (4)$$

где  $h[Y(t)]_{\text{ДВИ}}$  – измерение, сформированное датчиком внешней по отношению к ИСНС информации (ДВИ), имеющее модель  $h[Y(t)]_{\text{ДВИ}} = h[Y(t)] + \mathcal{G}(t)$ ;  $\mathcal{G}(t)$  – вектор возмущений в канале измерений, имеющий ковариационную матрицу  $M[\mathcal{G}(t)\mathcal{G}^T(t-\tau)] = R(t)\delta(t-\tau)$ .

В ОФК взаимосвязь наблюдений (4) с ошибками ДС учитывается через математическую модель

$$z(t) = H(t)x(t) + \mathcal{G}(t), \quad (5)$$

где  $H(t) = \frac{\partial h[Y(t)]}{\partial Y}$  – матрица связи наблюдаемых параметров с вектором ошибок ИСНС.

Если спутниковую навигационную систему (СНС) рассматривать в качестве ДВИ для инерциальной (ИСНС), то схема ИСНС может быть

представлена рис. 1, где АСК – автоматизированная система контроля; ПК – преобразователь координат;  $\wedge$  – символ оценки.

Функционирование АСК может быть основано на оценивании ошибок ИНС. Однако в этом случае каждому множеству технических состояний ИНС необходимо будет ставить в соответствие свои уравнения вида (3). Кроме того, возникает задача согласования текущего состояния ИНС с соответствующей моделью из «банка» оценивающих фильтров [4], что трудно реализуемо на практике. Поэтому алгоритмы контроля целесообразно строить на основе уравнений вида (3), настроенных на исправное состояние ИНС. С учетом этого могут быть сформированы диагностические параметры, которые должны отражать отклонение реального состояния ИНС от исправного.

## 2. КОНТРОЛЬ ПО КРИТЕРИЮ $\chi^2$

Статистические свойства ОФК позволяют сформировать диагностические параметры на базе вектора невязок

$$v_i = z_i - H_i \Phi_i \hat{x}_{i-1} = [v_{1(i)} v_{2(i)} \dots v_{j(i)} \dots v_{l(i)}]^T, \quad (6)$$

где  $z_i = z(t_i)$  – вектор наблюдений в  $i$ -й момент времени;  $\Phi_i$  – переходная матрица для вектора ошибок ИНС, определяемая из решения дифференциального уравнения

$\dot{\Phi}_i = A(t)\Phi(t, t_{i-1})$  при  $\Phi(t_{i-1}, t_{i-1}) = E$  – единичная матрица.

Известно [5,6], что в динамической системе (ДС), модель ошибок которой настроена на исправное состояние, при отсутствии нарушений вектор невязок имеет гауссовское распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей  $\alpha_i$ , т.е.

$$v_i \in N(0, \alpha_i). \quad (7)$$

Учитывая принцип ортогональности оптимальных оценок  $M[e_i \mathcal{G}_i^T] = 0$ , можно показать, что

$$\alpha_i = M[v_i v_i^T] = H_i \Phi_i P_{i-1} \Phi_i^T H_i^T + R_i, \quad (8)$$

где  $P_i = M[e_i e_i^T]$ ;  $e_i = x_i - \hat{x}_i$ .

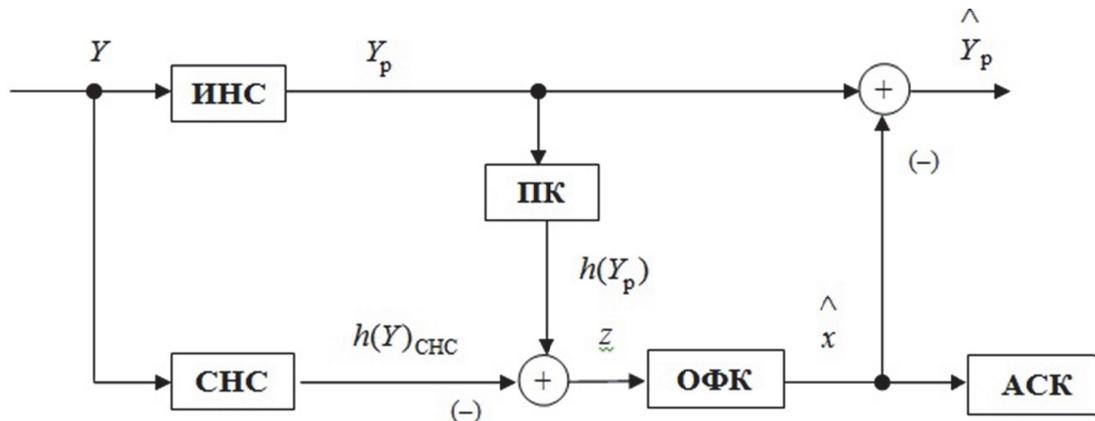


Рис. 1. Структурная схема интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы

Применение традиционного ОФК предполагает одновременную обработку всех элементов вектора наблюдения  $Z_i$  с учетом прогнозных значений оценок  $\hat{x}_{i/i-1}$ . Поэтому для контроля состояния ИНС необходимо было бы проверять, является ли вектор  $v_i$   $l$ -мерной гауссовской последовательностью. Однако на практике решение данной задачи затруднительно. В связи с этим на базе вектора невязок формируют более компактные в вычислительном отношении диагностические параметры. Такие параметры опираются на свертку вектора невязок  $v_i$  и ковариационной матрицы  $\alpha_i$ :

$$J_i = v_i^T \alpha_i^{-1} v_i. \quad (9)$$

В квадратичной форме (9) элементы матрицы  $\alpha_i$  рассматриваются как нормирующие коэффициенты, учитывающие информацию о требуемых статистических характеристиках ИНС.

Можно показать [7], что для вектора невязок  $v_i$  с гауссовским распределением квадратичная форма (9) имеет распределение  $\chi^2$  с  $l$  степенями свободы

$$J_i \in \chi^2(l, 2l), \quad (10)$$

т.е. размерность вектора невязок  $l$  равна математическому ожиданию параметра  $J_i$  и половине его дисперсии.

Правильному функционированию ИНС можно поставить в соответствие область допустимых значений параметра  $J_i$ . Можно показать [7], что с доверительной вероятностью 0.98 необходимым условием принадлежности параметра  $J_i$  к распределению  $\chi^2$  является следующее:

$$J_i \leq \gamma_l^2 = M[J_i] + 3\sqrt{D[J_i]} = l + 3\sqrt{2l}, \quad (11)$$

где  $D[\dots]$  – оператор дисперсии.

Таким образом, величина  $\gamma_l^2$  определяет область допустимых значений параметра  $J_i$  при правильном функционировании ДС. С учетом допуска  $\gamma_l^2$  контроль ДС по обобщенному параметру на основе критерия  $\chi^2$  сводится к проверке следующих условий:

$$\begin{cases} \text{если } J_i \leq \gamma_l^2, \text{ то в ДС нет нарушений;} \\ \text{если } J_i > \gamma_l^2, \text{ то в ДС есть нарушения.} \end{cases} \quad (12)$$

Контроль по обобщенному параметру  $J_i$  позволяет оценить состояние ИНС в целом, без анализа, по какому из параметров вектора наблюдений наиболее вероятно произошло нарушение. На практике возникает необходимость оценки состояния ИНС по каждому из элементов вектора  $z_j$ , т.е. выполнить диагностирование ИНС с глубиной до наблюдаемого параметра.

### 3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПО КРИТЕРИЮ $\chi^2$

Задача диагностирования может быть ре-

шена, если ошибки наблюдений статистически независимы, т.е. матрица  $R_j$  в соотношении (8) является диагональной. Если наблюдения взаимно коррелированы, то выполняется их предварительная декомпозиция [7]. С учетом этого представляется возможным выполнять поканальную (поэлементную) обработку вектора наблюдений (6) и анализировать состояние каждого из  $l$  измерительных каналов. Например, для контроля  $j$ -го измерительного канала может быть использована нормированная невязка  $\beta_j = v_j / \alpha_j$ , где  $\alpha_j$  – параметр масштаба;  $j = 1, l$ . Невязка  $v_j$  представляет собой разность  $v_j = z_j - \hat{z}_j$  между реальным  $z_j$  и прогнозируемым  $\hat{z}_j = H_j \hat{m}_j$  значениями наблюдений, где  $m_j$ ,  $\hat{x}_{i/i}$  – оценки вектора ошибок ДС  $x_i$  на  $i$ -м шаге после обработки соответственно  $j$ -го элемента и всего вектора наблюдений  $z_i$ ;  $H_j$  – вектор – строка коэффициентов связи. Статистические свойства параметра  $\beta_j^2$  могут быть использованы для построения решающих правил. Для него по аналогии с обобщенным параметром (9) при  $l=1$  может быть сформировано необходимое условие правильного функционирования ИНС по каждому из каналов наблюдений, а именно:

$$\beta_j^2 \in \chi^2(1, 2) \quad (13)$$

или по правилу  $3\sigma$  [8] для квантиля  $a(1) = 0.02$

$$\beta_j^2 \leq \gamma_1^2 = M[\beta_j^2] + 3\sqrt{D[\beta_j^2]} = 1 + 3\sqrt{2} \cong 5.2. \quad (14)$$

С учетом допуска  $\gamma_1^2$  диагностирование по критерию  $\chi^2$  сводится к следующим проверкам

$$\begin{cases} \text{если } \beta_j^2 \leq \gamma_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений нет нарушений;} \\ \text{если } \beta_j^2 > \gamma_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений есть нарушения.} \end{cases} \quad (15)$$

Приведенные процедуры позволяют выполнить диагностирование ИНС с глубиной до элемента вектора невязок  $v_i$ .

### 4. КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предлагается применение  $U-D$  процедур обработки наблюдений [7] и представленных критериев согласия для мажоритарного контроля распределенных ИНС. Стохастический мажоритарный контроль и диагностирование в условиях неопределенности связан, в том числе, с выбором наиболее предпочтительной системы из резервированного множества. Такой контроль может быть основан на формировании и анализе обобщенных диагностических параметров, рассмотренных в пп. 2,3.

Рассмотрим мажоритарную схему диагностирования, включающую три идентичных системы: ИНС<sub>1</sub>, ИНС<sub>2</sub>, ИНС<sub>3</sub>. Такую схему можно представить рис. 2.

На рис. 2 обозначены:  $Y_i$  – вектор параметров движения летательного аппарата (ЛА);  $z_{p_1(i)}$ ;  $z_{p_2(i)}$ ;  $z_{p_3(i)}$  – векторы параметров, формируемых ИНС;  $z_i$  – векторы параметров, измеренных внешней по отношению к ИНС системами;  $\Delta z_{1(i)}$ ;  $\Delta z_{2(i)}$ ;  $\Delta z_{3(i)}$  – векторы наблюдений;  $\hat{x}_{i/i(k)}$  – вектор оценок ошибок  $k$ -й ИНС, сформированный после обработки наблюдений в  $i$ -й момент времени,  $k = \overline{1,3}$ ;  $U_{i/i(j)}$  – верхняя треугольная матрица с единичной диагональю;  $D_{i/i(j)}$  – диагональная матрица, являющиеся компонентами ковариационных матриц ошибок оценивания  $P_{i/i(k)} = U_{i/i(k)} D_{i/i(k)} U_{i/i(k)}^T = M[\delta_{i/i(k)} \delta_{i/i(k)}^T]$ ;  $\delta_{i/i(k)} = x_{i(k)} - \hat{x}_{i/i(k)}$ ;  $x_{i(k)}$  – вектор действительных ошибок  $k$ -й ИНС в  $i$ -й момент времени.

Для выбора наиболее предпочтительной системы из резервированного множества сформируем следующие диагностические параметры

$$J_{1,2} = \Delta v_{1,2}^T \Delta P_{1,2}^{-1} \Delta v_{1,2}; \quad (16)$$

$$J_{1,3} = \Delta v_{1,3}^T \Delta P_{1,3}^{-1} \Delta v_{1,3}; \quad (17)$$

$$J_{2,3} = \Delta v_{2,3}^T \Delta P_{2,3}^{-1} \Delta v_{2,3}, \quad (18)$$

где  $\Delta v_{1,2} = \hat{x}_{i/i(1)} - \hat{x}_{i/i(2)}$ ;

$$\begin{aligned} \Delta v_{1,3} &= \hat{x}_{i/i(1)} - \hat{x}_{i/i(3)}; \\ \Delta v_{2,3} &= \hat{x}_{i/i(2)} - \hat{x}_{i/i(3)}; \\ \Delta P_{1,2} &= P_{i/i(1)} + P_{i/i(2)}; \\ \Delta P_{1,3} &= P_{i/i(1)} + P_{i/i(3)}; \\ \Delta P_{2,3} &= P_{i/i(2)} + P_{i/i(3)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Соотношения (16) – (19) сформированы с учетом

$$M[\delta_1 \delta_2^T] = 0; \quad M[\delta_1 \delta_3^T] = 0; \quad M[\delta_2 \delta_3^T] = 0;$$

$$\delta_1 = x_i - \hat{x}_{i/i(1)}; \quad \delta_2 = x_i - \hat{x}_{i/i(2)}; \quad \delta_3 = x_i - \hat{x}_{i/i(3)}.$$

В соотношениях (16) – (19) проблемной является задача вычисления обратных матриц

$$\Delta P_{1,2}^{-1}; \Delta P_{1,3}^{-1}; \Delta P_{2,3}^{-1}.$$

Такая задача может быть решена при реализации алгоритмов обработки наблюдений на основе совместных процедур  $U$ - $D$  фильтрации и сглаживания [7]. В этом случае обращение нормирующих ковариационных матриц  $\Delta P_{kj}$  размерности  $n \times n$  можно заменить  $n$  операциями деления с учетом следующего равенства

$$\begin{aligned} \Delta P_{1,2}^{-1} &= [U_{i/i(1)} D_{i/i(1)} U_{i/i(1)}^T + U_{i/i(2)} D_{i/i(2)} U_{i/i(2)}^T]^{-1} = \\ &= [P_{i/i(1)} + \sum_{j=1}^n U_{j(2)} U_{j(2)}^T / D_{j(2)}]^{-1}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $P_{i/i(1)} = U_{i/i(1)} D_{i/i(1)} U_{i/i(1)}^T = M_0$ ; (21)

$U_j$  – верхняя треугольная матрица с единич-

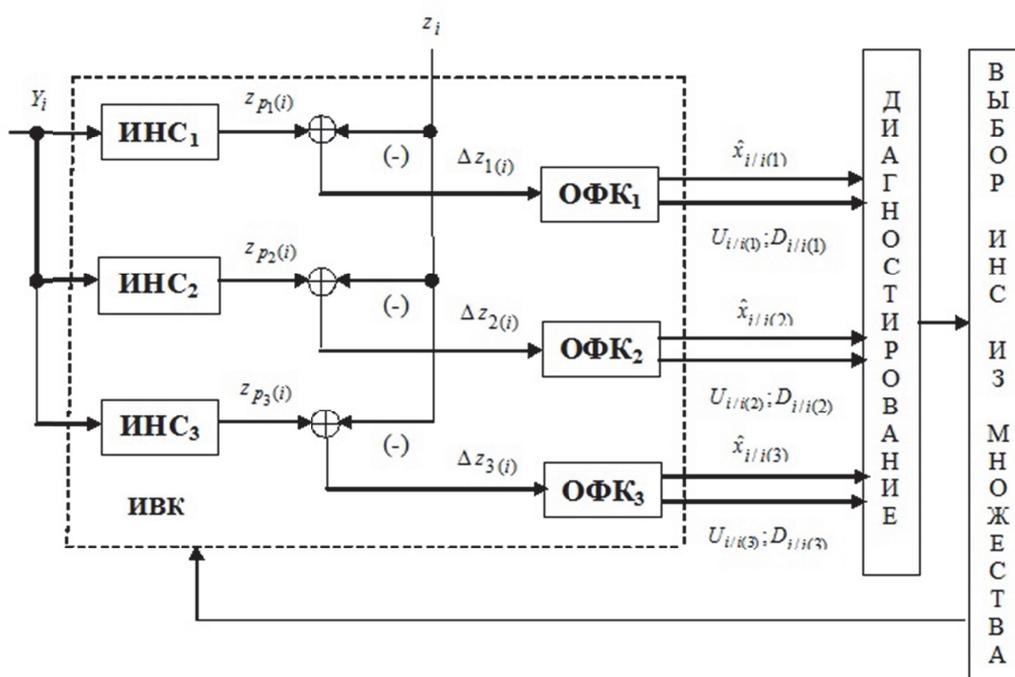


Рис. 2. Мажоритарная схема диагностирования распределенной ИНС

ными диагональными элементами;  $D_j$  – диагональная матрица;  $U_{j(2)}$  –  $j$ -й столбец матрицы  $U_{i/i(2)}$ ;

$D_{j(2)}$  –  $j$ -й элемент диагональной матрицы  $D_{i/i(2)}$ .

Используя лемму об обращении матриц [7] и соотношение (21), можно сформировать рекуррентную процедуру реализации формулы (20) и вычисления матрицы  $\Delta P_{1,2}^{-1}$ ;

$$M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} / [U_{j(2)}^T M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} + D_{j(2)}^{-1}]; \quad (22)$$

$$\Delta P_{1,2}^{-1} = M_n^{-1}; \quad j = \overline{1, n}.$$

Матрицы  $\Delta P_{1,3}^{-1}$  и  $\Delta P_{2,3}^{-1}$  также вычисляются по рекуррентной формуле (22).

Как было показано в пп. 2,3 при отсутствии нарушений в объекте контроля квадратичная форма  $J_{kj}$  должна иметь распределение  $\chi^2$  с  $n$  степенями свободы, т.е.  $J_{kj} \in \chi^2(n, 2n)$ . По аналогии с правилом  $3\sigma$  [8] для нормального закона распределения и с учетом квантиля  $0.02(n)$  можно утверждать, что с доверительной вероятностью  $0.98$  необходимым условием принадлежности параметра  $J_{kj}$  к распределению  $\chi^2$  является следующее:

$$J_{kj} \leq \gamma_n^2 = n + 3\sqrt{2n}. \quad (23)$$

Таким образом, величина  $\gamma_n^2$  определяет область допустимых значений параметра  $J_{kj}$  при правильном функционировании объекта контроля.

В модуле диагностирования на рис. 2 реализуются следующие процедуры контроля

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,2} = J_{1,2} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{1,3} = J_{1,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{отказ ИНС}_1; \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,2} = J_{1,2} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{2,3} = J_{2,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{отказ ИНС}_2; \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,3} = J_{1,3} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{2,3} = J_{2,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{отказ ИНС}_3. \quad (26)$$

В работоспособном ИВК наиболее предпочтительная ИНС из резервированного множества может быть выбрана на основе реализации следующих процедур

$$(\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \\ < (\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{выбирается ИНС}_1; \quad (27)$$

$$(\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \\ < (\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{выбирается ИНС}_2; \quad (28)$$

$$(\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \\ < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{выбирается ИНС}_3. \quad (29)$$

Если после локализации отказавшей ИНС требуется выполнить ее диагностирование, т.е. определить, с каким элементом вектора невязок  $\Delta v_{j,k}$  наиболее вероятно связано нарушение, то матрицы  $\Delta P_{j,k}^{-1}$  необходимо определять через их

$\Delta U_{kj}^{-1}, \Delta D_{kj}^{-1}$  компоненты. Для этого уравнение (22) можно представить в эквивалентном виде

$$M_j^{-1} = [K_j U_{j(2)}^T - E] M_{j-1}^{-1} [K_j U_{j(2)}^T - E]^T + K_j D_{j(2)}^{-1} K_j^T, \quad (30)$$

где

$$K_j = M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} \{ U_{j(2)}^T M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} + D_{j(2)}^{-1} \};$$

$E$  – единичная матрица размерности  $n \times n$ .

Уравнение (30) записано в предположении, что отказавшей является ИНС<sub>1</sub>, а в качестве эталонной для диагностирования выбрана ИНС<sub>2</sub>.

$U$ - $D$  представление выражения (30) имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} f_j = U_{j(2)}^T U_{j-1}^{-T}; \quad V_j = D_{j-1}^{-1} f_j^T; \\ \alpha_j = f_j V_j + D_{j(2)}^{-1}; \quad K_j = U_{j-1}^{-T} V_j / \alpha_j; \\ MWGS \left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_j = [(K_j f_j - U_{j-1}^{-T}) : K_j] \\ \bar{D}_j = \text{diag}(D_{j-1}^{-1}; D_{j(2)}^{-1}) \end{array} \right\} \rightarrow \frac{U_j^{-1}}{D_j^{-1}}; \quad j = \overline{1, n}, \\ \Delta U_{1,2}^{-1} = U_n^{-1}; \quad \Delta D_{1,2}^{-1} = D_n^{-1}; \\ \Delta P_{1,2}^{-1} = \Delta U_{1,2}^{-T} \Delta D_{1,2}^{-1} \Delta U_{1,2}^{-1}. \end{array} \right\} \quad (31)$$

где  $MWGS$  – оператор, реализующий модифицированную процедуру Грама-Шмидта [7], позволяющую преобразовать совокупность матриц  $\bar{W}_j$  размерности  $n \times (n \times r)$  и  $\bar{D}_j$  размерности  $(n+r) \times (n+r)$  в совокупность матриц  $U_j$ ;  $D_j$  размерности  $n \times n$ ;  $U_j^{-T} = (U_j^{-1})^T$ .

После формирования матриц  $\Delta U_{1,2}^{-1}, \Delta D_{1,2}^{-1}$

выполняется диагностирование ИНС<sub>1</sub> по следующему рекуррентному алгоритму

$$\Delta J_{1,2(j)} = \Delta J_{1,2(j-1)} + \Delta \tilde{v}_{1,2(j)}^2 \Delta D_j^{-1} \stackrel{?}{>} j + 3\sqrt{2j};$$

$$j = \overline{1, n}; \quad \text{при } \Delta J_{1,2(0)} = 0,$$

где  $\Delta \tilde{v}_{1,2} = \Delta U_i^{-1} \Delta v_{1,2}$ ;  $\Delta D_j^{-1}$  –  $j$ -й элемент диагональной матрицы  $\Delta D_{1,2}^{-1}$ ;  $\Delta \tilde{v}_{1,2(j)}^2$  –  $j$ -й

элемент вектора невязок  $\Delta \tilde{v}_{i,2}; \left\{ \begin{matrix} ? \\ \geq \\ < \end{matrix} \right\}$  – оператор сравнения.

### 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленная технология контроля и оптимизации структуры резервированных ИНС была реализована и апробирована в распределенной ИНС совместной разработки ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт» (Москва) и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Макетный образец распределенной ИНС представлен на рис. 3, где показаны: БИНС-500НС – бесплатформенная инерциально-спутниковая навигационная система на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) совместной разработки «ЭМНС НаукаСофт» и НПК «Оптолинк» (Зеленоград); микромеханические БИНС - МЭМС, построенные на базе измерительных модулей ADIS16488 компании Analog Devices.

На рис. 4 показана структурная схема программно-аппаратного обеспечения распределенной ИНС, где дополнительно обозначены: ПОС – процессор обработки сигналов на базе вычислительной платы OlinuXino A20 micro с адаптером для согласования интерфейсов SPI и UART.

Система БИНС-500НС рассматривалась как опорная, а системы БИНС-МЭМС как ведомые. Применение такой структуры построения ИВК связано с тем, что для микромеханических датчиков характерна большая зона нечувствительности при измерении угловых скоростей и ускорений. Поэтому БИНС-МЭМС не могут автономно выполнить начальную выставку по углам ориентации методом гирокомпасирования [5]. Начальная выставка таких БИНС реализуется по информации от базовой системы.

Эксперименты проводились в наземных условиях с размещением оборудования на стенде Раменского приборостроительного завода.

Циклограмма работы системы БИНС-500НС включала следующие этапы: грубая начальная выставка (0÷100 с); точная начальная выставка (100,600 с); навигационный режим ( $t > 600$  с).

На этапе грубой начальной выставки реализуются следующие процедуры:

- приближенное определение угловой ориентации инерциального измерительного блока системы БИНС-500НС по выходным сигналам чувствительных элементов (ЧЭ);
- приближенное определение угловой ориентации БИНС-МЭМС относительно системы БИНС-500НС на основе априорно известной информации об их взаимном расположении.

На этапе точной начальной выставки реализуются следующие процедуры:

- оценка и компенсация ошибок угловой ориентации и дрейфов ЧЭ БИНС-500НС путем последовательной обработки с помощью ОФК сигналов наблюдений  $z_i$  инвариантов

$$z_{\Theta(i)} = C_{0(i)}^T \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\Theta}(\tau) d\tau - [0:0:\Omega \Delta t_i]^T; \quad (32)$$

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i]_{\text{ТНВ}}^T; \quad (33)$$

$$z_{v(i)} = [V_{\xi} V_{\eta} V_{\zeta}]_{(i)\text{БИНС}}^T, \quad (34)$$

где ТНВ – обозначение точки начальной выставки;  $\varphi_i, \lambda_i$  – геодезические широта и долгота местоположения БИНС;  $C_0$  – матрица направляющих косинусов, характеризующая ориентацию блока ЧЭ (БЧЭ) относительно инерциальной системы координат;  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  – шаг наблюдений;  $\dot{\Theta} = [\dot{\Theta}_x \ \dot{\Theta}_y \ \dot{\Theta}_z]^T$  – вектор выходных сигналов ВОГ в проекциях на оси БЧЭ;  $\Omega = 15.04 \text{ } 1^0 / \text{ч}$  – значение угловой скорости

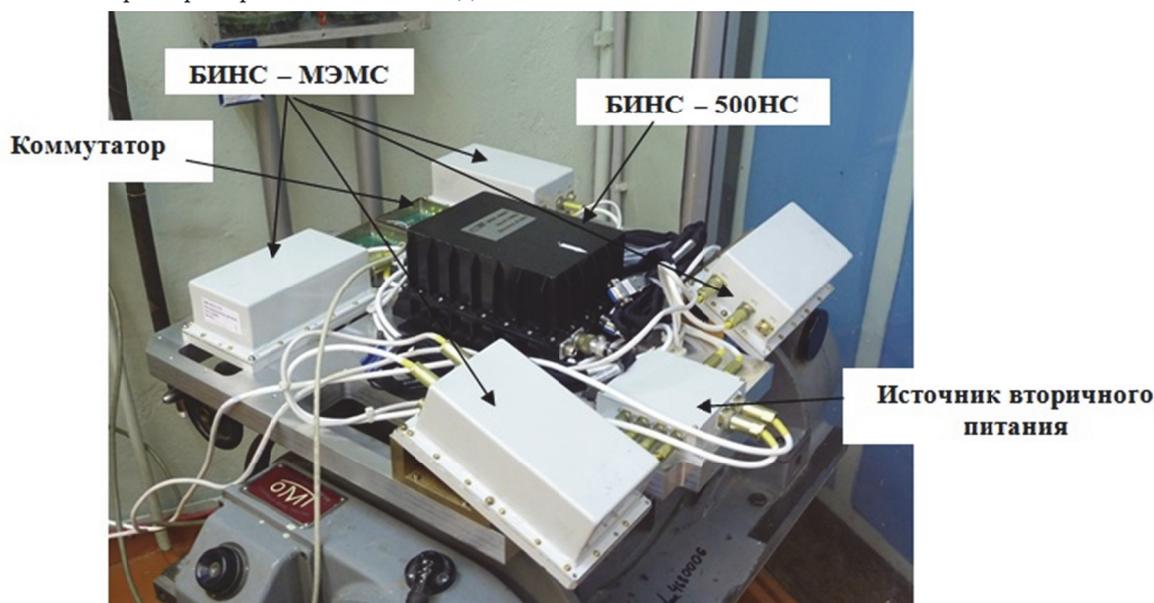


Рис. 3. Распределенная резервированная ИНС

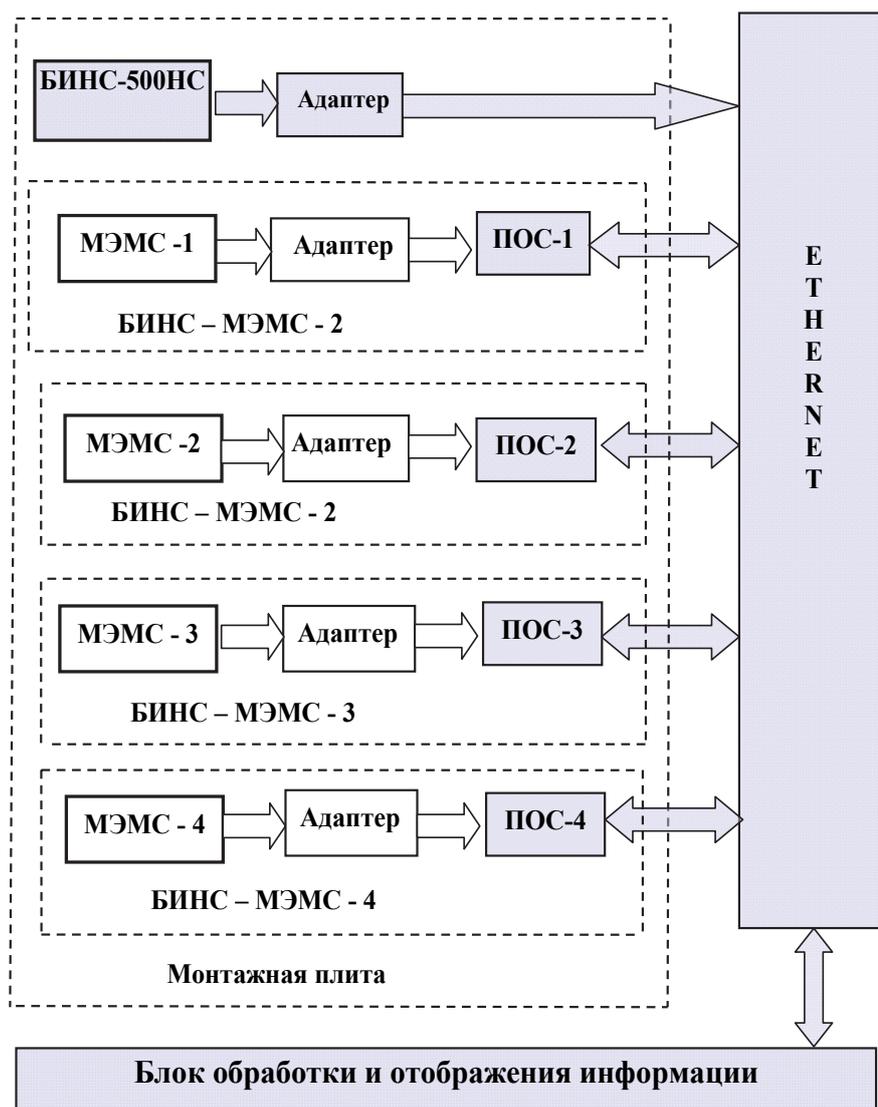


Рис. 4. Структурная схема программно-аппаратного обеспечения распределенной резервированная ИНС

вращения Земли;  $\bar{V} = [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T$  – вектор относительной скорости движения БЧЭ в проекциях на оси полусвободного в азимуте опорного навигационного трехгранника  $o\xi\eta\zeta$  [5];

- оценка и компенсация ошибок угловой ориентации и дрейфов ЧЭ БИНС-МЭМС на основе метода векторного согласования [9] и последовательной обработки с помощью ОФК сигналов наблюдений следующего вида

$$\Delta z_V = [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T_{\text{БИНС-МЭМС}} - [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T_{\text{БИНС-500}}; \quad (35)$$

$$\Delta z_K = [\varphi \lambda]^T_{\text{БИНС-МЭМС}} - [\varphi \lambda]^T_{\text{БИНС-500}}. \quad (36)$$

Исследование навигационного режима распределенной БИНС выполнено методом математического моделирования путемчисления параметров движения с использованием исходных данных, полученных при начальной выставке. Технология математического модели-

рования базируется на решении обратной задачи инерциальной навигации. Такая задача связана с определением сигналов датчиков первичной навигационной информации, обеспечивающих полет по заданной траектории относительно земной поверхности.

Оценивание и компенсация ошибок БИНС-500НС в навигационном режиме выполнялось по позиционным и скоростным наблюдениям

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]^T_{\text{БИНС}} - [\varphi_i \lambda_i]^T_{\text{СНС}}; \quad (37)$$

$$z_{v(i)} = C_3^T [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T_{(i)\text{БИНС}} - [V_E V_N V_H]^T_{(i)\text{СНС}}, \quad (38)$$

где  $C_3$  – матрица направляющих косинусов, характеризующая взаимную угловую ориентацию опорного  $o\xi\eta\zeta$  и географического  $oENH$  сопровождающих трехгранников [5].

Оценивание и компенсация ошибок БИНС-МЭМС в навигационном режиме выполнялось по скоростным и позиционным наблюдениям (35), (36).

## Компенсация ошибок БИНС-МЭМС по базовой БИНС

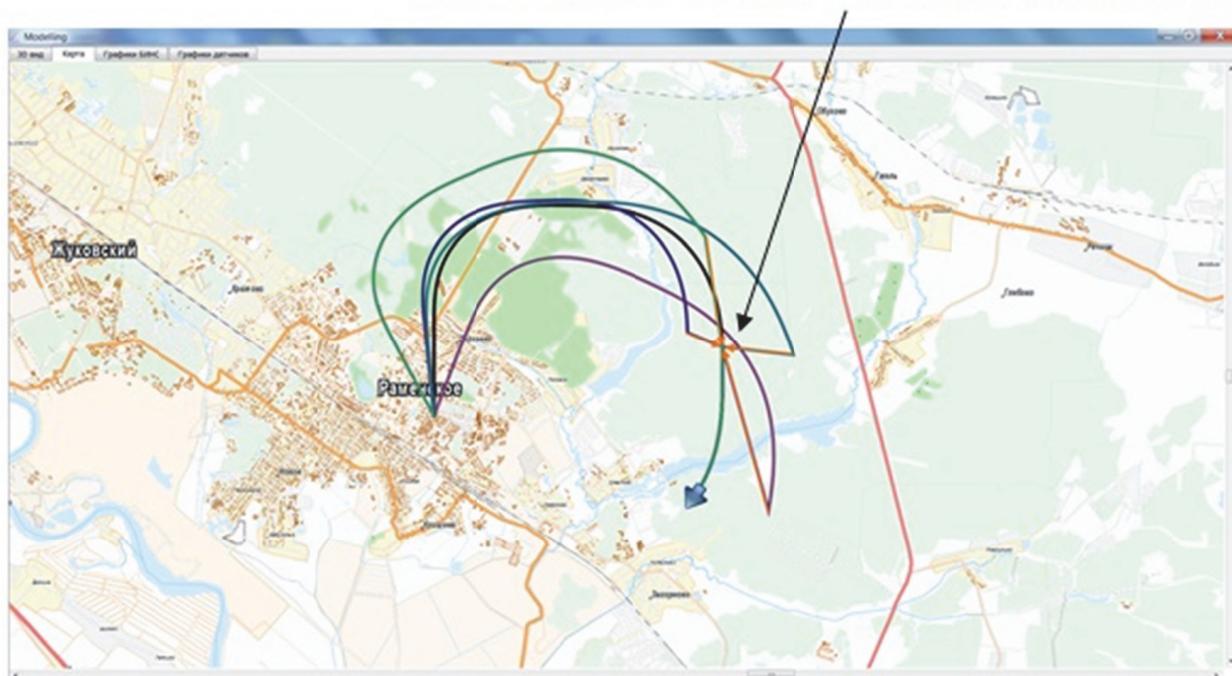


Рис. 5. Screen Shot с экрана блока обработки информации распределенной ИНС

Характерные результаты математического моделирования совместной работы базовой и микромеханических БИНС представлены на рис. 5.

Проведенные исследования и представленные графики подтверждают целесообразность реализации алгоритмов комплексирования распределенных БИНС для их взаимной поддержки и повышения информационной надежности ИВК. Такое комплексирование опирается на реализацию метода векторного согласования навигационных параметров базовой и микромеханических БИНС, а также на применение процедур оптимального оценивания ошибок и контроля по комбинированным критериям согласия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное состояние бортовых ИВК характеризуется включением в их состав систем обзора земной поверхности. Функционирование таких систем связано с необходимостью их навигационного обеспечения. Применение для этих целей только СНС не обеспечивает непрерывность позиционирования, а также не позволяет определять углы ориентации радиолокационных и видеоконтрольных устройств (ВКУ). Кроме того, приемники СНС подвержены импульсным помехам и их размещение в местах установки РЛС и ВКУ в ряде случаев не представляется возможным из-за конструктивных ограничений. Поэтому в современные ИВК включаются системы микронавигации РЛС и ВКУ на базе микромеханических и других малогабаритных инерциальных изме-

рителей [10]. В то же время наличие на борту ЛА кроме МЭМС пилотажно-навигационного комплекса, ядром которого является точная инерциально-спутниковая система создает необходимые условия для создания распределенных ИНС. Рассмотренные в работе научно-технические решения отражают возможность не только интеграции распределенных систем микронавигации РЛС и ВКУ, но и повышения информационной надежности бортовых ИВК на основе взаимной поддержки таких систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем [под ред. В.Я. Распопова]. СПб.: ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. Авиационные системы радиовидения [под ред. Г.С. Кондратенкова]. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
3. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32-41.
4. Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб.: ГИЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 207 с.
5. Бабиц О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
6. Gertler J.J. Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. N.Y.: Marcel Dekker, 1998.
7. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика. М.: Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. 452с.

8. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Королук В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. М.: Наука, ГРФМЛ, 1985. 640 с.
9. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании. М.: Наука, ГРФМЛ, 1971. 168с.
10. Использование инерциально-спутниковой навигационной системы для определения параметров движения фазового центра антенны радиолокатора / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Материалы XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 266-274.

## MONITORING AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

© 2016 A.V. Chernodarov<sup>1</sup>, A.P. Patrikeev<sup>1</sup>, A.B. Borzov<sup>2</sup>, I.I. Merkulova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> NaukaSoft Experimental Laboratory, Ltd., Moscow

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

The article is devoted to the problem of increasing information reliability of distributed inertial navigation system (INS) on the basis of various measuring instruments principle of operation. The proposed solution of the above problem relies on the majority scheme for stochastic monitoring, diagnostics and for optimization of INS structure through the generalized state parameters. The technology for generating diagnostic models to detection, parry and prevent of violations. The results of practical realization of such architecture INS are given, the block diagram of the software and hardware of distributed INS are given. The obtained results of mathematical modeling of collaborative information processing of distributed INS on the basis of various measuring instruments principle of operation.

*Keywords:* inertial navigation system, majority monitoring, generalized state parameter, goodness-of-fit test.

---

*Alexander Chernodarov, Dr.Tech. Sc., Ass. Prof., Leading Researcher of the NaukaSoft Experimental Laboratory, Ltd, Professor of «Strela» Branch of Moscow Aviation Institute, E-mail: achernodarov@xlab-ns.ru*

*Andrey Patrikeev, Cand. Tech. Sc., Deputy General Director of the NaukaSoft Experimental Laboratory, Ltd. E-mail: apatrikeev@xlab-ns.ru*

*Andrey Borzov, Dr.Tech. Sc., Professor, Head at the Autonomous Information and Control Systems Department. E-mail: borzov@rambler.ru*

*Irina Merkulova, PhD Student. E-mail: merkulova\_irina90@mail.ru*