

ПОЛУНАТУРНАЯ ОТРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БИНС-500 НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

А. В. Чернодаров¹, А. П. Патриксев², Ю. Н. Коркишко³, В. А. Федоров⁴
ООО НПК «ОПТОЛИНК», 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.5
Тел. (+7-495) 536-9933, Факс(+7-495) 536-9934, e-mail: opto@optolink.ru

С. Е. Переляев⁵

Московский институт электромеханики и автоматики, 125319, Россия, Москва,
Авиационный переулок, 5, e-mail: aoniga@aviapribor.ru

Аннотация

Ключевые слова: инерциально-спутниковые навигационные системы, волоконно-оптические гироскопы, полунатурная обработка программно-математического обеспечения

Рассматриваются особенности технологии полунатурной обработки программно-математического обеспечения (ПМО) бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем (БИНС). Реализация такой технологии опирается на современные средства регистрации и позволяет оптимизировать ПМО по реальным сигналам и на множестве исследуемых алгоритмов. Дана характеристика системы БИНС-500 на волоконно-оптических гироскопах как объекта полунатурной обработки. Приводятся результаты полунатурных испытаний системы БИНС-500, подтверждающие возможность и целесообразность применения предлагаемой технологии для создания заказных БИНС различного назначения.

Введение

Аналитические подходы к улучшению эксплуатационных характеристик бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) связаны с оптимизацией их программно-математического обеспечения (ПМО) при заданных аппаратурных ограничениях. Аппаратурные ограничения определяются требованиями к размерам, массе и стоимости БИНС, а также располагаемыми вычислительными ресурсами.

Оптимизация ПМО БИНС связана с исследованием эффективности различных алгоритмов счисления и коррекции параметров движения объектов заданного класса. Возможны следующие подходы к решению такой задачи:

- проведение множества натурных экспериментов с различными вариантами построения ПМО. В этом случае регистрируются и анализируются выходные параметры БИНС. Такие эксперименты связаны с существенными материальными и временными затратами;
- проведение одного натурального эксперимента на типовой траектории движения объекта с регистрацией сигналов спутниковой навигационной системы (СНС) и инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ): гироскопов и акселерометров. Такой подход позволяет по зарегистрированным сигналам выполнить оптимизацию ПМО на множестве исследуемых алгоритмов.

В соответствии с предлагаемой технологией обработки ПМО при проведении натурального эксперимента регистрируются сигналы волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), акселерометров и СНС. Затем зарегистрированные данные используются для настройки режимов функционирования бесплатформенной инерциально-спутниковой навигационной системы с различными алгоритмами счисления и коррекции параметров движения. Качество настройки определяется по отклонениям численных инерциальных параметров от спутниковых. Таким образом, представляется возможным реализовать итерационный процесс полунатурной обработки ПМО.

Цель работы – обоснование и практическая реализация технологии полунатурной обработки программно-математического обеспечения интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем по экспериментальным данным.

Достижение поставленной в работе цели опирается на программно-аппаратные возможности современной бортовой электроники, а именно:

¹ Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

² Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

³ Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

⁴ Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

⁵ Доктор технических наук, главный научный сотрудник.

- на возможности современных средств сбора, преобразования, обработки и регистрации сигналов навигационных измерителей;
- на реализацию в структуре навигационных измерителей стандартных высокоскоростных каналов информационного обмена.

1. Технология и задачи полунатурной отработки программно-математического обеспечения бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем

Технология полунатурной отработки ПМО бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем (БИСНС) может быть представлена схемой, показанной на рис. 1, где ИИБ – инерциальный измерительный блок, включающий триаду акселерометров и триаду ВОГ; ВЗУ – внешнее запоминающее устройство; $\bar{\omega}$ – вектор выходных сигналов ВОГ; \bar{a} – вектор выходных сигналов акселерометров; φ, λ – геодезические широта и долгота местоположения объекта; \bar{V} – вектор относительной скорости движения объекта в проекциях на оси навигационного трехгранника; $\bar{\delta}$ – вектор параметров ориентации.

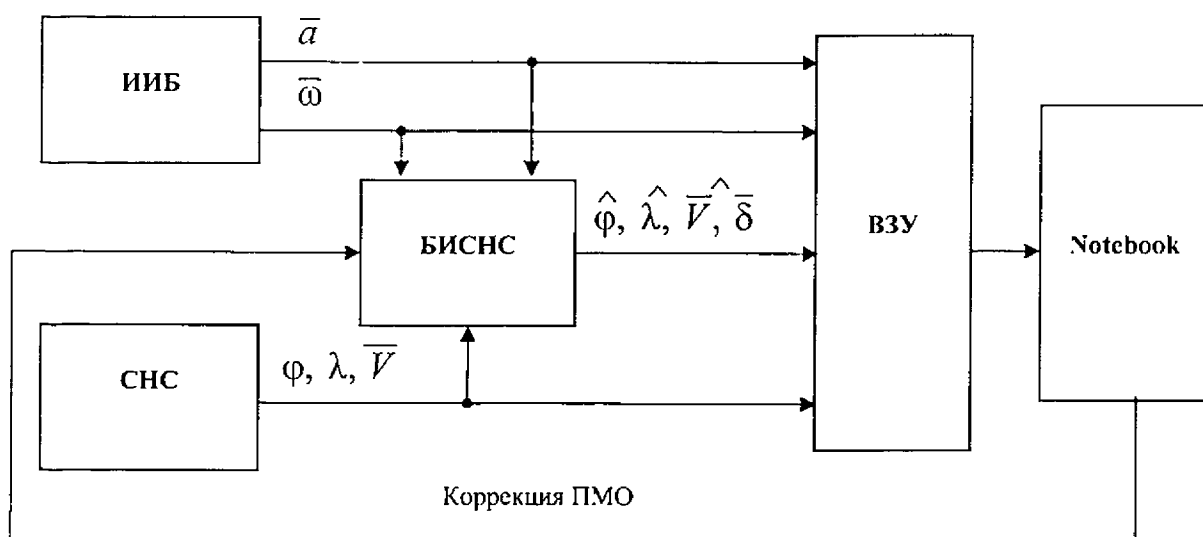


Рис. 1. Схема полунатурной отработки ПМО БИСНС

В соответствии с представленной схемой при проведении полунатурного эксперимента счисление и коррекция параметров движения выполняется в Notebook по зарегистрированным сигналам ЧЭ и СНС. Для идентичности процедур натурной и полунатурной отработки ПМО регистрация осуществляется с частотой загрузки сигналов ЧЭ в процессорный модуль БИСНС. В процессе полунатурной отработки ПМО могут решаться следующие задачи:

- настройка процедур первичной обработки сигналов ЧЭ [1] Такая настройка включает определение структуры, порядка и параметров цифрового фильтра, а также процедур защиты БИСНС от случайных сбросов ЧЭ;
- выбор методов интегрирования основных уравнений ориентации и навигации БИСНС;
- согласование частоты съема сигналов ЧЭ с располагаемыми вычислительными ресурсами БИСНС;
- выполнение динамической калибровки ЧЭ, которую не представляется возможным выполнить в заводских условиях;
- оценка перекосов измерительных осей акселерометров и ВОГ;
- оцеливание и аналитическая компенсация дрейфов ЧЭ, оставшихся после заводской калибровки и проявляющихся в каждом запуске БИСНС в процессе эксплуатации;
- уточнение структуры и параметров моделей дрейфов ЧЭ [2];
- настройка процедур вторичной обработки сигналов наблюдений, основанных на применении оценивающих фильтров калмановского типа. Такая настройка включает [3] согласование параметров и средств защиты фильтра от расхожимости с вычислительными ресурсами БИСНС.

В процессе эксплуатации БИНС на основе решения указанных задач могут быть реализованы контуры управления состоянием ЧЭ. Применительно к авиационным БИНС такие контуры можно представить схемой, показанной на рис. 2.

Для реализации контуров управления состоянием ЧЭ глубина детализации уравнений ошибок БИНС должна быть доведена до уровня инструментальных дрейфов ВОГ и смещений акселерометров. В этом случае аналитическая компенсация указанных ошибок ЧЭ может быть реализована на уровне первичной обработки сигналов ЧЭ [4].

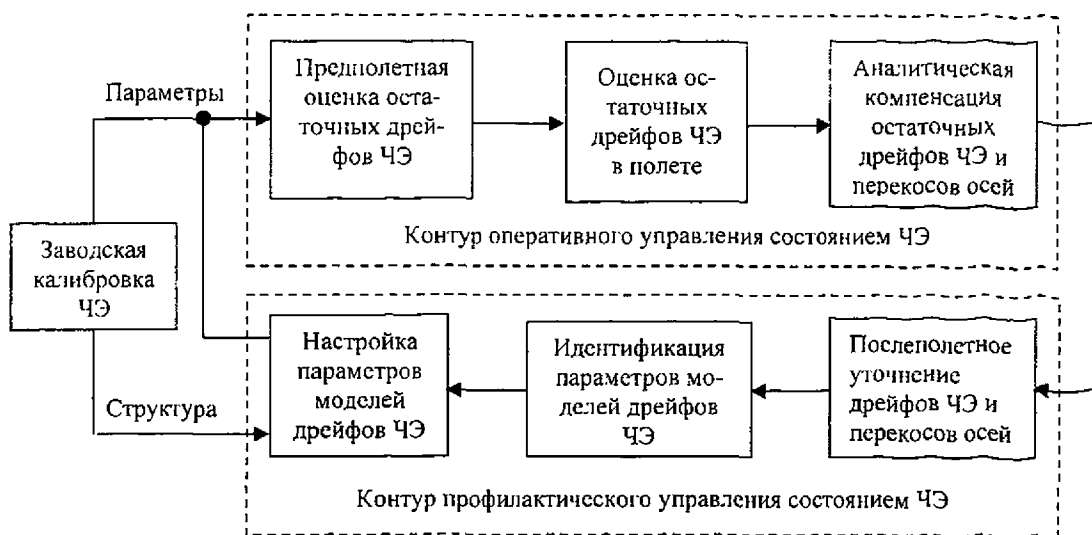


Рис. 2. Контуры управления состоянием чувствительных элементов БИНС

2. Бесплатформенная инерциально-спутниковая навигационная система БИНС-500 как объект полунатурной отработки

Технология полунатурной отработки ПМО была апробирована в процессе испытаний бесплатформенной инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500 разработки НПК «ОПТОЛИНК», г. Зеленоград. На рис. 3 представлен опытный образец системы БИНС-500 с технологическими кабелями.

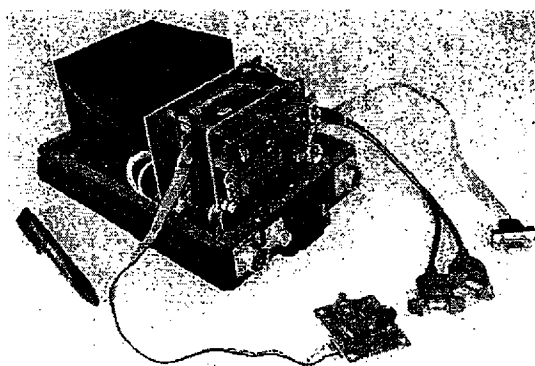


Рис. 3. Бесплатформенная инерциально-спутниковая навигационная система БИНС-500

Основные модули БИНС-500: трехосный блок инерциальных чувствительных элементов ТИУС-500 на базе триады волоконно-оптических гироскопов и акселерометров; спутниковый приемник К-161 разработки РИРВ (г.С.-Петербург), вычислительный модуль в стандарте РС-104, блоки питания, входного и выходного интерфейсов. Аппаратное и программно-математическое обеспечение системы БИНС-500 имеет модульную структуру, аналогичную системе БИНС-1000 и рассмотренную в работе [5]. Однако система БИНС-500 имеет существенно меньший вес (не более 4.5 кг) и габариты.

Случайные остаточные дрейфы ВОГ, входящих в систему БИНС-500, порядка $0,1 \dots 0,3$ °/ч, акселерометров порядка 10^{-4} g. Аппаратное обеспечение, сформированное по критерию эффективность

стоимость, дает основание отнести представленную версию БИНС к системам среднего класса точности. Именно в таких системах представляется целесообразным применение процедур аналитической компенсации остаточных дрейфов ЧЭ.

Циклограмма работы системы БИНС-500 включает следующие этапы: грубая начальная выставка; точная начальная выставка; навигационный режим, включающий подрежимы автономной инерциальной навигации и инерциально-спутниковой навигации.

На этапе грубой начальной выставки выполняется приближенное определение угловой ориентации ИИБ по выходным сигналам чувствительных элементов.

На этапе точной начальной выставки оцениваются ошибки угловой ориентации ИИБ, а также остаточные дрейфы ЧЭ и параметры их динамических моделей. Данная задача решается на основе последовательной обработки робастным фильтром Калмана [3] сигналов наблюдений z , следующего вида

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

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i]_{\text{ТНВ}}^T; \quad (2)$$

$$z_{v(i)} = [V_{\xi} V_{\eta} V_{\zeta}]_{(i)\text{БИНС}}^T, \quad (3)$$

где ТНВ – обозначение точки начальной выставки; φ_i, λ_i – геодезические широта и долгота местоположения БИНС; $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ – шаг наблюдений; $\bar{\Omega} = [\Omega_{\xi} \quad \Omega_{\eta} \quad \Omega_{\zeta}]^T$ – вектор угловой скорости вращения Земли в проекциях на оси полусвободного в азимуте опорного трехгранника $o\xi\eta\zeta$;

$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\Theta}_x & \dot{\Theta}_y & \dot{\Theta}_z \end{bmatrix}^T$ – вектор выходных сигналов ВОГ в проекциях на оси ИИБ; C_0 – матрица направляющих косинусов, характеризующая угловую ориентацию связанной с ИИБ системы координат $oxyz$ относительно инерциальной $Ox_n Y_n Z_n$; $\bar{V} = [V_{\xi} \quad V_{\eta} \quad V_{\zeta}]^T$ – вектор относительной скорости движения ИИБ в проекциях на оси опорного навигационного трехгранника $o\xi\eta\zeta$.

Комплексный режим инерциально-спутниковой навигации реализуется на основе последовательной обработки робастным фильтром Калмана [3] позиционных и скоростных наблюдений

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i]_{\text{СНС}}^T; \quad (4)$$

$$z_{v(i)} = C_{3(i)}^T [V_{\xi} V_{\eta} V_{\zeta}]_{(i)\text{БИНС}}^T - [V_{E} V_N V_H]_{(i)\text{СНС}}^T, \quad (5)$$

где C_3 – матрица направляющих косинусов, характеризующая взаимную угловую ориентацию опорного $o\xi\eta\zeta$ и геодезического $oENH$ трехгранников.

Режим автономной инерциальной навигации реализуется с учетом компенсации прогнозируемых оценок дрейфов ВОГ и смещений акселерометров.

Базовый вектор состояния включает 17 параметров, а именно: ошибки счисления составляющих вектора относительной скорости $\Delta V_{\xi}, \Delta V_{\eta}, \Delta V_{\zeta}$; ошибки счисления элементов кватернионов Δq_0 и Δq_1 ; угловые дрейфы ВОГ $\Delta \dot{\Theta}_x, \Delta \dot{\Theta}_y, \Delta \dot{\Theta}_z$ и смещения акселерометров $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$, где q_0 – кватернион, характеризующий угловую ориентацию связанной с ИИБ системы координат $oxyz$ относительно инерциальной $Ox_n Y_n Z_n$; q_1 – кватернион, характеризующий угловую ориентацию опорного навигационного трехгранника $o\xi\eta\zeta$ относительно земной геоцентрической системы координат $Ox_1 Y_1 Z_1$.

Уравнения ошибок чувствительных элементов формируются в системе координат, связанной с ИИБ. Это позволяет оценивать и демпфировать ошибки ЧЭ в режиме реального времени.

Во всех режимах функционирования БИНС на уровне первичной обработки сигналов ЧЭ выполняются их комбинированная цифровая фильтрация, включающая следующие процедуры:

- входной прогнозирующий контроль сигналов по комбинированному критерию согласия χ^2 / \mathcal{R}^2 [6];
- локализация и парирование случайных сбоев [6];
- подавление шумовых составляющих погрешностей ЧЭ путем рекуррентного сглаживания сигналов [4];
- учет калибровочных коэффициентов, отражающих систематические погрешности ЧЭ, перекосы их осей, а также тепловые дрейфы.

Первые три процедуры первичной обработки сигналов ЧЭ могут быть объединены в единой структуре робастного цифрового фильтра [4,6].

Для реализации контура профилактического управления состоянием ЧЭ в процессе полунатурной отработки ПМО в базовый вектор ошибок БИНС дополнительно включаются определенные при заводской калибровке масштабные коэффициенты и коэффициенты, характеризующие перекосы осей чувствительности ЧЭ. Технологическое расширение вектора ошибок БИНС [2] позволяет выполнить послеоплетное уточнение указанных коэффициентов по зарегистрированным сигналам ЧЭ в динамических режимах функционирования БИНС.

3. Анализ результатов исследований

Эксперименты проводились в наземных условиях с размещением оборудования в подвижной лаборатории на базе автомобиля. Циклограмма работы системы БИНС-500 включала следующие этапы: грубая начальная выставка ($t=0-100$ с); точная начальная выставка ($t=100-600$ с); навигационный режим ($t > 600$ с).

Некоторые результаты эксперимента по оценке точностных характеристик системы БИНС-500 представлены на рисунках 4-19. Результаты сравнительного анализа функционирования БИНС с различными схемами демпфирования ошибок ЧЭ получены на основе счисления параметров движения по зарегистрированным сигналам ЧЭ ИИБ и СНС.

На рис. 4 показана горизонтальная траектория движения испытательной лаборатории в городских условиях. На рис. 5-7 показаны соответственно углы истинного курса, тангажа и крена ИИБ.

На рис. 8 показаны: выходной сигнал (график светлого цвета, угл. с/с) одного из гироскопов; сглаженный с помощью робастного цифрового фильтра сигнал (график темного цвета) того же гироскопа.

На рис. 9 показаны: выходной сигнал (график светлого цвета, м/с²) одного из горизонтальных акселерометров; сглаженный с помощью робастного цифрового фильтра сигнал (график темного цвета) того же акселерометра. Сглаживание выполнялось с частотой сема сигналов ЧЭ 1 кГц.

На рисунках 10-12 показаны оценки остаточных дрейфов ВОГ. Оценки получены при обработке наблюдений (1) - (5) с частотой 1 Гц в процессе точной начальной выставки и в режиме навигации. Кроме того, на рис. 12 показан реальный инструментальный дрейф вертикального ВОГ (град/ч), определенный в процессе точной начальной выставки как среднее значение смещения "нуля" на временных интервалах в 10с. На рис. 13 показана оценка смещения рассматриваемого акселерометра.

С 600с система БИНС-500 функционировала в режиме автономной инерциальной навигации и компенсации в сигналах ЧЭ оцениваемых остаточных дрейфов и смещений.

На рис. 14-18 показаны счисленные БИНС (графики темного цвета) и определенные с помощью СНС (графики светлого цвета) составляющие путевой скорости объекта V_E, V_N . Рис. 14, 15 отражают динамику изменения указанных скоростей при правильной настройке коэффициентов сноса и диффузии [2,7] в модели угловых дрейфов ВОГ, а рисунки 17,18 – при их отличии от требуемых на порядок.

Рис. 16 отражает наличие сигналов СНС при движении в городских условиях, а именно: «1» - сигналы есть; «0» - сигналов нет.

Сравнение результатов показывает, что при неточной настройке параметров моделей погрешностей ЧЭ существенно ухудшаются точностные характеристики БИНС.

На рис. 19 показана круговая ошибка оценки местоположения объекта ΔS , соответствующая численности скоростей БИНС, представленных на рис. 14, 15, где

$$\Delta S = \sqrt{\delta_{\varphi}^2 + \delta_{\lambda}^2}; \quad \delta_{\varphi} = (\varphi_{\text{БИНС}} - \varphi_{\text{СНС}})R; \quad \delta_{\lambda} = (\lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}})R;$$

$$R = a(1 - 0.5e^2 \sin^2 \phi); \quad a = 6378245 \text{ м}; \quad e^2 = 0.0066934.$$

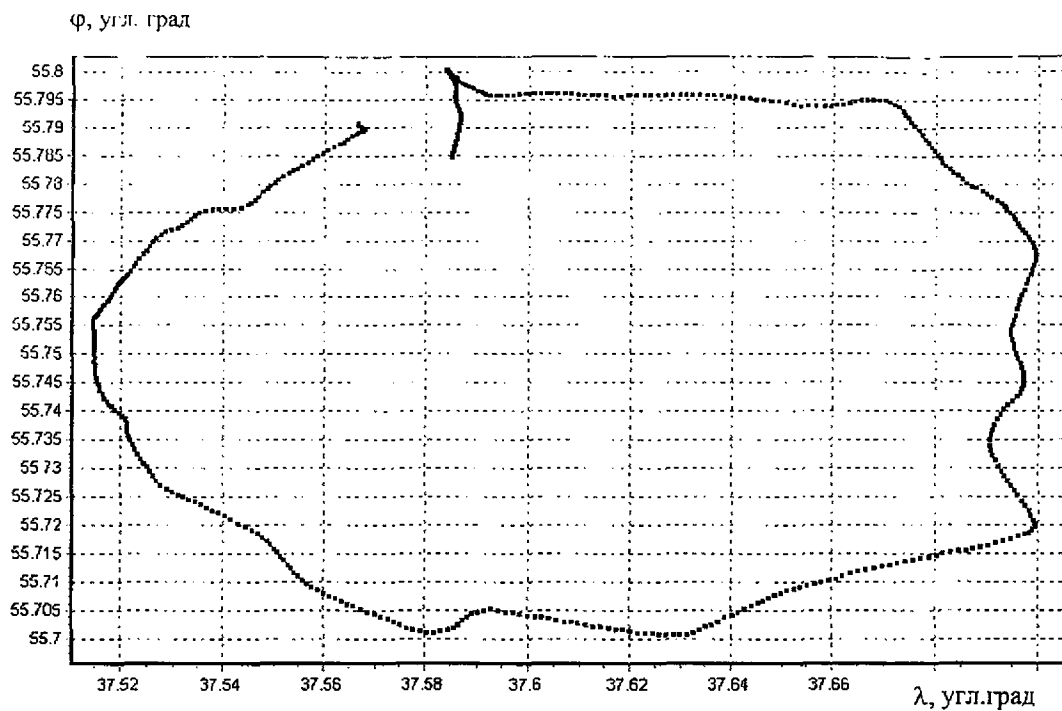


Рис. 4. Горизонтальная траектория движения испытательной лаборатории в городских условиях

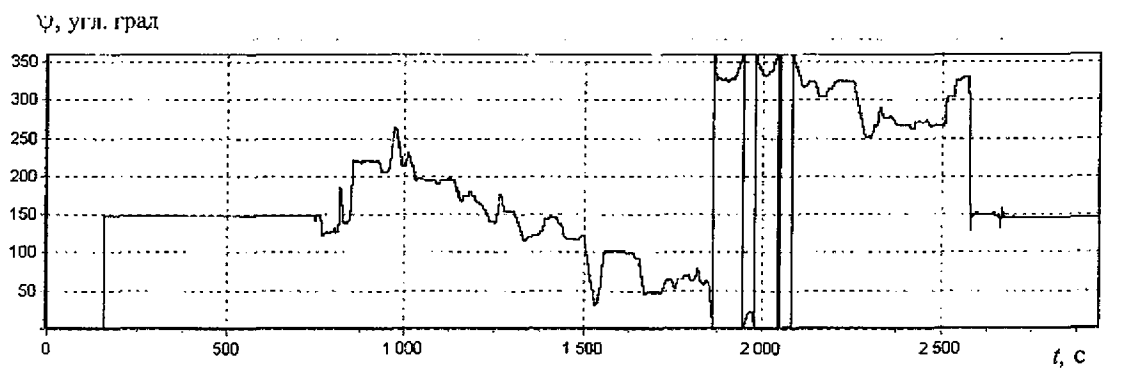


Рис. 5. Угол истинного курса

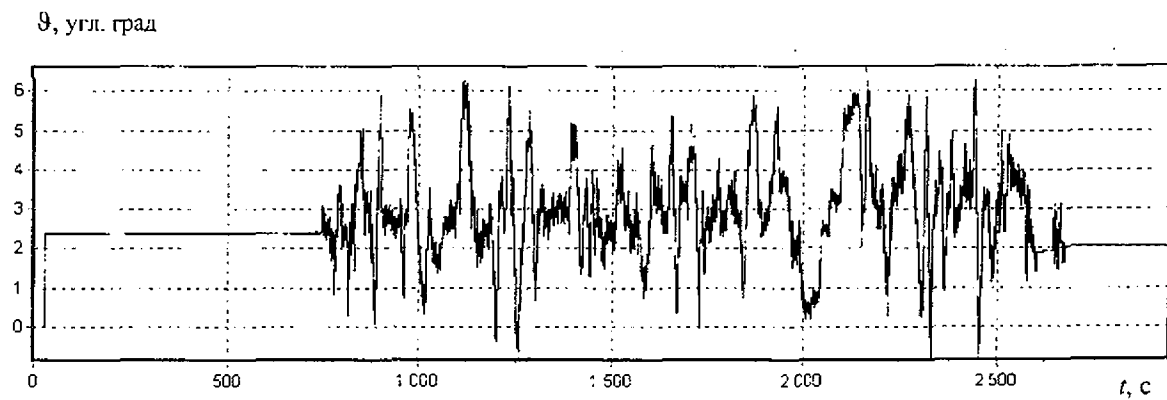


Рис. 6. Угол тангажа

γ , угл. град

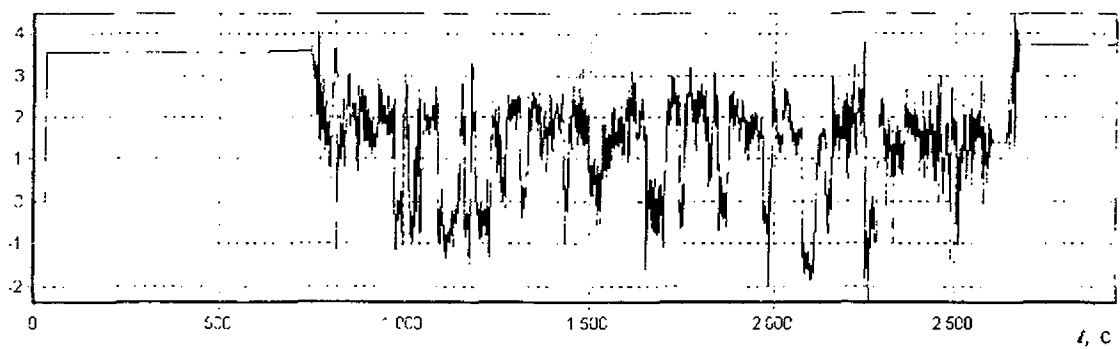


Рис. 7. Угол крена

$\Theta, \dot{\Theta}$, угл. с/с

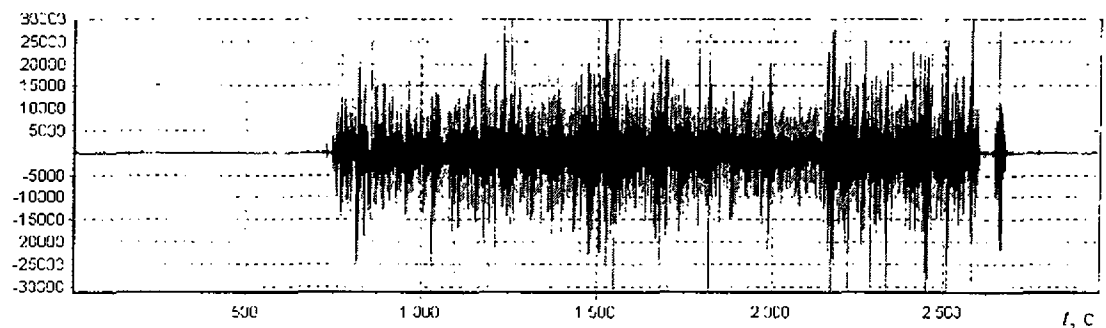


Рис. 8. Выходной сигнал одного из гироскопов

a_x , м/с²

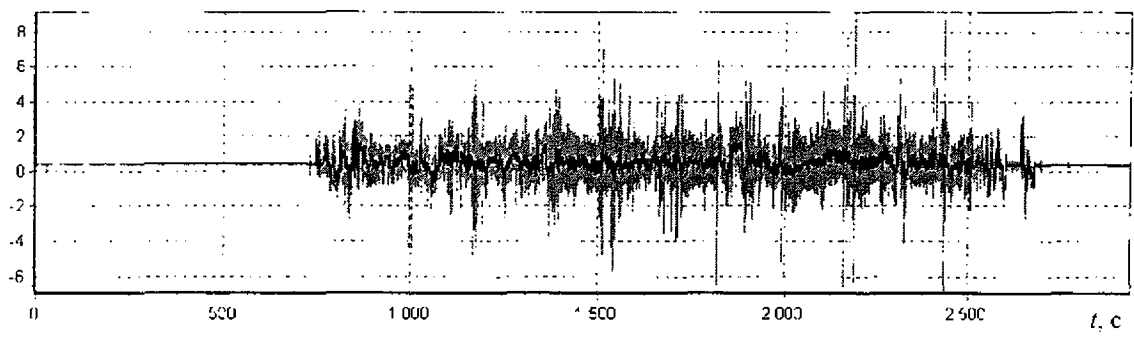


Рис. 9. Выходной сигнал одного из горизонтальных акселерометров

$\Delta\omega_x$, °/ч

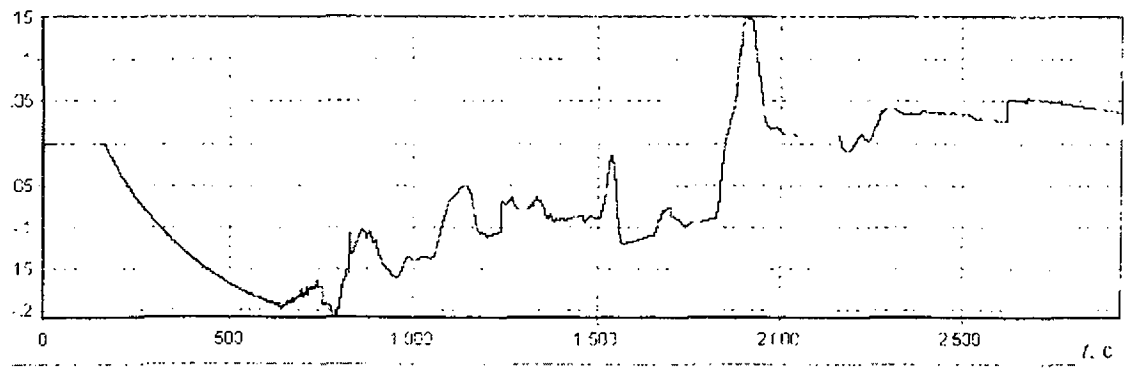


Рис. 10. Оценка остаточного дрейфа ВОГ ω_x

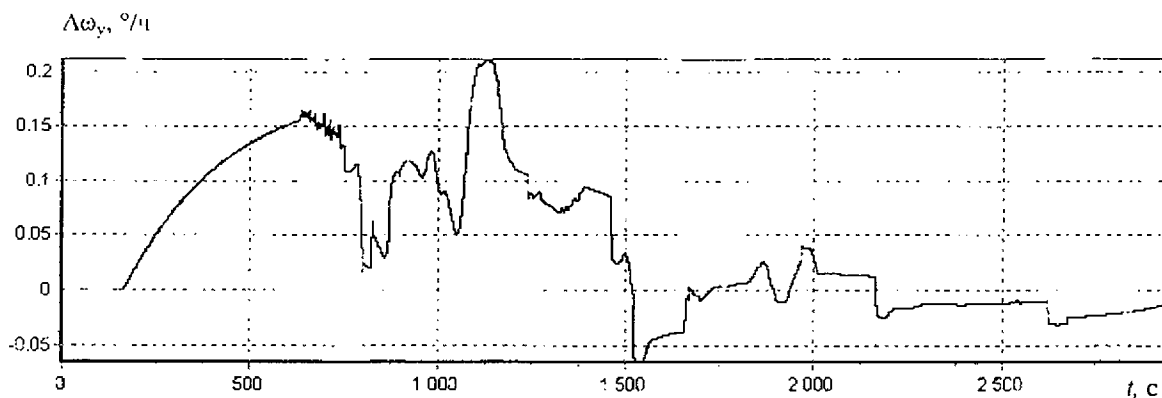


Рис. 11. Оценка остаточного дрейфа ВОГ oy

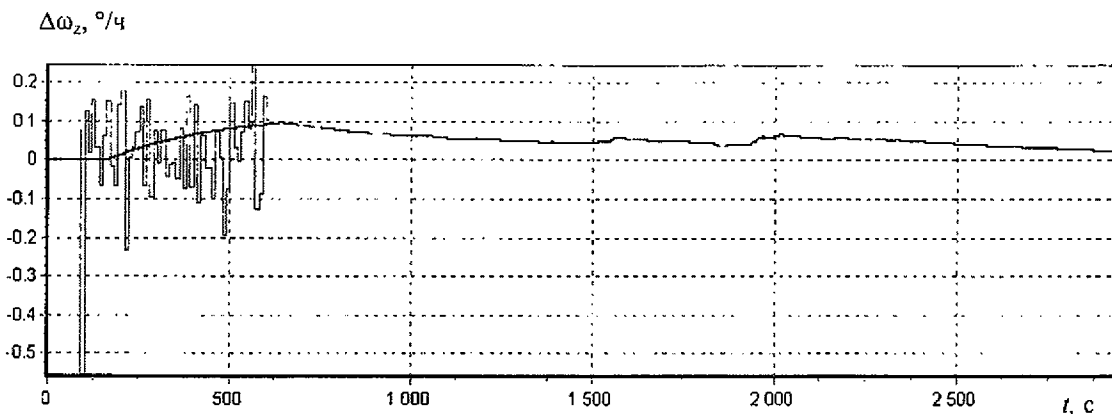


Рис. 12. Реальный остаточный дрейф вертикального ВОГ oz и его оценка

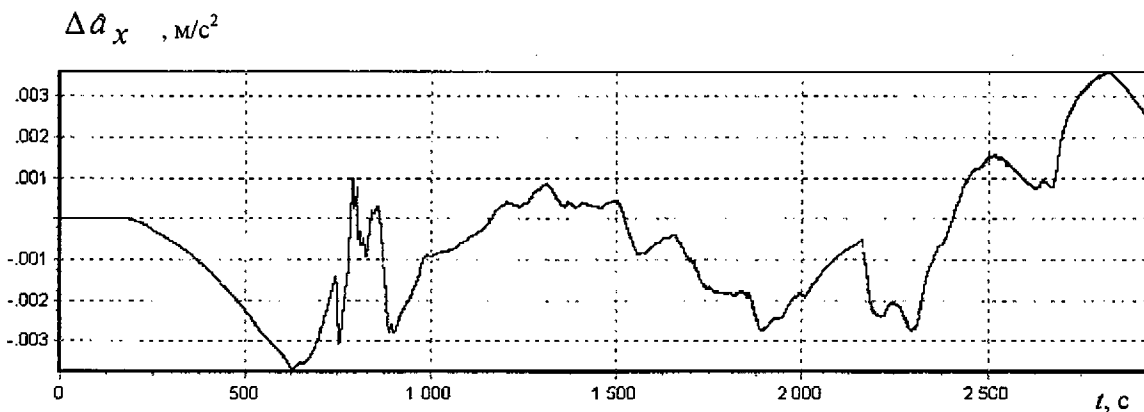


Рис. 13. Оценка смещения рассматриваемого акселерометра

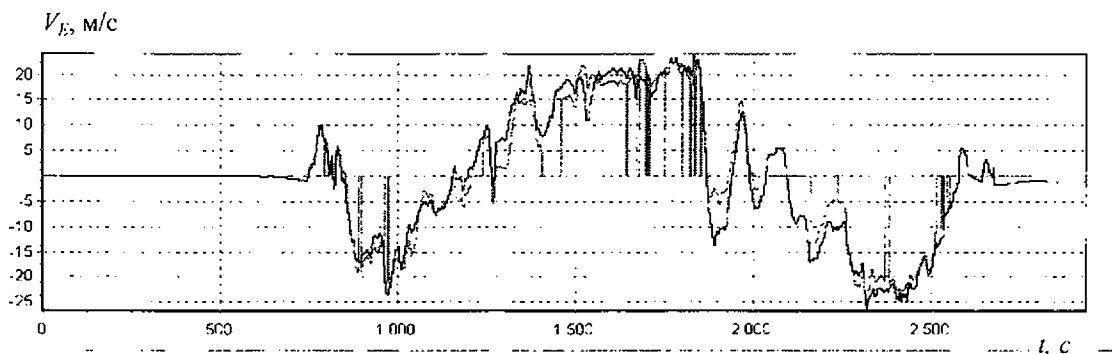


Рис. 14. Динамика изменения скорости V_E при правильной настройке коэффициентов в модели дрейфов ВОГ

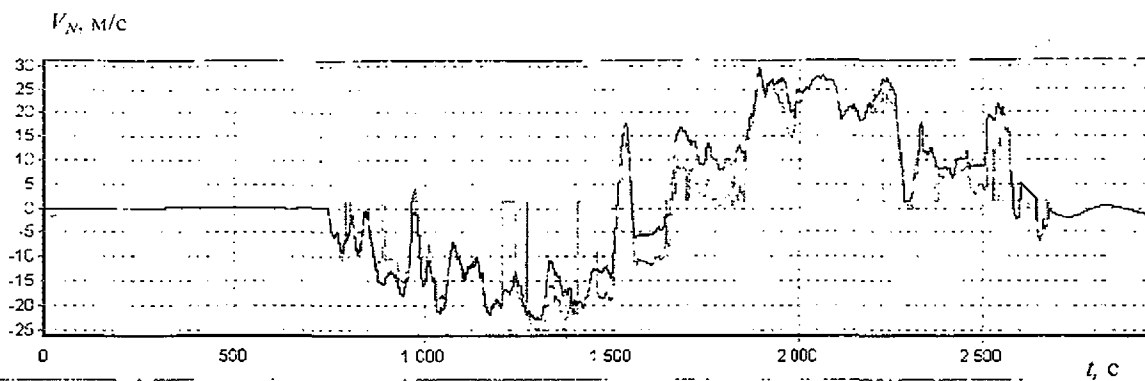


Рис. 15. Динамика изменения скорости V_N при правильной настройке коэффициентов в модели дрейфов ВОГ

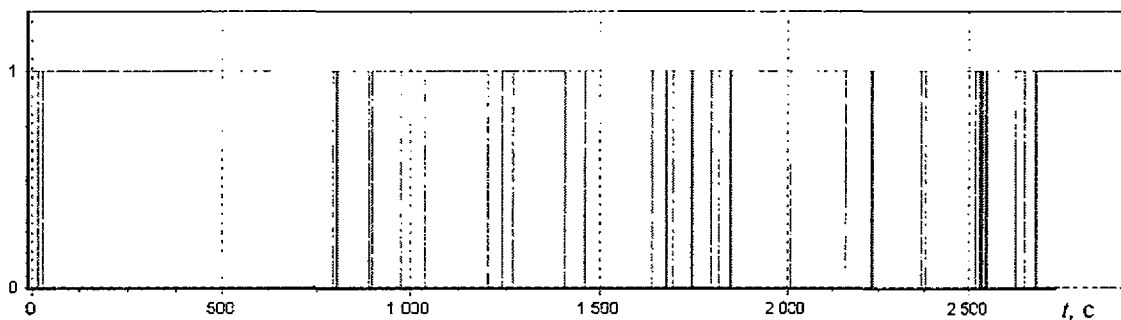


Рис. 16. Признаки наличия сигналов СНС при движении в городских условиях

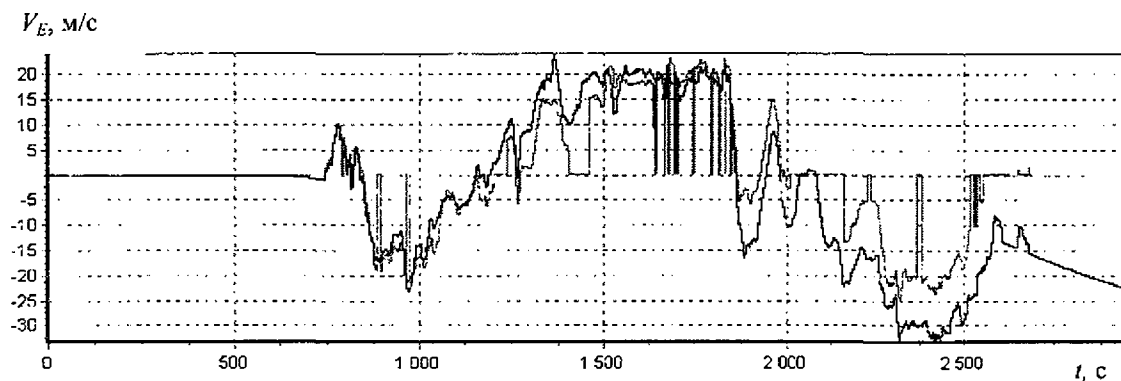


Рис. 17. Динамика изменения скорости V_E при неправильной настройке коэффициентов в модели дрейфов ВОГ

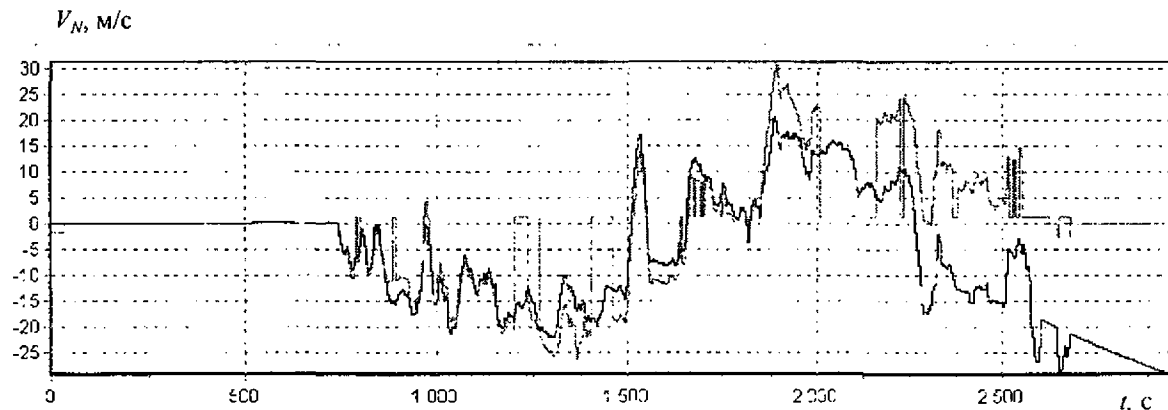


Рис. 18. Динамика изменения скорости V_N при правильной настройке коэффициентов в модели дрейфов ВОГ

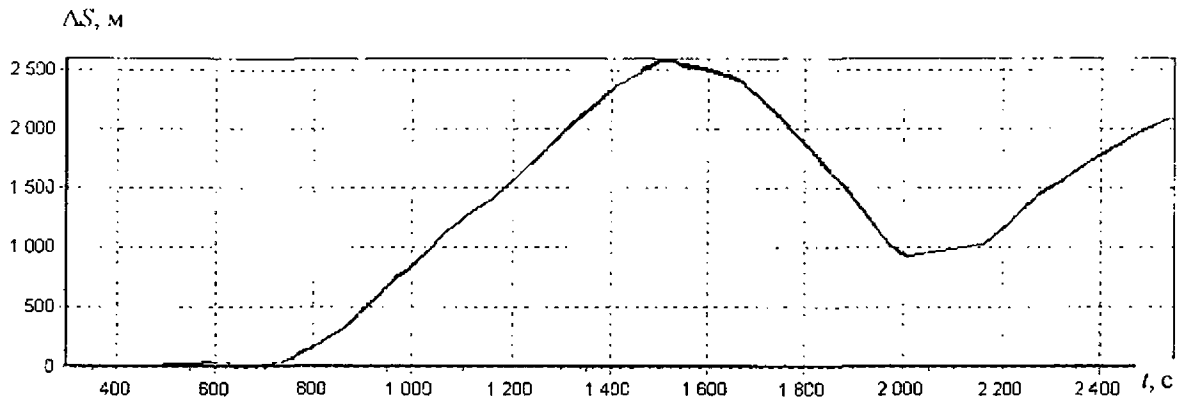


Рис. 19. Динамика изменения круговой ошибки оценки местоположения объекта при демпфировании дрейфов чувствительных элементов

Проведенные исследования и представленные графики подтверждают целесообразность включения этапа полунатурного моделирования в структуру технологического цикла отработки программно-математического и аппаратного обеспечения бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем.

Заключение

Полунатурная отработка программно-математического обеспечения (ПМО) бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем (БИСНС) может выполняться по зарегистрированным сигналам измерителей. Такой подход позволяет имитировать реальные условия эксплуатации и выполнять оптимизацию ПМО на множестве исследуемых алгоритмов. Возможности современной бортовой электроники, а также средств сбора и обработки сигналов позволяют использовать технологию полунатурной отработки для управления техническим состоянием БИСНС и модернизации ПМО на всех этапах жизненного цикла.

Литература

1. Чернодаров А.В., Переляев С.Е. Контроль и оценка состояния инерциальных чувствительных элементов при комплексной первичной обработке сигналов // *Материалы 14 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. – СПб: ГИЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. с. 93-95.
2. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Платонов А.Ю. и др. Параметрическая идентификация моделей погрешностей интегрированных систем навигации в режиме реального времени и по данным бортовых устройств регистрации // *Гироскопия и навигация*, 2007, № 4 (30), с. 17-31.
3. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Булкин В.Л., Голиков В.П., Ларионов С.В. Летная отработка бортовых оценивающих фильтров // *Материалы 11 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. – СПб: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004, с. 19 - 28.
4. Chernodarov A.V. Monitoring and Multilevel Protection of the Integrity of Tightly-Coupled Navigation Systems for Maneuverable Aircraft // *Prepr. IFAC Workshop «Aerospace Guidance, Navigation and Flight Control Systems»*, Samara, Russia, 2009, Sess. WeG – I.
5. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Патрикеев А.П., Чернодаров А.В., Матюшин В.А., Переляев С.Е. Объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей и ее реализация в бесплатформенной инерциальной системе БИСНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах // *Материалы 16 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. СПб: ГИЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2008, с.21 -30.
6. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика. – М.: ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина, 2010. – 452 с.
7. Корольюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука. ГРФМЛ. 1985. – 640 с.