

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Алешкин А. П., Мысливцев Т. О., Макаров А. А. Метод компенсации неидентичности трасс распространения тестовых радиосигналов при дуплексном сличении шкал удаленных синхронизаторов ..... 3
- Арсеньев В. Н., Лабецкий П. В. Оценивание области рассеивания координат специального космического аппарата по результатам испытаний ..... 9
- Васильев П. В., Мелешко А. В., Пятков В. В. Повышение точности корректируемой инерциальной навигационной системы ..... 15
- Никифоров В. В. Протокол предотвращения взаимного блокирования задач в системах реального времени ..... 21

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Герасимов Д. Н., Никифоров В. О., Парамонов А. В., Серов Д. С. Адаптивное управление крутящим моментом в инжекторных двигателях внутреннего сгорания с переменными фазами газораспределения ..... 28
- Жаринов И. О., Жаринов О. О., Парамонов П. П., Костишин М. О., Сударчиков С. А. Принципы построения автоматических систем в канале управления тепловыми и светотехническими характеристиками бортовых средств индикации ..... 34

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Измерение слабых магнитных полей нутационным ядерно-магнитным магнитометром на текущей жидкости ..... 39

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Лаповок Е. В., Ханков С. И. Стационарный тепловой режим базируемого на поверхности Луны объекта с внутренним термостатированием ..... 46

### НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Багдасаров А. А., Багдасарова О. В., Данчина Е. В. Ручная щелевая лампа на базе микроскопа Грену для офтальмологии ..... 53
- Федоров Ю. В., Федорова А. Ю. Аккомодостимуляторы ..... 60

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Ластовская Е. А. Компьютерное моделирование цвета мяса ..... 64
- Коротаев В. В., Нгуен Х. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Метод выделения препятствия для активной стереоскопической системы безопасности автомобиля ..... 65
- Иванов С. В., Вишератин А. А., Насонов Д. А., Бухановский А. В. Метод реконструкции экстремальных природных явлений редкой повторяемости для повышения эффективности защиты Санкт-Петербурга от наводнений ..... 68

- SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) ..... 71

- УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2014 г. .... 76

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Aleshkin A. P., Mislivtsev T. O., Makarov A. A.** Compensation of Test Signals Propagation Paths Difference in Duplex Comparison of Remote Synchronizers Scales ..... 3
- Arseniev V. N., Labetsky P. V.** Estimation of Dispersion Area of the Special Space Vehicle Coordinates on the Base of Field Test Results ..... 9
- Vasiliev P. V., Meleshko A. V., Pyatkov V. V.** Accuracy Improvement of Correctable Inertial Navigation System ..... 15
- Nikiforov V. V.** Protocol for Prevention of Task Deadlocks in Real-Time Systems ..... 21

### DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Gerasimov D. N., Nikiforov V. O., Paramonov A. V., Serov D. S.** Adaptive Control of Torque in Fuel-Injection Internal Combustion Engine with Variable Valve Timing ..... 28
- Zharinov I. O., Zharinov O. O., Paramonov P. P., Kostishin M. O., Sudarchikov S. A.** Principles of Automatic System Design for Control over Thermal and Lighting Characteristics of Airborne Indication Means ..... 34

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu.** Measurement of Weak Magnetic Fields by Nutation Nuclear-Magnetic Magnetometer on Flowing Liquid ..... 39

### HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Lapovok E. V., Khankov S. I.** Stationary Thermal Regime of Moon-Based Object with Internal Thermostatic Control ..... 46

### SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Bagdasarov A. A., Bagdasarov O. V., Danchina E. V.** Hand Slit Lamp Based on Greenough Microscope for Ophthalmology ..... 53
- Fedorov Yu. V., Fedorova A. Yu.** Accommodation Stimulators ..... 60

### BRIEF NOTES

- Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Lastovskaya E. A.** Computer Simulation of Meat Color ..... 64
- Korotaev V. V., Nguen H. V., Timofeev A. N., Yaryshev S. N.** Method of Obstacle Isolation for Active Stereoscopic Car Safety System ..... 65
- Ivanov S. V., Visheratin A. A., Nasonov D. A., Boukhanovsky A. V.** Method of reconstruction of Extreme Natural Phenomena of Low Frequency for Improvement of Saint-Petersburg Flood-Prevention Facility ..... 68

- SUMMARY ..... 71

- THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2014 ..... 76

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

А. П. АЛЕШКИН, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, А. А. МАКАРОВ

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ТРАСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕСТОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ ДУПЛЕКСНОМ СЛИЧЕНИИ ШКАЛ УДАЛЕННЫХ СИНХРОНИЗАТОРОВ

Рассматривается метод сличения временных шкал удаленных синхронизаторов при использовании подвижного ретранслятора космического базирования. За основу взят дуплексный метод определения рассинхронизации разнесенных источников шкал. Основной задачей при этом оказывается парирование взаимности трасс встречного распространения тестовых сигналов. Предложен механизм парирования динамики на основе эмпирического синтеза опорной функции при полиномиальной аппроксимации разновременных измерений на совпадающие моменты времени.

*Ключевые слова:* сличение шкал, прямые и встречные измерения задержки, полиномиальная аппроксимация, эмпирическая опорная функция, погрешность сличения.

Современные подходы к совершенствованию характеристик спутниковых навигационных систем ориентированы на повышение точности и оперативности сличения шкал удаленных синхронизаторов. Рассмотрим ситуацию, когда используемые для формирования временной шкалы центральные синхронизаторы (ЦС) разнесены на существенное расстояние. Формируемая ЦС временная шкала используется для синхронизации сигналов в радиоэлектронных системах (РЭС), функционирующих в структуре отдельного измерительного пункта (ОИП). ОИП обеспечивает периодическую корректировку временной шкалы удаленного ЦС, с этой целью может быть использован дуплексный метод. В этом случае для сличения временных шкал необходимо обеспечить идентичность трасс встречного распространения тестовых радиосигналов, содержащих формируемую ЦС временную метку.

Сложности в использовании дуплексных технологий возникают, если невозможны одномоментные измерения задержки распространения радиосигнала, например, вследствие непрерывного изменения состояния динамической системы. Подобные изменения происходят, если трасса распространения тестовых сигналов проходит по спутниковым радиоканалам.

Даже если бортовая аппаратура позволяет одновременно ретранслировать сигналы, распространяющиеся во встречных направлениях, за счет собственного движения носителя ретранслятора трассы теряют идентичность.

Еще более сложным оказывается решение задачи сличения шкал, когда бортовая аппаратура одноканальная и, следовательно, способна ретранслировать в реальном временном масштабе сигнал только одной РЭС, синхронизируемой ЦС. Тогда требуется

проведение измерений последовательно во времени: при распространении сигнала сначала в одном направлении, а затем по встречной траектории. Единственным способом сличения временных шкал в подобной ситуации оказывается сведение разномоментных измерений к совпадающим отсчетам времени. Иными словами, необходимо выполнить экстраполяцию (прогнозирование) проведенных в разнесенные временные интервалы измерений задержки распространения сигналов по встречным траекториям на совпадающие интервалы [1].

В случае пропуска реальных измерений задержки — нарушения непрерывности функции измеряемого параметра — требуется ее точное математическое описание с целью восстановления неких „виртуальных“ аналогов пропущенных измерений [1, 2]. Если эту задачу решить, то данные проведенных в несовпадающие временные интервалы измерений могут быть пересчитаны к одним и тем же моментам времени.

Таким образом, при сличении шкал в динамической системе требуется парировать неидентичность трассы распространения сигналов во встречных направлениях, вызванную, прежде всего, орбитальным движением носителя ретранслирующей аппаратуры.

Компенсировать динамику изменения измеряемого параметра возможно, используя прецизионное описание модели орбитального движения КА-ретранслятора (например, эфемеридное обеспечение) либо синтезируя некий математический аналог, имеющий единую природу с оцениваемой функцией [3].

В настоящее время самая высокая точность описания модели движения КА в реальном масштабе времени соответствует навигационным КА (НКА) отечественной системы ГЛОНАСС.

Возможны различные варианты парирования динамики при сличении шкал времени с использованием измерений, выполненных в несовпадающие временные интервалы. Один из них заключается в построении аппроксимирующей опорной функции измеряемого параметра.

Для удобства описания способа примем следующие допущения. При измерении временной задержки не возникают какие-либо инструментальные и методические погрешности. Удаленные ЦС1 (для первого ОИП) и ЦС2 (для второго ОИП) формируют шкалу времени для условных РЭС1 и РЭС2 с нулевым расхождением. Бортовая аппаратура ретрансляции не вносит дополнительных погрешностей.

Поскольку одновременные измерения невозможны, функция измерений состоит из двух отрезков. Первый соответствует времени распространения сигнала в прямом направлении (РЭС1—НКА—РЭС2), затем следует разрыв, обусловленный перестройкой бортовой аппаратуры ретрансляции на встречные измерения, второй отрезок соответствует времени измерений по встречной трассе РЭС2—НКА—РЭС1.

Поскольку физически суммарная задержка зависит от одних и тех же источников излучений (РЭС1, РЭС2) и общего ретранслятора (НКА), то при отсутствии рассогласования шкал и промежутка времени, необходимого для перестройки бортовой аппаратуры, она будет представлять собой непрерывную гладкую дифференцируемую функцию.

Если бы прямые и встречные измерения выполнялись одновременно, то в отсутствие динамики НКА и сдвига шкал были бы получены совпадающие кривые суммарной задержки для прямой и встречной трасс.

Допустим наличие рассогласования шкал, по которым выполняется засечка времени распространения сигналов во встречных направлениях.

При появлении рассогласования шкал получим постоянный сдвиг одной кривой суммарной задержки (для прямой трассы) относительно другой (для встречной). Построение разностной функции дает зависимость, близкую к прямой и позволяет рассчитать разность, соответствующую уходу шкалы одного синхронизатора относительно другого (в рассматриваемом случае шкалы ЦС2 относительно шкалы ЦС1). В отсутствие

возможности проводить одновременные прямые и встречные измерения нельзя сформировать указанную разностную функцию, решить эту задачу можно, используя прогнозные значения искомым параметров.

С этой целью выполняются виртуальные измерения для прямой и встречной трасс. Решив эту задачу, возможно получить разностную функцию.

Для виртуальных измерений, наилучшим образом, в некотором смысле, экстраполирующих закон изменения реальной функции измерений, используют алгоритмы, основанные на полиномиальной аппроксимации.

Очевидно, что чем менее динамичен воспроизводимый процесс, тем более простой полином требуется для его описания и тем меньшей будет ошибка воспроизведения оцениваемой величины.

В отсутствие рассогласования шкал удаленных синхронизаторов корректное прогнозирование функции измерения суммарной задержки для прямых измерений позволит получить значения, соответствующие реальным встречным измерениям.

Тем не менее, выбор полиномиальной модели, адекватно и с требуемой точностью описывающей функцию измерений, оказывается непростым. При несовпадении шкал временной сдвиг может быть представлен постоянной зависимостью, а его парирование — адаптивным смещением отсчетов одного измерительного отрезка относительно измерений, выполненных на другом отрезке, до восстановления неискаженной функции суммарной задержки.

Для решения поставленной задачи может быть использован традиционный метод формирования наименьшей суммы квадратов невязок отклонений реальных измерений от аппроксимирующего опорного полинома. Выбрать полином можно с помощью оптимизационных процедур прямого эмпирического поиска временного сдвига, например, алгоритмов золотого сечения или деформируемого многогранника.

Для формирования отклонений выполненных измерений от одномоментных значений опорного полинома следует аппроксимировать разностную функцию, описываемую полиномом нулевого порядка. Тогда в отсутствие рассогласования шкал времени получим совпадающие линии для спрогнозированных отклонений прямых и встречных измерений от результатов расчета. Если шкалы удаленных ЦС рассинхронизированы, отклонения не совпадут, и соответствующие им прямые будут расположены одна под другой. Разностная функция, сформированная по этим прямым, характеризует удвоенное значение несовпадения шкал удаленных синхронизаторов.

Этот способ обеспечивает парирование динамики в случае несовпадения трасс распространения прямых и встречных сигналов при реализации дуплексного метода сличения шкал с использованием НКА.

Представим математическое описание приведенных рассуждений. Итак, при выполнении сличения используются измерения в прямом и обратном направлении (прямые и обратные измерения) задержек времени распространения сигналов.

Результаты прямых измерений представляют собой вектор задержек суммарного времени распространения сигналов от РЭС1 до навигационного КА и от него — до РЭС2:

$$\tau_{1\Sigma} = [\tau_{1\Sigma 1} \quad \tau_{1\Sigma N}]^T.$$

Здесь  $N$  — количество выполненных прямых измерений. Встречные измерения могут быть описаны вектором

$$\tau_{2\Sigma} = [\tau_{2\Sigma 1} \quad \tau_{2\Sigma M}]^T.$$

Здесь  $M$  — число измерений задержки, выполненных при распространении сигнала в обратном направлении.

Поскольку результаты измерений несвободны от погрешностей (случайных и систематических), от истинных значений векторов  $\tau_{1\Sigma}$ ,  $\tau_{2\Sigma}$  перейдем к их зашумленным аналогам  $\tilde{\tau}_{1\Sigma}$  и  $\tilde{\tau}_{2\Sigma}$ .

Для фильтрации шумовой составляющей погрешностей может использоваться алгоритм статистического усреднения на основе полиномиальной аппроксимации, с помощью которого возможна экстраполяция сглаживаемого процесса на заданный момент времени.

Использование полиномиальной аппроксимации обеспечивает парирование неидентичности трасс, вызванной неодновременным встречным распространением сигналов. Итак, в процессе полиномиального усреднения формируют вектор оценок измерений  $\hat{\tau}_{1\Sigma}$  и  $\hat{\tau}_{2\Sigma}$ .

Рассмотрим особенности полиномиальной аппроксимации функции измеряемого параметра по данным наблюдений на некотором осредненном временном интервале  $\bar{T}$ . Поскольку при этом задается закон изменения сглаживаемого параметра, становится возможна и его экстраполяция.

Измеряемый параметр  $\tau_i = \tau(t_i)$  на интервале  $\bar{T}$  представляется в виде полиномиальной временной функции, степень которой зависит от модели изменения оцениваемого параметра — суммарной временной задержки [4, 5]:

$$\tilde{\tau}_i = \tau_i + \delta\tau_i = \sum_{j=0}^m \alpha_j \frac{s_i^j}{j!} + \delta\tau_i,$$

где  $\tau_i$  — случайная погрешность измерений;  $s_i = t_i - t_H$ ,  $i$  — момент времени,  $s$  — относительное время, отсчитываемое от начала интервала усреднения  $t_H$ ,  $s = t - t_H$ ;  $\alpha_j$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома.

В общем случае временной полином может иметь следующий вид:

$$\tau(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_H) + \alpha_2 \frac{(t - t_H)^2}{2!} + \alpha_3 \frac{(t - t_H)^3}{3!} + \dots + \alpha_m \frac{(t - t_H)^m}{m!} = \sum_{j=0}^m \alpha_j \frac{s^j}{j!}.$$

При постоянном шаге измерений  $T = t_i - t_{i-1}$ ,  $t_i = t_H + (i-1)T$ , откуда  $s_i = (i-1)T$ .

Тогда выборка из  $N$  отсчетов  $\tilde{\tau}_i$  может быть представлена в компактной векторно-матричной форме

$$\tilde{\tau} = \mathbf{A}\alpha + \delta\tau,$$

где  $\tilde{\tau}$  — вектор-столбец измерительных отсчетов,  $\tilde{\tau} = [\tilde{\tau}_1 \quad \tilde{\tau}_2 \quad \dots \quad \tilde{\tau}_N]^T$ ; матрица  $\mathbf{A}$  связывает текущие значения параметра  $\tau_i$  с коэффициентами временного полинома  $\alpha = [\alpha_0 \quad \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_m]^T$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & s_1 & s_1^2/2! & \dots & s_1^m/m! \\ 1 & s_2 & s_2^2/2! & \dots & s_2^m/m! \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & s_N & s_N^2/2! & \dots & s_N^m/m! \end{bmatrix}^{N \times m},$$

$\delta\tau$  — вектор-столбец погрешностей измерений,  $\delta\tau = [\delta\tau_1 \quad \delta\tau_2 \quad \dots \quad \delta\tau_N]^T$ .

Задача обработки массива измерений состоит в определении значения  $\mathbf{a}$ , обеспечивающего наилучшее в некотором смысле приближение вектора измеренных значений полиномиальной функцией.

Для максимально правдоподобной оценки  $\mathbf{a}$  несложно получить следующее матричное соотношение:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{K}_{\delta\tau}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_{\delta\tau}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}},$$

где  $\mathbf{K}_{\delta\tau}$  — корреляционная матрица погрешностей измерений. Для однородных некоррелированных равнооточных измерений  $\mathbf{K}_{\delta\tau} = \sigma^2 \mathbf{I}$ , где  $\sigma$  — среднеквадратическая ошибка,  $\mathbf{I}$  — единичная матрица [4, 5].

Уравнение для оценок вектора коэффициентов временного полинома в этом случае может быть записано следующим образом:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}.$$

Ковариационная матрица ошибок оценивания представленного вектора коэффициентов аппроксимирующего полинома описывается соотношением:

$$\mathbf{K}_a = \sigma^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}.$$

Для экстраполяции оцениваемого параметра на некоторый удаленный момент времени достаточно соответствующим образом сформировать матрицу прогнозирования  $\mathbf{A}_\Pi$ .

В общем случае получим вектор спрогнозированных оценок на интересующий интервал времени  $\hat{\boldsymbol{\tau}}_\Pi = \mathbf{A}_\Pi \hat{\mathbf{a}}$ .

Таким образом, если модель изменения функции задержки сигнала представить в виде временного полинома  $\boldsymbol{\tau}_\Sigma = \mathbf{A} \mathbf{a}$  для однородных некоррелированных равнооточных измерений, то вектор оцениваемых параметров будет описываться выражением  $\hat{\boldsymbol{\tau}}_\Sigma = \mathbf{A} \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_\Sigma$ .

Ковариационная матрица ошибок представленного вектора оценок временной задержки описывается следующим соотношением:

$$\mathbf{K}_\tau = \mathbf{A} \mathbf{K}_a \mathbf{A}^T = \sigma^2 \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T,$$

тогда для прямых измерений вектор оценок задержки примет вид:

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma} = \mathbf{A}_1 (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma},$$

а для встречных

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma} = \mathbf{A}_2 (\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma}.$$

Для сличения временных шкал необходимо обеспечить приведение полученных оценок к совпадающим моментам времени. При этом представляется эффективным использовать отклонения измерений от некоторого опорного полинома, формируемого путем обобщенной полиномиальной аппроксимации как прямых, так и обратных измеряемых задержек. В этом случае для аппроксимации сформированных отклонений достаточно использования полинома первого, а иногда и нулевого, порядка.

Для реализации указанной процедуры на объединенном измерительном интервале формируется вектор  $\tilde{\boldsymbol{\tau}}_\Sigma^\delta$ , состоящий из прямых и встречных измерений. В соответствии с методикой полиномиальной аппроксимации этому вектору ставится в соответствие экстраполирующий полином, коэффициенты которого рассчитываются по формуле

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_\Sigma^\delta.$$

Значения полинома описываются следующим соотношением:

$$\boldsymbol{\tau}_{\Sigma} = \mathbf{A} \hat{\boldsymbol{a}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\Sigma}^{\delta}.$$

Далее формируются разностные значения исходных измерений задержек относительно полученного аппроксимирующего полинома

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma} = \boldsymbol{\tau}_{\Sigma} - \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma}, \quad \Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma} = \boldsymbol{\tau}_{\Sigma} - \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma}.$$

После того как получено начальное выражение для полинома, с помощью оптимизирующей процедуры итерационным путем выбирается его улучшенная форма. При этом в качестве критерия оптимизации используется целевая функция в виде суммы квадратов отклонений  $\Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma}$  и  $\Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma}$  от аппроксимирующего полинома, а изменяемым параметром служит постоянная подставка временной задержки  $\delta t$  для вектора, например, встречных измерений  $\Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma}$ , аддитивно вносимая на каждом шаге итерации.

Далее формируются массивы разностей векторов реальных измерений и оптимального в описанном смысле опорного аппроксимирующего полинома для соответствующих РЭС:

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma} = \boldsymbol{\tau}_{\Sigma} - \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma}, \quad \Delta \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma} = \boldsymbol{\tau}_{\Sigma} - \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma}.$$

Затем выполняем статистическое сглаживание разностных данных с использованием процедур полиномиальной аппроксимации. Поскольку в разностях динамика изменения функции временной задержки практически скомпенсирована, линейного полинома, как показало моделирование, достаточно для подавления случайной погрешности измерений и для экстраполяции функции изменения временной задержки на заданные моменты времени.

Тогда аналитическое представление разностной функции временной задержки реализуется в соответствии с соотношениями:

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma} = \mathbf{A}_1 (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{1\Sigma} = \mathbf{A}_1 \hat{\boldsymbol{a}}_1,$$

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma} = \mathbf{A}_2 (\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{2\Sigma} = \mathbf{A}_2 \hat{\boldsymbol{a}}_2,$$

а их приведение к совпадающим моментам времени — при использовании выражений:

$$\Delta \hat{\boldsymbol{\tau}}_{1п\Sigma} = \mathbf{A}_{1п} \hat{\boldsymbol{a}}_1, \quad \Delta \hat{\boldsymbol{\tau}}_{2п\Sigma} = \mathbf{A}_{2п} \hat{\boldsymbol{a}}_2.$$

Теперь формируем вектор разности

$$\Delta \hat{\boldsymbol{\tau}} = \Delta \hat{\boldsymbol{\tau}}_{1п\Sigma} - \Delta \hat{\boldsymbol{\tau}}_{2п\Sigma},$$

при использовании которого определяется вектор расхождения шкал времени

$$\hat{\boldsymbol{\delta}}t = \Delta \hat{\boldsymbol{\tau}} / 2.$$

Полученный вектор значений характеризует уход шкалы времени одного синхронизатора относительно другого.

Описанная процедура апробирована при статистическом моделировании по методу Монте-Карло, подтвердившем возможность ее эффективной реализации для обработки экспериментальных данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешкин А. П. и др. Инфраструктура малых космических аппаратов / Под ред. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2011. 432 с.

2. Алешкин А. П., Гусаков В. М., Мысливцев Т. О. Моделирование измерений навигационных параметров в коротковолновых радиолокационных системах пространственной волны // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 9. С. 54—62.
3. Алешкин А. П., Шпаков А. П. Метод юстировки наземных радиолокационных систем по низкоорбитальным малым КА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. 2010. Вып. 2. С. 54—59.
4. Агаджанов П. А., Барабанов Н. М., Буренин Н. И. и др. Космические траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
5. Губин В. А., Клюев Н. Ф. и др. Основы радионавигационных измерений. М.: МО СССР, 1987. 373 с.

#### Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru
- Тимофей Олегович Мысливцев** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; начальник кафедры; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru
- Андрей Александрович Макаров** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; начальник кафедры; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru

Рекомендована  
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
11.03.14 г.

УДК 519.2

В. Н. АРСЕНЬЕВ, П. В. ЛАБЕЦКИЙ

## ОЦЕНИВАНИЕ ОБЛАСТИ РАССЕЙВАНИЯ КООРДИНАТ СПЕЦИАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается задача оценивания радиуса сферы, ограничивающей область расположения специального космического аппарата относительно исследуемого космического объекта после завершения маневра сближения. Для повышения качества оценивания использован метод приоритета опытной информации, позволяющий при ограниченном числе натурных испытаний учитывать априорную информацию.

**Ключевые слова:** космический мусор, специальный космический аппарат, ограниченное число натурных испытаний.

**Введение.** В настоящее время в околоземном космическом пространстве скопилось большое количество космического мусора. Для проведения технического обслуживания (выяснения состояния, назначения, потенциальной опасности и т.д.) того или иного космического объекта используются специальные космические аппараты (СКА) [1]. Получить необходимую информацию об исследуемом объекте (ИО) можно, если расстояние от СКА до ИО не превышает некоторой величины. Это означает, что область, в пределах которой должен находиться СКА после завершения маневра сближения, ограничивается сферой с заданным радиусом.

Расстояние между СКА и ИО зависит от точности функционирования системы управления движением аппарата. Вероятностные характеристики (прежде всего, математическое ожидание и дисперсия) расстояния между аппаратом и объектом определяют область, в которой будет находиться СКА в конце траектории сближения. Эта область может выходить за

пределы заданной сферы. Для определения ее фактических размеров проводятся натурные испытания опытных образцов СКА. В силу ряда причин число испытаний ограничено, а точность оценок на их основе низка. Повысить точность оценок можно, используя дополнительную априорную информацию, полученную на этапах исследования, предшествующих натурным испытаниям.

В настоящее время существуют методы, позволяющие производить совместную обработку априорной и опытной информации [2—8]. Большинство из них требует большого объема однородной информации об оцениваемых характеристиках. Поэтому при ограниченном числе натурных испытаний для повышения качества оценивания целесообразно использовать метод приоритета опытной информации (ПОИ) [9], согласно которому результаты априорных исследований не должны противоречить результатам натурных испытаний; вес априорной информации в апостериорной оценке не может превышать веса опытных данных.

**Постановка задачи.** Полагается, что по окончании сближения положение СКА относительно исследуемого объекта в трехмерном пространстве характеризуется вектором отклонений фазовых координат центра масс аппарата от соответствующих координат ИО. Распределение вектора отклонений является сферическим — трехмерным нормальным с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями компонентов.

Известно [10], что в этом случае расстояние  $\hat{X}$  („ $\wedge$ “ означает случайную физическую величину) от СКА до ИО (модуль вектора отклонений) распределено по закону Максвелла, функция плотности распределения которого имеет вид

$$\varphi_{\hat{X}}(X; \mu) = \left(2/\pi\mu^3\right)^{1/2} X^2 \exp\{-X^2/2\mu\}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — параметр распределения.

Величина  $\sigma = \sqrt{\mu}$  называется радиальным среднеквадратическим отклонением исходного трехмерного нормального распределения.

Математическое ожидание  $M_{\hat{X}}$  и дисперсия  $D_{\hat{X}}$  модуля  $\hat{X}$  вектора отклонений, определяющие область расположения СКА относительно ИО по окончании маневра сближения, связаны с параметром  $\mu$  выражениями [10]:

$$M_{\hat{X}} = 2\sqrt{2\mu/\pi}; \quad D_{\hat{X}} = (3\pi - 8)\mu/\pi \quad (2)$$

или

$$\mu = \pi M_{\hat{X}}^2 / 8 = \pi D_{\hat{X}} / (3\pi - 8) = \left(M_{\hat{X}}^2 + D_{\hat{X}}\right) / 3. \quad (3)$$

В одних и тех же условиях проведены натурные испытания  $N_0$  опытных образцов СКА, в результате которых получены значения  $X_i$  ( $i = \overline{1, N_0}$ ) модуля вектора отклонений координат СКА от соответствующих координат ИО в конечной точке траектории сближения. В ходе предварительных исследований расчетным путем получена априорная оценка  $M_p$  математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  величины  $\hat{X}$ .

Необходимо по имеющимся априорным и опытным данным получить апостериорные оценки параметров  $\mu$ ,  $M_{\hat{X}}$  и  $D_{\hat{X}}$  расстояния между СКА и ИО после окончания маневра сближения.

**Получение апостериорной оценки параметра  $\mu$ .** В соответствии с методом приоритета опытной информации [9] сначала определяется оценка максимального правдоподобия  $\mu_0$  параметра  $\mu$  распределения (1).

Для этого по выборке  $X_i (i = \overline{1, N_0})$  составляется функция правдоподобия

$$\prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) = \left( \frac{2}{\pi \mu^3} \right)^{N_0/2} \prod_{i=1}^{N_0} X_i^2 \exp \left\{ -\frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^{N_0} X_i^2 \right\}. \quad (4)$$

Поскольку функция плотности распределения (1) удовлетворяет условиям регулярности, оценка максимального правдоподобия является решением уравнения правдоподобия

$$\left. \frac{\partial \ln \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu)}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_0} = 0 \quad \text{или} \quad -\frac{3N_0}{2\mu_0} + \frac{1}{2\mu_0^2} \sum_{i=1}^{N_0} X_i^2 = 0,$$

отсюда

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^{N_0} X_i^2 / 3N_0 = G_0/3, \quad (5)$$

где  $G_0 = \sum_{i=1}^{N_0} X_i^2 / N_0$  — опытная оценка второго начального момента расстояния  $\hat{X}$ .

Максимальное правдоподобие математического ожидания и дисперсии случайной величины  $\hat{X}$  оценивается путем подстановки (5) в (2):

$$M_0 = 2\sqrt{2\mu_0/\pi}; \quad D_0 = (3\pi - 8)\mu_0/\pi. \quad (6)$$

С учетом (5) функцию правдоподобия (4) можно представить в виде

$$\prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) = \left( 2/\pi \mu^3 \right)^{N_0/2} \prod_{i=1}^{N_0} X_i^2 \exp \{ -3N_0 \mu_0 / 2\mu \}. \quad (7)$$

Тогда отношение правдоподобия [9] для проверки гипотезы об однородности опытной и априорной информации  $H: \mu = \mu_p$

$$v^* = \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu_p) / \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu_0) = (\mu_0/\mu_p)^{3N_0/2} \exp \{ -3N_0 (\mu_0/\mu_p - 1) / 2 \}, \quad (8)$$

где, согласно (3),  $\mu_p = \pi M_p^2 / 8$  — априорная оценка параметра  $\mu$ .

Число гипотетических испытаний, определяющее вес априорной информации в апостериорных оценках,  $N_p = v^* N_0$ .

Рассматривается гипотетическая выборка  $X_{gi} (i = \overline{1, N_p})$  [9]. Для нее формируются априорная функция правдоподобия

$$\prod_{i=1}^{N_p} \varphi_{\hat{X}}(X_{gi}; \mu) = \left( 2/\pi \mu^3 \right)^{N_p/2} \prod_{i=1}^{N_p} X_{gi}^2 \exp \{ -3N_p \mu_p / 2\mu \}$$

и общая функция правдоподобия

$$L = \prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) \prod_{i=1}^{N_p} \varphi_{\hat{X}}(X_{ri}; \mu) = \left( \frac{2}{\pi \mu^3} \right)^{(N_o + N_p)/2} \prod_{i=1}^{N_o} X_i^2 \prod_{i=1}^{N_p} X_{ri}^2 \exp \left\{ -\frac{3N_o \mu_o}{2\mu} - \frac{3N_p \mu_p}{2\mu} \right\}.$$

Апостериорная оценка  $\mu_a$  параметра  $\mu$ , учитывающая априорную информацию и результаты натуральных испытаний, определяется из необходимого условия  $\partial L / \partial \mu \Big|_{\mu=\mu_a} = 0$  максимума функции  $L$ :

$$\mu_a = (N_o \mu_o + N_p \mu_p) / (N_o + N_p) = (\mu_o + v^* \mu_p) / (1 + v^*). \quad (9)$$

На ее основе получаются апостериорные оценки математического ожидания и дисперсии расстояния между СКА и ИО в конечной точке траектории сближения:

$$M_a = 2\sqrt{2\mu_a/\pi}; \quad D_a = (3\pi - 8)\mu_a/\pi, \quad (10)$$

а также вероятностные моменты более высокого порядка.

Для определения выигрыша в точности, получаемого благодаря учету априорной информации, необходимо сравнить дисперсии опытной  $\mu_o$  и апостериорной  $\mu_a$  оценок.

Дисперсия оценки максимального правдоподобия (5):

$$D[\mu_o] = \frac{1}{9N_o^2} \sum_{i=1}^{N_o} D[X_i^2] = \frac{D[\hat{X}^2]}{9N_o} = \frac{M[(\hat{X}^2 - M[\hat{X}^2])^2]}{9N_o} = \frac{M[\hat{X}^4] - (M[\hat{X}^2])^2}{9N_o}.$$

Поскольку, согласно (3),  $M[\hat{X}^2] = M_{\hat{X}}^2 + D_{\hat{X}} = 3\mu$ , а  $M[\hat{X}^4] = \int_0^{\infty} X^4 \varphi_{\hat{X}}(X; \mu) dX = 15\mu^2$ ,

то  $D[\mu_o] = (15\mu^2 - 9\mu^2) / 9N_o = 2\mu^2 / 3N_o \approx 2\mu_o^2 / 3N_o$ .

Дисперсия апостериорной оценки (9) будет следующей:

$$D[\mu_a] = (N_o^2 D[\mu_o] + N_p^2 D[\mu_p]) / (N_o + N_p)^2 \approx 2(N_o \mu_o^2 + N_p \mu_p^2) / 3(N_o + N_p)^2.$$

Выигрыш в точности оценивания, получаемый за счет использования априорной информации, определяется по формуле

$$\delta = \frac{D[\mu_o]}{D[\mu_a]} \approx \frac{\mu_o^2 (N_o + N_p)^2}{N_o (N_o \mu_o^2 + N_p \mu_p^2)} = \frac{\mu_o^2 (1 + v^*)^2}{\mu_o^2 + v^* \mu_p^2}. \quad (11)$$

Очевидно, что  $\delta > 1$ , если дисперсия апостериорной оценки меньше дисперсии оценки, полученной только по результатам натуральных испытаний. Из (11) видно, что это условие будет выполняться при

$$v^* > \mu_p^2 / \mu_o^2 - 2. \quad (12)$$

Правая часть неравенства (12) определяет критическое значение отношения правдоподобия  $v_{кр} = \mu_p^2 / \mu_o^2 - 2$ .

Если величина отношения правдоподобия, вычисленная по формуле (8), удовлетворяет неравенству  $v^* > v_{кр}$ , то апостериорные оценки (9), (10) точнее соответствующих опытных оценок (5), (6), причем выигрыш в точности тем больше, чем больше  $v^*$ . Максимальный выигрыш в точности  $\delta = 2$  достигается при  $v^* = 1$ , что, как видно из (8), соответствует полному совпадению априорных и опытных данных. Если априорная и опытная информация однородна, т.е. справедлива гипотеза  $H: \mu_o = \mu_p$ , то выигрыш в точности оценивания может быть

получен по приближенной формуле  $\delta \approx 1 + v^*$ . Следует также отметить, что даже при выполнении условия (12) выигрыш в точности может оказаться небольшим, если значение  $v^*$  мало (например, при  $\mu_p \ll \mu_0$ ). В таких случаях априорная оценка является достаточно грубой.

**Пример.** Рассматривается задача выведения СКА в заданную область космического пространства, ограниченную сферой с радиусом  $R_d = 10$  км. В центре сферы находится исследуемый объект. Относительное положение в трехмерной системе координат характеризуется вектором, компонентами которого являются разности соответствующих координат ИО и СКА в конечной точке траектории сближения. Полагается, что элементы вектора отклонений являются независимыми и распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией. Необходимо определить вероятность того, что расстояние от космического аппарата до исследуемого объекта не превысит  $R_d$ .

По результатам моделирования возмущенного движения СКА получена априорная оценка  $M_p = 5,3$  км математического ожидания модуля вектора отклонений, на основе которой рассчитано значение  $\mu_p = \pi M_p^2 / 8 = 11,0$  км<sup>2</sup> параметра распределения (1).

Проведены натурные испытания шести СКА ( $N_0 = 6$ ), результаты которых представлены значениями модуля  $\hat{X}$  вектора отклонений:  $X_1 = 6,4$ ;  $X_2 = 0,63$ ;  $X_3 = 8,31$ ;  $X_4 = 8,38$ ;  $X_5 = 5,74$ ;  $X_6 = 10,50$  км. По этим данным получена оценка максимального правдоподобия  $\mu_0 = 18,0$  км<sup>2</sup> параметра  $\mu$ . Область, в пределах которой будет находиться СКА после окончания маневра сближения, характеризуется оценками максимального правдоподобия математического ожидания и дисперсии модуля вектора отклонений:  $M_0 = 6,8$  км и  $D_0 = 8,2$  км<sup>2</sup>.

Отношение правдоподобия для проверки гипотезы  $H: \mu_0 = \mu_p$  определяется по формуле (8):  $v^* = 0,2791$ . Соответствующее число гипотетических испытаний  $N_p = 1,6748$ .

Апостериорная оценка параметра  $\mu$  получается по формуле (9):  $\mu_a = 16,5$  км<sup>2</sup>. Из (11) следует, что дисперсия этой оценки примерно в 1,48 раза меньше дисперсии оценки  $\mu_0$ , полученной по результатам натурных испытаний без учета априорной информации. Апостериорные оценки  $M_{\hat{X}}$  и  $D_{\hat{X}}$ , характеризующие область расположения СКА относительно ИО,  $M_a = 6,5$  км,  $D_a = 7,5$  км<sup>2</sup>.

Вероятность того, что расстояние от космического аппарата до исследуемого объекта не превысит 10 км, можно рассчитать по формуле

$$P = \int_0^{R_d} \varphi_{\hat{X}}(X; \mu) dX = \left( \frac{2}{\pi \mu^3} \right)^{1/2} \int_0^{R_d} X^2 \exp \left\{ -\frac{X^2}{2\mu} \right\} dX = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{R_d/2\mu} y^{1/2} \exp \{-y\} dy,$$

подстановка в нее вместо параметра  $\mu$  апостериорной оценки дает оценку вероятности, учитывающую всю имеющуюся априорную и опытную информацию:  $P_a = 0,89$ . Оценки вероятности  $P$ , полученные только по априорной информации или только по результатам натурных испытаний, равны 0,97 и 0,86 соответственно. Отсюда видно, что априорная оценка вероятности является существенно завышенной.

**Заключение.** При ограниченном числе натурных испытаний использование дополнительной информации позволяет повысить точность оценивания области расположения СКА относительно исследуемого объекта. Точность апостериорных оценок, по сравнению с опытными

оценками, тем выше, чем ближе априорные данные к опытным. Мерой, определяющей вес априорной информации в апостериорной оценке, является отношение правдоподобия для проверки гипотезы об однородности априорных и опытных данных. Максимальный выигрыш в точности оценивания достигается при  $v^* = 1$ . Малые значения отношения правдоподобия говорят о грубости моделей, используемых на предварительных этапах исследования системы управления движением СКА. В этих случаях априорная информация слабо влияет на качество оценивания, а апостериорные оценки практически совпадают с опытными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заворуев Г. В.* Выбор закона управления для синтеза метода наведения на космические объекты при проведении их инспекции // Наука и образование. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011 [Электронный ресурс]: <<http://www.mai.ru/science/trudy>>.
2. *Пугачев В. Н.* Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. М.: Сов. радио, 1973. 256 с.
3. *Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г.* Испытания сложных систем. М.: Высшая школа, 1974. 184 с.
4. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Под ред. *Р. М. Юсупова*. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
5. *Кринецкий Е. И.* и др. Летные испытания ракет и космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 464 с.
6. *Щербаков П. С.* Использование априорной информации для уточнения оценок параметров // Изв. АН СССР. Автоматика и телемеханика. 1988. № 5. С. 80—89.
7. *Моррис У.* Наука об управлении. Байесовский подход. М.: Мир, 1971. 304 с.
8. *Арсеньев В. Н.* Метод апостериорного оценивания показателей качества системы при ограниченном объеме информации // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1991. № 11. С. 16—22.
9. *Арсеньев В. Н.* Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натуральных испытаний. М.: Рестарт, 2013. 126 с.
10. *Абезгауз Г. Г.* и др. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970. 536 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Николаевич Арсеньев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: [vladar56@mail.ru](mailto:vladar56@mail.ru)
- Павел Владимирович Лабетский** — аспирант; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; E-mail: [p.v.labetskiy@gmail.com](mailto:p.v.labetskiy@gmail.com)

Рекомендована кафедрой  
бортовых информационных  
и измерительных комплексов

Поступила в редакцию  
30.12.13 г.

П. В. ВАСИЛЬЕВ, А. В. МЕЛЕШКО, В. В. ПЯТКОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОРРЕКТИРУЕМОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Предложена модель динамики расширенного вектора состояния комплексной системы в составе бесплатформенной инерциальной навигационной и неавтономной радионавигационной систем. Представлен алгоритм оценивания непосредственно не наблюдаемых погрешностей акселерометров и гироскопов с целью коррекции их показаний в процессе дальнейшей автономной работы инерциальной навигационной системы.

**Ключевые слова:** инерциальная навигация, акселерометр, гироскоп, уравнение ошибок, коррекция, комплексная система.

Одним из основных источников информации для систем управления летательных аппаратов (ЛА) ограниченного радиуса действия являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), применяемые в ракетно-космической технике [1]. К точности выведения таких ЛА с бортовой телевизионной или радиотехнической системой в заданную область инерциального пространства предъявляются повышенные требования. Вследствие ограничений, накладываемых на систему захвата следящих телевизионных и радиотехнических систем.

Для повышения точности определения местоположения ЛА показания БИНС корректируют по данным внешней неавтономной радионавигационной системы (НРНС) [1, 2].

Настоящая работа посвящена разработке алгоритма, обеспечивающего коррекцию выходных показаний БИНС летательного аппарата ограниченного радиуса действия, а также погрешностей первичных измерителей БИНС (акселерометров и гироскопов). Алгоритм разрабатывается на основе рассматриваемых моделей показаний БИНС и НРНС.

**Модель динамики ЛА в инерциальной системе координат на основе БИНС.** Известно, что задачу навигации летательных аппаратов ограниченного радиуса действия удобно решать в стартовой системе координат, неподвижной относительно земной поверхности [1]. Начало этой системы фиксируется относительно центра Земли в момент начала работы БИНС, а положение ЛА определяется проекциями  $x_n, y_n, z_n$  вектора, проведенного из начала координат до ЛА.

Работа бесплатформенной инерциальной навигационной системы летательного аппарата основана на решении уравнения инерциальной навигации [2, 3]:

$$\ddot{\mathbf{x}}_n = (\ddot{x}_n, \ddot{y}_n, \ddot{z}_n)^T = \mathbf{D}^T \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{g}, \quad (1)$$

где  $\ddot{\mathbf{x}}_1$  — вектор кажущихся ускорений в связанной с центром масс ЛА системе координат  $CX_1Y_1Z_1$ ;  $\mathbf{D}^T \ddot{\mathbf{x}}_1 = \ddot{\mathbf{x}}_n$  — вектор кажущихся ускорений в инерциальной системе координат (ИСК)  $O_nX_nY_nZ_n$  с началом на поверхности Земли;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}$$

— матрица ориентации связанной системы координат  $CX_1Y_1Z_1$  относительно  $O_nX_nY_nZ_n$ ;  $\mathbf{g}$  — вектор гравитационного ускорения;  $T$  — символ транспонирования;  $\vartheta, \psi, \gamma$  — углы рыскания, тангажа и крена ЛА соответственно.

Уравнение (1) решается посредством двукратного численного интегрирования. Таким образом, для каждого момента времени получается вектор состояния ЛА  $\mathbf{y}_n = (\mathbf{x}_n^T, \mathbf{V}_n^T)^T = (x_n(n), y_n(n), z_n(n), V_{nx}(n), V_{ny}(n), V_{nz}(n))^T$ , компоненты которого состоят из проекций положения ЛА и его вектора скорости на оси ИСК.

**Модель инструментальных погрешностей БИНС.** Практически все возмущающие факторы, вызывающие медленно меняющиеся ошибки (ММО) первичных измерителей, приводят к смещению „нулей“  $\Delta\ddot{x}_{10}$ ,  $\Delta\ddot{y}_{10}$ ,  $\Delta\ddot{z}_{10}$  и изменению наклона статических характеристик  $K_{\ddot{x}_1}$ ,  $K_{\ddot{y}_1}$ ,  $K_{\ddot{z}_1}$  соответствующих акселерометров, а также к смещению нулей  $\Delta\psi_0$ ,  $\Delta\vartheta_0$ ,  $\Delta\gamma_0$  и возникновению скорости уходов  $\omega_\psi$ ,  $\omega_\vartheta$ ,  $\omega_\gamma$  соответствующих измерителей углового положения (гироскопов) [3, 4]. Величины  $K_a$  ( $a = \ddot{x}_1, \ddot{y}_1, \ddot{z}_1$ ) определяют появление относительных составляющих ошибок измерителей. Таким образом, модели ММО акселерометров  $\Delta a$  и гироскопов  $\Delta b$  БИНС можно описать выражениями [3, 4]:

$$\Delta a = \Delta a_0 + K_a a \quad (a = \ddot{x}_1, \ddot{y}_1, \ddot{z}_1); \quad \Delta b = \Delta b_0 + \omega_b t \quad (b = \psi, \vartheta, \gamma).$$

При этом считаются известными среднеквадратические отклонения  $\sigma_i$  ( $i = 1—12$ ) данных ошибок.

Значения медленно меняющихся ошибок измерителей БИНС (акселерометров и гироскопов) ЛА ограниченного радиуса действия на небольших интервалах времени можно считать постоянными [2, 3].

После выведения ЛА в области очень малой плотности атмосферы величины  $K_{\ddot{y}_1}$ ,  $K_{\ddot{z}_1}$ ,  $\Delta\gamma_0$ ,  $\omega_\gamma$  практически не вносят вклад в общую ошибку инерциальной навигации [3], и полностью наблюдаемый до момента отсечки двигательной установки вектор ММО имеет вид [3]:

$$\mathbf{x}_M = (\Delta\ddot{x}_{10}, \Delta\ddot{y}_{10}, \Delta\ddot{z}_{10}, K_{\ddot{x}_1}, \Delta\psi_0, \Delta\vartheta_0, \omega_\psi, \omega_\vartheta)^T, \quad (2)$$

$$M[\mathbf{x}_M] = 0; \quad \mathbf{P}_M(0) = \text{diag}\{\sigma_{Mii}^2\} \quad (i = 1—8),$$

где  $M$  — математическое ожидание,  $\mathbf{P}_M$  — ковариационная матрица ошибок.

**Алгоритм оценивания медленно меняющихся ошибок первичных измерителей БИНС.** В качестве НРНС могут использоваться спутниковые радионавигационные системы или радиолокационные системы, основанные на запросно-ответных методах, позволяющие измерить угловые координаты и расстояния от наземных РЛС до подвижного объекта и рассчитать его координаты в ИСК, а по приращению координат — составляющие скорости подвижного объекта [5].

В работе рассматриваются этап оценивания инструментальных погрешностей жестко связанной интегрированной системы и автономная работа БИНС после получения достоверных оценок  $\hat{\mathbf{x}}_M$  [6]. В жестко связанной интегрированной системе БИНС и НРНС обеспечивают состав измерений для общего вычислительного блока, в котором реализован единый фильтр Калмана. Оценивание координат ЛА в такой системе выполняется по разности в показаниях указанных навигационных систем.

Записав уравнение (1) в приращениях и линеаризовав его, получим дифференциальное уравнение ошибок инерциальной навигации в векторно-матричной форме [3]:

$$\Delta\ddot{\mathbf{x}}_n = \mathbf{D}^T \Delta\ddot{\mathbf{x}}_1 + \Delta\psi \frac{\partial \mathbf{D}^T}{\partial \psi} \ddot{\mathbf{x}}_1 + \Delta\vartheta \frac{\partial \mathbf{D}^T}{\partial \vartheta} \ddot{\mathbf{x}}_1 + \Delta\gamma \frac{\partial \mathbf{D}^T}{\partial \gamma} \ddot{\mathbf{x}}_1 + \Delta\mathbf{g}, \quad (3)$$

где  $\Delta$  — ошибки.

Метод линеаризации предполагает разложение нелинейной функции  $\Delta\ddot{\mathbf{x}}_и = \mathbf{q}(\Delta\ddot{\mathbf{x}}_1, \Delta\psi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma) = \mathbf{q}(a_1, \dots, a_m)$  в ряд Тейлора с последующим исключением остаточного члена  $\mathbf{q}_{\text{ост}} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \frac{\partial^2 \mathbf{q}}{\partial a_i \partial a_j} (\Delta a_i \Delta a_j)$  с нелинейными составляющими [1—4]. В этом случае

разложение допустимо, поскольку ввиду малости значений  $\Delta a_i$  и  $\Delta a_j$  их произведение на несколько порядков меньше каждой из этих величин. По этой же причине на практике вектором  $\Delta \mathbf{g}$  пренебрегают ввиду малости значений его компонентов в сравнении с остальными слагаемыми выражения (3).

Неавтономная радионавигационная система определяет координаты ЛА  $\tilde{\mathbf{x}}_и(n) = (\tilde{x}_и(n), \tilde{y}_и(n), \tilde{z}_и(n))^T$  и оценивает проекции его скорости  $\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_и(n) = (\tilde{\dot{x}}_и(n), \tilde{\dot{y}}_и(n), \tilde{\dot{z}}_и(n))^T$  в ИСК.

Значения ММО измерителей НРНС могут быть определены при их калибровке и в дальнейшем учтены при обработке измерений. Поэтому измерения НРНС представляются в виде [5]:

$$\mathbf{y}(n) = \tilde{\mathbf{y}}_и(n) + \mathbf{f}(n),$$

где  $\tilde{\mathbf{y}}_и = (\tilde{\mathbf{x}}_и^T, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_и^T)^T$  — (6×1)-вектор, составленный из (3×1)-вектора координат  $\tilde{\mathbf{x}}_и^T$  и (3×1)-вектора составляющих скорости  $\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_и^T$  ЛА в ИСК;  $\mathbf{f}$  — (6×1)-вектор ошибок измерения с известным законом распределения;  $\mathbf{y} = (\mathbf{x}_в^T, \dot{\mathbf{x}}_в^T)^T$  — (6×1)-вектор измерений, соответствующий вектору  $\mathbf{y}_и$ ,  $n$  — дискретное время.

Введя в рассмотрение непосредственно наблюдаемый вектор разности  $\mathbf{x}_н = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \dot{x}, \Delta \dot{y}, \Delta \dot{z})^T$  как  $\mathbf{x}_н(n) = \mathbf{y}_и(n) - \mathbf{y}(n)$ , по результатам многократных измерений обеих измерительных систем можно получить оценки  $\hat{\mathbf{x}}_н$  вектора  $\mathbf{x}_н$  и в определенные моменты времени корректировать выходные показания БИНС посредством вычитания составляющих вектора  $\hat{\mathbf{x}}_н$  из показаний  $\mathbf{y}_и(n)$  [5].

Быстро меняющиеся ошибки измерения параметров вектора  $\ddot{\mathbf{x}}_и$  достаточно хорошо сглаживаются в интеграторах навигационного контура БИНС, поэтому ошибки выходных показаний системы в основном обусловлены действием компонентов вектора ММО измерителей (2). Для повышения точности БИНС в перерывах между коррекциями ее выходных показаний следует оценивать компоненты вектора (2) с целью последующей коррекции данных первичных измерителей. Для этого введем расширенный вектор состояния динамической системы  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_н^T, \mathbf{x}_м^T)^T$ . Под системой понимается уравнение ошибок инерциальной навигации. Применяя метод пространства состояний [5], можно записать дифференциальное уравнение в виде  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}$ ,  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ , где  $\boldsymbol{\xi}$  — вектор возмущений с параметрами  $M[\boldsymbol{\xi}] = 0$ ,  $M[\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{\xi}^T] = \mathbf{Q}$ ; матрица  $\mathbf{A}$  и матрица наблюдения  $\mathbf{C}$  имеют вид:

$$\mathbf{A}(n) = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}\Delta t & 0 & 0 & 0'^T \\ 0 & 0 & \mathbf{D}^T & \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0'^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0'^T \\ 0' & 0' & 0' & 0' & 0'' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0' & 0' \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица;  $0''$  — нулевая (2×2)-матрица;  $0'$  — нулевые (2×3)-матрицы;  $0$  — нулевые (3×3)-матрицы;  $\Lambda_1, \Lambda_2$  — матрицы, полученные из выражения (1):

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}\ddot{x}_1\Delta t & \alpha_{11}\Delta t & \alpha_{12}\Delta t \\ \alpha_{12}\ddot{x}_1\Delta t & \alpha_{21}\Delta t & \alpha_{22}\Delta t \\ \alpha_{13}\ddot{x}_1\Delta t & \alpha_{31}\Delta t & \alpha_{32}\Delta t \end{bmatrix}, \quad \Lambda_2 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}n\Delta t^2 & \alpha_{12}n\Delta t^2 \\ \alpha_{21}n\Delta t^2 & \alpha_{22}n\Delta t^2 \\ \alpha_{31}n\Delta t^2 & \alpha_{32}n\Delta t^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь элементы  $\alpha_{ij}$  получены из матрицы

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^{\Psi}\ddot{x}_1 + d_{21}^{\Psi}\ddot{y}_1 + d_{31}^{\Psi}\ddot{z}_1 & d_{11}^{\Theta}\ddot{x}_1 + d_{21}^{\Theta}\ddot{y}_1 + d_{31}^{\Theta}\ddot{z}_1 & d_{21}^{\Upsilon}\ddot{y}_1 + d_{31}^{\Upsilon}\ddot{z}_1 \\ 0 & d_{12}^{\Theta}\ddot{x}_1 + d_{22}^{\Theta}\ddot{y}_1 + d_{32}^{\Theta}\ddot{z}_1 & d_{22}^{\Upsilon}\ddot{y}_1 + d_{32}^{\Upsilon}\ddot{z}_1 \\ d_{13}^{\Psi}\ddot{x}_1 + d_{23}^{\Psi}\ddot{y}_1 + d_{33}^{\Psi}\ddot{z}_1 & d_{13}^{\Theta}\ddot{x}_1 + d_{23}^{\Theta}\ddot{y}_1 + d_{33}^{\Theta}\ddot{z}_1 & d_{23}^{\Upsilon}\ddot{y}_1 + d_{33}^{\Upsilon}\ddot{z}_1 \end{bmatrix};$$

$d_{ij}^b$  — частная производная соответствующего элемента матрицы  $\mathbf{D}$  по параметру  $b$ .

Вводя уравнение наблюдения как  $\mathbf{z}(n) = \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + \mathbf{f}(n)$  и матрицу экстраполяции  $\Phi(n) = \mathbf{I}' + \mathbf{A}(n)\Delta t$  (здесь  $\mathbf{I}'$  — единичная матрица), можно использовать выражения для фильтра Калмана, с целью получения оптимальной оценки элементов расширенного вектора состояния динамической системы, в том числе и оценки  $\hat{\mathbf{x}}_n(n)$  всех медленно меняющихся ошибок бортовых измерителей БИНС [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(n) &= \Phi(n)\hat{\mathbf{x}}(n-1) + \mathbf{K}(n)\Delta\mathbf{u}(n), \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \hat{\mathbf{x}}_0, \\ \Delta\mathbf{u}(n) &= \mathbf{z}(n) - \mathbf{C}\Phi(n)\hat{\mathbf{x}}(n-1); \\ \mathbf{P}_3(n) &= \Phi(n)\mathbf{P}(n-1)\Phi^T(n) + \mathbf{Q}(n), \quad \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0; \\ \mathbf{K}(n) &= \mathbf{P}_3(n)\mathbf{C}^T [\mathbf{C}\mathbf{P}_3(n)\mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)]^{-1}; \\ \mathbf{P}(n) &= \mathbf{P}_3(n) - \mathbf{K}(n)\mathbf{C}\mathbf{P}_3(n), \end{aligned} \right\}$$

где  $\mathbf{K}(n)$  — весовая матрица;  $\Delta\mathbf{u}(n)$  — вектор невязки;  $\mathbf{P}_3(n)$ ,  $\mathbf{P}(n)$  и  $\mathbf{R}(n)$  — соответственно ковариационные матрицы ошибок экстраполяции, оценивания и измерения.

О точности оценивания медленно меняющихся ошибок измерителей БИНС можно судить по отношению следов  $\text{Sp}$  ковариационных матриц:

$$\delta(n) = \text{Sp}[\mathbf{K}_M(n)\mathbf{P}_{\text{НМЭ}}(n)] / \text{Sp}\mathbf{P}_{\text{ГМ}}(n), \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}_M$ ,  $\mathbf{P}_{\text{НМЭ}}$  и  $\mathbf{P}_{\text{ГМ}}$  — элементы блочных матриц,

$$\mathbf{K}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_H(n) \\ \mathbf{K}_M(n) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_3(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{НЭ}}(n) & \mathbf{P}_{\text{НМЭ}}(n) \\ \mathbf{P}_{\text{МНЭ}}(n) & \mathbf{P}_{\text{МЭ}}(n) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_\Gamma(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{ГН}}(n) & \mathbf{P}_{\text{ГНМ}}(n) \\ \mathbf{P}_{\text{ГМН}}(n) & \mathbf{P}_{\text{ГМ}}(n) \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\mathbf{P}_\Gamma(n) = [\mathbf{F}(n)]^{-1} = [\Phi(n)^{-1T} \mathbf{F}(n-1)\Phi(n)^{-1} + \mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{C}]^{-1}$  — определяющая границу ковариаций ошибок оценивания (нижнюю границу Крамера-Рао) матрица, рассчитываемая путем обращения информационной матрицы Фишера  $\mathbf{F}(n)$  [7].

В этом случае при выборе достаточно малой величины  $\delta_3$  критерием принятия решения по коррекции показаний первичных измерителей БИНС является условие:

$$\delta(n) \leq \delta_3. \quad (5)$$

Таким образом, до выполнения неравенства (5) по результатам совместной обработки координатной информации от БИНС и НРНС производится коррекция только показаний скоростей и координат БИНС. При выполнении (5) показания первичных измерителей БИНС корректируются в соответствии с оценкой  $\hat{\mathbf{x}}_M$ , далее БИНС может функционировать в автономном режиме, с коррекцией показаний ее первичных измерителей.

**Моделирование работы алгоритма.** Для проверки работоспособности алгоритма было проведено моделирование его работы на ЭВМ. В качестве подвижного объекта был выбран ЛА, выводимый за время  $t_B$  в заданную точку инерциального пространства.

Координаты точки выведения  $(x_B, y_B, z_B)$  ЛА в ИСК для разных значений времени полета  $t_B$  и углов курса  $\varphi$  задавались в соответствии с табл. 1. При этом наведение ЛА осуществлялось на основе расчета и компенсации значения прогнозируемого пролета [2].

Таблица 1

$t_B, c$	$\varphi, M$	$x_B, KM$	$y_B, KM$	$z_B, M$
300	0	790	286	0
	30	684	286	395
	50	508	286	605
400	0	1076	356	0
	30	932	356	538
	50	692	356	824
500	0	1360	408	0
	30	1178	408	680
	50	874	408	1042

Значения инструментальных погрешностей измерителей БИНС задавались в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Вид погрешности	Значение
$\Delta a_0, m/c^2$	$5,01 \cdot 10^{-2}$
$K_a$	$2,46 \cdot 10^{-2}$
$\Delta b_0, рад$	$5,25 \cdot 10^{-2}$
$\omega_b, рад/с$	$2,33 \cdot 10^{-4}$

Совместная работа БИНС и НРНС начиналась с 20-й секунды полета ЛА. Для работы фильтра Калмана задавались следующие исходные данные:

$$\mathbf{P}_H(0) = \text{diag}[\mathbf{P}_{Hii}], \mathbf{P}_{Hii} = 10^3 (i = 1 \text{ — } 6); \mathbf{P}_M(0) = \text{diag}[\mathbf{P}_{Mii}], \mathbf{P}_{Mii} = 10^3 (i = 1 \text{ — } 8);$$

$$\mathbf{P}_{HM}(0) = \mathbf{P}_{MH}(0) = 0; \mathbf{R}(n) = \text{diag}[\mathbf{R}_{ii}], \mathbf{R}_{ii} = 10^2 (i = 1 \text{ — } 6); \Delta t = 0,15 c.$$

Гауссов вектор ошибок измерения  $\mathbf{f}$  с ковариационной матрицей  $\mathbf{R}$  на входе фильтра формировался с помощью датчика случайных чисел.

На рис. 1 для примера приведены ошибки оценивания смещения нуля акселерометра  $\varepsilon_{\Delta \hat{x}_{i0}} = \Delta \hat{x}_{i0} - \hat{\Delta x}_{i0}$  (кривая 1) и изменения наклона статической характеристики акселерометра  $\varepsilon_{K_{\hat{x}i}} = K_{\hat{x}i} - \hat{K}_{\hat{x}i}$  (2) в переходном режиме работы фильтра Калмана. На рис. 2 приведен график изменения отношения следов ковариационных матриц  $\delta$ , определяемый в соответствии с выражением (4). Время на рисунках отсчитывается с момента начала совместной работы БИНС и НРНС. Результаты моделирования показали, что установившийся режим работы фильтра Калмана соответствует примерно 65—70 с и более, т.е.  $\delta(n) \leq 3 \%$ . Исходя из этого и следует задавать пороговые значения  $\delta_3$ .

На рис. 3 приведены графики изменения модулей ошибок определения координат ЛА  $|\Delta x_n|$  с начала полета при условии, что в случае  $\delta(n) \leq \delta_3$  БИНС переходит в автономный режим работы (1 —  $\delta_3 = 3$ , 2 — 1 %).

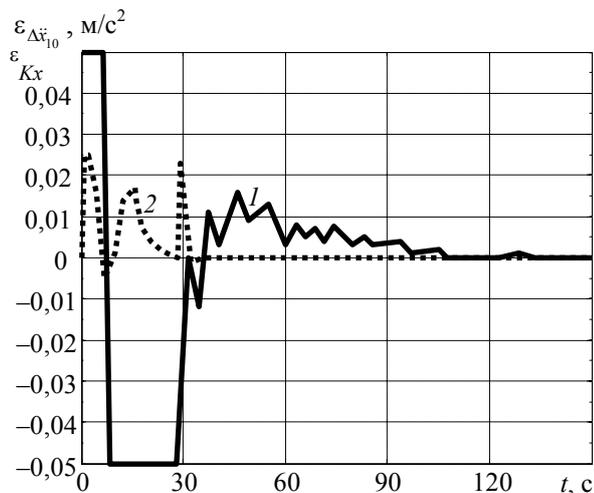


Рис. 1

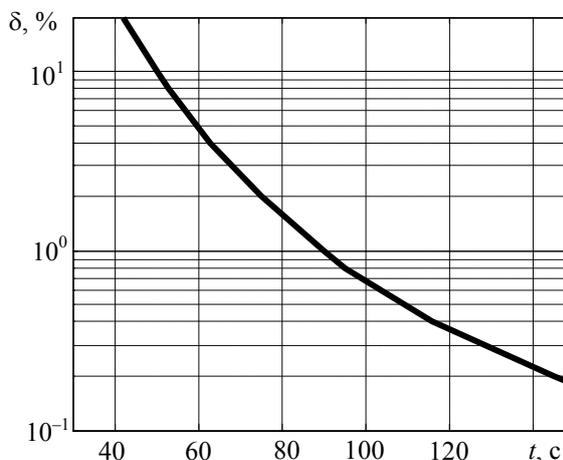


Рис. 2

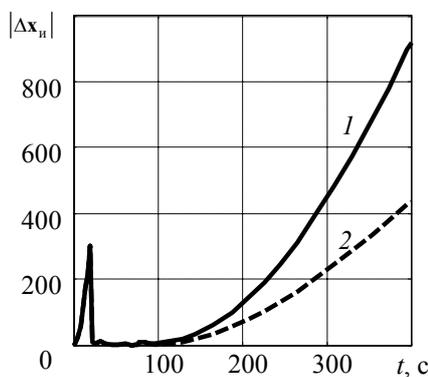


Рис. 3

Результаты моделирования показали, что реализация предложенного алгоритма позволяет уменьшить ошибки БИНС в сравнении с системой, показания акселерометров и гироскопов которой не корректируются. При заданном времени полета ЛА  $t_B = 300, 400$  и  $500$  с в зависимости от  $\delta_3$  ошибки инерциальной навигации уменьшаются соответственно в среднем примерно в 2—5, 3—8 и 4—10 раз.

**Вывод.** Таким образом, использование метода расширения вектора состояния динамической системы и принципов наблюдаемости компонентов расширенного вектора состояния объекта позволили получить работоспособный алгоритм оценивания погрешностей первичных измерителей БИНС, основанный на обработке показаний БИНС и НРНС. Коррекция показаний первичных измерителей позволяет существенно повысить точность инерциальной навигации ЛА ограниченного радиуса действия при дальнейшей автономной работе его БИНС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б. С. Аleshina, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. М.: Физматлит, 2006. 424 с.
2. Иванов Н. М., Лысенко Л. Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М.: Дрофа, 2004. 345 с.
3. Пятков В. В. Исследование наблюдаемости медленно меняющихся ошибок измерителей навигационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41, № 5. С. 56—60.
4. Кавинов И. Ф. Инерциальная навигация в околоземном пространстве. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

5. Неусытин К. А., Фам Суан Фанг. Алгоритмические методы повышения точности навигационных систем ЛА. Ханой: Мир, 2009. 126 с.
6. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Серебрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.
7. Ковальчук И. А., Кошеля И. А. Алгоритм вычисления нижней границы ковариаций ошибок оценивания при нелинейной фильтрации // Радиоэлектроника. 1985. Т. 28, № 7. С. 82—84.

**Сведения об авторах**

- Павел Валерьевич Васильев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; E-mail: vasp1971@mail.ru
- Алла Вячеславовна Мелешко** — канд. техн. наук; ОАО «НПП „Радар ММС“», Санкт-Петербург; ведущий специалист; E-mail: allaluna@list.ru
- Вячеслав Викторович Пятков** — д-р техн. наук, профессор; ОАО „НИИ телевидения“, Санкт-Петербург; начальник научно-технического комплекса; E-mail: pyatkov@niitv.ru

Рекомендована  
НИИ телевидения

Поступила в редакцию  
24.04.14 г.

УДК 681.3

В. В. НИКИФОРОВ

**ПРОТОКОЛ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗАИМНОГО БЛОКИРОВАНИЯ ЗАДАЧ  
В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Разработан протокол доступа прикладных задач к глобальным информационным ресурсам в системах реального времени. Протокол позволяет применять дисциплины планирования с переменными приоритетами задач, что обеспечивает существенное повышение эффективности использования процессорного времени в системах с многоядерными процессорами.

**Ключевые слова:** *многоядерные системы, системы на многоядерных процессорах, системы реального времени, взаимосвязанные задачи, протоколы доступа к ресурсам.*

**Введение.** Программные приложения для систем реального времени (СРВ) строятся в виде фиксированного набора задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ . Очередная ( $j$ -я) активизация задачи  $\tau_i$  означает порождение ее очередного ( $j$ -го) экземпляра — задания  $\tau_i^{(j)}$ . Порядок предоставления задачам процессорного времени определяется применяемой дисциплиной планирования. Для СРВ важно выбрать дисциплину планирования, гарантирующую своевременное выполнение задач при эффективном использовании ресурсов. Проверка гарантий своевременности выполнения прикладных задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  осуществляется с учетом максимального объема  $C_i$  процессорного времени, требуемого для однократного исполнения задачи  $\tau_i$  и периода  $T_i$  (минимально допустимого интервала времени между двумя активизациями задачи  $\tau_i$ ) [1, 2].

При решении прикладных задач, совместно использующих глобальные (разделяемые) информационные ресурсы, требуются механизмы, обеспечивающие: а) целостность ресурсов, б) предотвращение взаимного блокирования задач, ожидающих доступа к разделяемым информационным ресурсам.

Целостность информационных ресурсов обеспечивается, например, синхронизирующими механизмами типа мьютексов (*mutex*), а с целью предотвращения взаимного блокирования используются стандартные *протоколы доступа* к ресурсам [2, 3], ориентированные на применение дисциплин планирования со статическими приоритетами задач.

В настоящей статье предлагается протокол доступа, обеспечивающий предотвращение взаимного блокирования в условиях применения дисциплин планирования с динамически модифицируемыми приоритетами: разработчик может выбирать дисциплину планирования, позволяющую достичь требуемой эффективности использования ресурса процессора.

**Дисциплины планирования.** Простейшие способы проверки гарантий своевременности выполнения набора прикладных задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  опираются на определение значения *нагрузки*  $u_i = C_i/T_i$  — доли процессорного времени, требуемого для выполнения задачи  $\tau_i$ . Для оценки выполнимости программного приложения существенно значение *интегральной нагрузки*  $U = \sum_{i=1}^n u_i$ . Очевидно, что в случае однопроцессорной системы с классическим одноядерным процессором необходимо, чтобы значение интегральной нагрузки  $U$  не превышало единицы. В случае многоядерного процессора с  $m$  ядрами необходимо, чтобы выдерживалось неравенство  $U \leq m$ .

К дисциплинам планирования с наиболее жесткими ограничениями на модификацию приоритетов относятся дисциплины со статическими приоритетами задач (в ходе работы системы приоритеты задач, определенные при ее разработке, остаются неизменными). Смягчение ограничений на модификацию приоритетов задач позволяет выбирать дисциплины планирования, обеспечивающие более высокую эффективность использования процессорного времени.

На рис. 1 представлены три класса дисциплин планирования. Класс  $S_0$  соответствует дисциплинам со статическими приоритетами задач, к нему относится широко применяемая в СРВ RM-дисциплина: приоритеты задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  снижаются с увеличением значений  $T_i$ . Для системы на одноядерном процессоре эффективность (т.е. гарантированная выполнимость задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ ) дисциплины RM выражается равенством  $U \leq \ln 2 \cong 0,69$ .

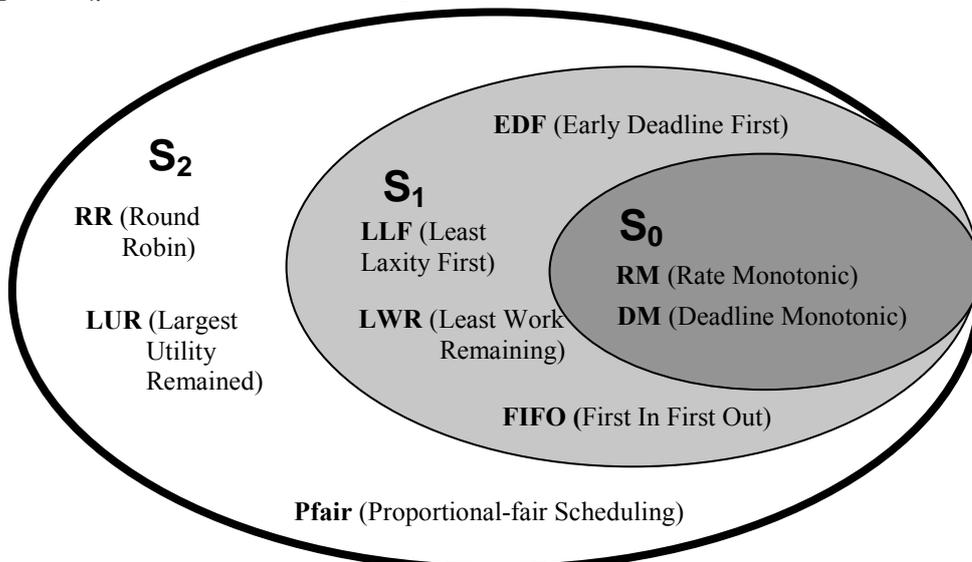


Рис. 1

Для дисциплин планирования класса  $S_1$  приоритеты однотипных заданий  $\tau_i^{(j)}$  и  $\tau_i^{(k)}$  ( $j \neq k$ ) могут различаться, т.е. экземпляры одной задачи могут исполняться с разными приоритетами. Ограничение на модификацию приоритетов для дисциплин планирования класса

$S_1$  состоит в том, что в рамках всего интервала существования конкретного задания  $\tau_i^{(j)}$  его приоритет остается неизменным. Благодаря смягчению (относительно класса  $S_0$ ) ограничений на модификацию приоритетов применение дисциплин класса  $S_1$  позволяет повысить эффективность использования процессора. Так, дисциплина планирования EDF (приоритеты заданий снижаются в порядке размещения на оси времени предельно допустимых моментов их завершения) обеспечивает максимально возможную эффективность использования процессорного времени в однопроцессорных СРВ с классическим одноядерным процессором. При применении дисциплины EDF в таких СРВ выполнение неравенства  $U \leq 1$  является не только необходимым, но и достаточным условием своевременности выполнения задач.

При построении СРВ на многоядерных процессорах применение RM и EDF неэффективно [4], для таких СРВ разработаны модифицированные варианты дисциплин планирования. Дисциплина RM\_US класса  $S_0$  обеспечивает выполнимость всех задач при  $U \leq \frac{m^2}{3m-2}$ : ее эффективность изменяется от 1/2 до 1/3 в зависимости от числа ядер процессора.

Классу  $S_2$  соответствует полное снятие ограничений на модификацию приоритетов заданий — приоритеты активных заданий могут изменяться в ходе их исполнения. Такое снятие ограничений открывает возможность повышения эффективности использования процессора в СРВ на многоядерных процессорах. Дисциплина Pfair обеспечивает выполнимость всех задач приложения при  $U \leq m$ , что означает стопроцентную эффективность использования ресурса процессора [5, 6].

**Протоколы доступа к разделяемым ресурсам.** Участок кода задачи, в рамках которого реализуется доступ к глобальному ресурсу  $g$ , называют *критическим интервалом* по ресурсу  $g$ . К *однотипным* относятся различные критические интервалы, в рамках которых реализуется доступ к одному глобальному ресурсу. Обеспечить целостность разделяемых ресурсов позволяют механизмы, предотвращающие одновременное исполнение однотипных критических интервалов различными заданиями. С этой целью для каждого глобального ресурса  $g_i$  в программном коде формируется синхронизирующий элемент типа мьютекса `mut_i`. Каждый участок кода программы, реализующий доступ к  $g_i$  (каждый из *критических интервалов* по доступу к ресурсу  $g_i$ ), ограничивается операторами над мьютексом `mut_i`. Критический интервал начинается оператор `lock(mut_i)` — закрыть мьютекс `mut_i` и заканчивается `unlock(mut_i)` — открыть мьютекс `mut_i`. Если в момент обращения задания к оператору `lock(mut)` мьютекс находится в состоянии „закрыт“, то исполнение приостанавливается до тех пор, пока владеющее ресурсом задание не освободит его выполнением операции `unlock(mut)`. Операторы `lock/unlock` разбивают код задачи на сегменты.

На рис. 2 в соответствии с предложенным в работе [7] подходом к представлению межзадачных интерфейсов средствами языка XML приведена структура взаимосвязей двух задач. Задачи  $\tau_1$  и  $\tau_2$  разделяют ресурсы  $g_1$  и  $g_2$ , критические интервалы защищены мьютексами `mut_1` и `mut_2`.

Каждая из задач (см. рис. 2) содержит два критических интервала: интервал задачи  $\tau_1$  по ресурсу  $g_1$  содержит 2-й и 3-й сегменты ее кода, по ресурсу  $g_2$  — ее 3-й и 4-й сегменты. Критический интервал задачи  $\tau_2$  по ресурсу  $g_1$  состоит из 3-го сегмента ее кода, по ресурсу  $g_2$  — 2, 3, 4-го. Существенно, что обе задачи содержат пересекающиеся критические интервалы:

- в  $\tau_1$  критические интервалы сцеплены — 3-й сегмент является, с одной стороны, завершающим сегментом критического интервала по  $g_1$ , а с другой — головным сегментом по  $g_2$ ;
- в  $\tau_2$  критический интервал по  $g_1$  вложен в интервал по  $g_2$ .

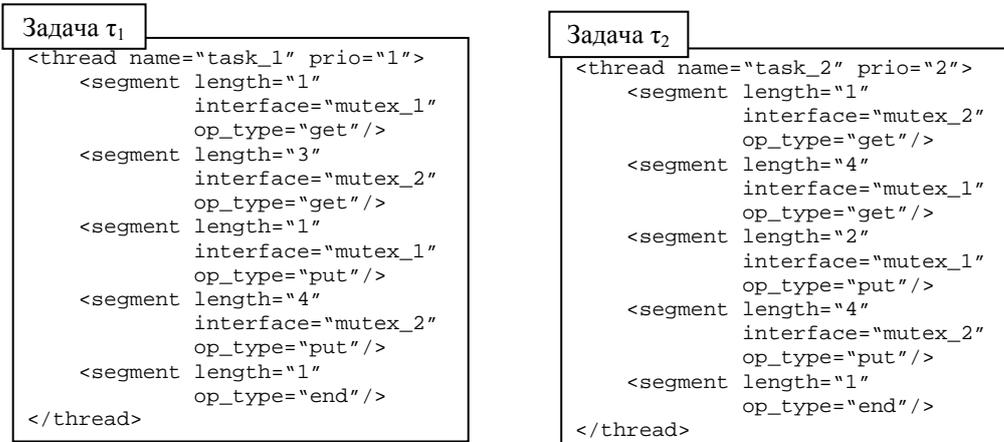


Рис. 2

При наличии в программном приложении задач с пересекающимися критическими интервалами возможно взаимное блокирование активных заданий. Такая ситуация может возникнуть при исполнении приложения, содержащего задачи  $\tau_1$  и  $\tau_2$  со структурой кода, представленной на рис. 2.

Рассмотрим следующий сценарий. Пусть задача  $\tau_2$  активизируется в момент времени  $t = 0$  и выполняется до  $t = 3$ , когда активизируется более приоритетная задача  $\tau_1$  и процессор переключается на ее исполнение. На интервале  $(3, 7)$  исполняются 1-й и 2-й сегменты  $\tau_1$ . В момент  $t = 7$  в результате обращения к операции `lock(mut_2)` исполнение  $\tau_1$  приостанавливается, поскольку запрашиваемый ресурс  $g_2$  занят задачей  $\tau_2$ . Процессор переключается на исполнение  $\tau_2$  — с момента  $t = 7$  до  $t = 10$  завершается исполнение 2-го сегмента  $\tau_2$ . В момент  $t = 10$  при обращении к операции `lock(mut_1)` происходит приостановка исполнения  $\tau_2$ , поскольку запрашиваемый ресурс  $g_1$  занят задачей  $\tau_1$ . Таким образом, задания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  попадают в состояние взаимного блокирования:  $\tau_1$  не может продолжаться, пока  $\tau_2$  не освободит ресурс  $g_2$ ,  $\tau_2$  не может освободить  $g_2$ , пока не получит доступа к занятому ресурсу  $g_1$ .

Стандартный подход к предотвращению взаимного блокирования задач опирается на снабжение синхронизирующих механизмов типа мьютексов дополнительными условиями и/или действиями (проверяемыми и/или осуществляемыми) при выполнении операций над мьютексами. Состав этих дополнительных условий/действий называют протоколами доступа к разделяемым информационным ресурсам.

Стандартные протоколы доступа предполагают применение дисциплин планирования класса  $S_0$  [2, 8]. Поэтому при построении систем, содержащих пересекающиеся критические интервалы, разработчики ориентируются на использование протоколов доступа, исключающих применение эффективных дисциплин планирования классов  $S_1$  или  $S_2$ . Однако наличие пересекающихся критических интервалов не означает взаимного блокирования задач. В работе [9] предложен метод проверки реальной возможности возникновения взаимного блокирования, основанный на анализе структурных особенностей специального многодольного графа — графа связей критических интервалов. На основе метода разработчик может проверить, действительно ли конфигурация взаимосвязей задач требует использования стандартных

протоколов доступа к разделяемым ресурсам. Если такая проверка дает отрицательный результат (т.е. несмотря на наличие пересекающихся критических интервалов возникновение взаимного блокирования задач невозможно), то при реализации рассматриваемой многозадачной системы можно применять высокоэффективные дисциплины планирования классов  $S_1$  или  $S_2$ .

**Граф связок.** Критические интервалы задачи  $\tau$  по основному (головному)  $g$  и дополнительному  $g^*$  ресурсам назовем связанными (образующими связку  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$ ), если они пересекаются, т.е. содержат общие сегменты кода задачи. Каждая связка  $L$  состоит из трех участков, на начальном (головном) участке задача  $\tau$  имеет доступ к *головному ресурсу*  $g$  связки. На центральном участке  $\tau$  имеет доступ и к  $g$  и к  $g^*$ . На завершающем один из ресурсов уже освобожден задачей  $\tau$ . Центральный участок образуется пересечением связанных критических интервалов. В структуре приложения на рис. 2 имеются две связки:  $L_1 = \langle \tau_1, g_1, g_2 \rangle$  и  $L_2 = \langle \tau_2, g_2, g_1 \rangle$ .

Необходимым условием возникновения взаимных ожиданий является наличие в программном приложении таких пар связок, для которых имеет место следующее отношение зависимости. Связка  $L_x = \langle \tau_i, g_a, g_b \rangle$  зависима от  $L_y = \langle \tau_j, g_c, g_d \rangle$ , если  $\tau_i$  и  $\tau_j$  — разные задачи и  $g_b \equiv g_c$ , то есть связка  $L_x$  является зависимой от  $L_y$ , если  $L_x$  и  $L_y$  принадлежат различным задачам и головной ресурс связки  $L_y$  совпадает с дополнительным ресурсом  $L_x$ . Имеющиеся в системе зависимости связок могут быть представлены в виде многодольного ориентированного графа связок [9]. Каждая связка критических интервалов представляется отдельной вершиной, если  $L_x$  зависит от  $L_y$ , то вершина  $L_x$  графа связок соединяется с вершиной  $L_y$  дугой, ведущей из  $L_x$  в  $L_y$ . Граф связок для программного приложения (см. рис. 2) представлен на рис. 3.

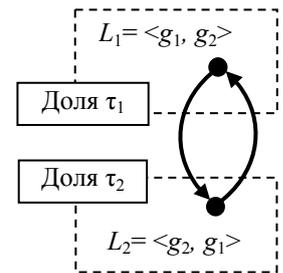


Рис. 3

Для проверки возможности возникновения взаимного блокирования задач следует в графе связок выделить множество междольных контуров  $W = \{w_1, w_2, \dots\}$ . Контур  $w_k$  является междольным, если в нем нет двух вершин, принадлежащих одной и той же доле. Выражение  $L \in w_k$  отражает факт принадлежности связки  $L$  контуру  $w_k$ . Условимся обозначать символом  $|w_k|$  число связок, принадлежащих контуру  $w_k$ . В общем случае связка  $L$  может:

- принадлежать одному, двум, либо большему числу контуров  $w_k$  из  $W$ ;
- не принадлежать ни одному из контуров  $w_k$ .

В работе [9] показано, что взаимное блокирование задач возможно в том, и только в том случае, если множество  $W$  не пустое. Тот факт, что для приложения со структурой, приведенной на рис. 2, взаимное блокирование возможно, отражается наличием междольного контура в графе связок на рис. 3.

**Протокол предотвращения взаимного блокирования.** Условимся считать, что в ходе исполнения задачи  $\tau$  связка  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$  находится в активном состоянии (является *активной*), если исполняется ее головной участок. Две связки, принадлежащие задаче  $\tau$ , могут одновременно пребывать в активном состоянии только в том случае, если пересекаются их головные участки. Следовательно, при отсутствии подобных пересечений в ходе исполнения  $\tau$  в каждый момент времени активной может быть не более одной из принадлежащих ей связок.

Отмеченное обстоятельство позволяет для приложений, свободных от пересечений головных участков связей, использовать протокол предотвращения взаимного блокирования (ППВБ), который

— гарантирует логическую корректность системы, содержащей контуры межзадачных зависимостей;

— может быть использован в условиях применения любых дисциплин планирования, в частности, с динамически модифицируемыми приоритетами задач.

Реализация ППВБ опирается на учет текущего числа активных связей в каждом из контуров  $w_k \in W$ , учет обеспечивается введением соответствующих счетчиков:

— значение счетчика  $q(w_k)$  увеличивается на единицу в тот момент времени, когда одна из связей, принадлежащих  $w_k$ , переходит в активное состояние;

— значение счетчика  $q(w_k)$  уменьшается на единицу в тот момент времени, когда одна из связей, принадлежащих  $w_k$ , перестает быть активной.

В рамках использования стандартных протоколов, предотвращающих взаимное блокирование задач, проверка/модификация значений мьютексов сопрягается с дополнительными проверками/действиями, выполняемыми при входе/выходе для каждого критического интервала по ресурсам. В рамках использования ППВБ дополнительные проверки/действия выполняются только при входе в пересекающиеся критические интервалы и, более того, только при входе в интервалы, являющиеся элементами одной из связей  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$ . Дополнительные проверки/действия для ППВБ состоят в следующем.

1. При запросе заданием  $\tau_i^{(j)}$  головного ресурса связки  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$  проверяется выполнение неравенств  $q(w_k) + 1 < |w_k|$  для каждого из контуров  $w_k$ , содержащих эту связку. Если хотя бы одно из неравенств не выполняется, то выполнение  $\tau_i^{(j)}$  приостанавливается до тех пор, пока не будет обеспечено выполнение всех проверяемых неравенств.

2. При входе задания  $\tau_i^{(j)}$  в головной участок связки  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$  значение счетчиков  $q(w_k)$  каждого из контуров  $L \in w_k$  увеличивается на единицу.

3. При входе задания  $\tau_i^{(j)}$  в дополнительный участок связки  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$  значение счетчиков  $q(w_k)$  каждого из контуров  $L \in w_k$  уменьшается на единицу.

Основное преимущество ППВБ состоит в том, что выполняемые в его рамках дополнительные проверки/действия не связаны с приоритетами задач и он может использоваться не только с дисциплинами планирования класса  $S_0$ , но и с более эффективными дисциплинами планирования классов  $S_1$  или  $S_2$ .

**Заключение.** Предложенный протокол предотвращения взаимного блокирования задач в системах реального времени обеспечивает эффективную реализацию программных приложений, содержащих задачи с пересекающимися критическими интервалами по доступу к разделяемым информационным ресурсам. Возможность использования стандартных протоколов доступа к разделяемым ресурсам ограничена требованием применения дисциплин планирования со статическими приоритетами задач, на представленный протокол это ограничение не распространяется. Это расширяет для разработчиков СРВ возможности широкого выбора дисциплины планирования. При построении СРВ на многоядерных процессорах такая возможность может обеспечить повышение эффективности использования процессорного времени в два-три раза.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов РФ (субсидия 074-U01).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыль С. Проектирование, разработка и анализ программного обеспечения систем реального времени. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 336 с.
2. Liu J. W. S. Real-Time Systems. NJ: Prentice Hall, 2000. 590 p.
3. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Составное блокирование взаимосвязанных задач в системах на многоядерных процессорах // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 1. С. 25—31.
4. Dhall S. K., Liu C. L. On a Real-Time Scheduling Problem // Operating Research. 1978. Vol. 26, N 1. P. 127—140.
5. Никифоров В. В. Выполнимость приложений реального времени на многоядерных процессорах // Тр. СПИИРАН. СПб: Наука, 2009. Вып. 8. С. 255—284.
6. Baker T. Multiprocessors EDF and Deadline Monotonic Schedulability Analysis // Proc. of the 24th IEEE Real-Time Systems Symposium. 2003. P. 120—129.
7. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Спецификация средствами языка XML системы интерфейсов в приложениях реального времени // Тр. СПИИРАН. СПб: Наука, 2009. Вып. 11. С. 159—175.
8. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Маршрутные сети — графический формализм представления структуры программных приложений реального времени // Тр. СПИИРАН. СПб: Наука, 2010. Вып. 14. С. 7—28.
9. Никифоров В. В., Павлов В. А. Операционные системы реального времени для встроенных программных комплексов // Программные продукты и системы. 1999. № 4. С. 24—30.

*Сведения об авторе*

**Виктор Викентьевич Никифоров** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория технологий и систем программирования; E-mail: [nik@iias.spb.su](mailto:nik@iias.spb.su)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
16.04.14 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 519.711.3 – 62.40

Д. Н. ГЕРАСИМОВ, В. О. НИКИФОРОВ, А. В. ПАРАМОНОВ, Д. С. СЕРОВ

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ В ИНЖЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ФАЗАМИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Решается задача адаптивного управления крутящим моментом в инжекторном двигателе внутреннего сгорания с переменными фазами газораспределения. В основе синтеза регулятора лежит параметрически и функционально неопределенная модель момента. Используется метод непрямого адаптивного управления. Представлены результаты моделирования в среде MatLab/Simulink.

*Ключевые слова:* инжекторный двигатель внутреннего сгорания, переменные фазы газораспределения, моделирование ДВС, адаптивное управление ДВС.

**Введение.** Разработка высокоточных самокалибрующихся систем управления двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является одним из приоритетных направлений в развитии современного автомобилестроения. Главными целями создания таких систем является оптимизация мощностных характеристик, экономия топлива, снижение выброса вредных веществ в атмосферу. Не менее важные задачи — сокращение времени производства двигателя, повышение срока его эксплуатации, а также обеспечение безопасности и комфорта водителя.

Для улучшения топливно-экономических и мощностных показателей ДВС, а также снижения токсичности отработавших газов современные автомобили оснащаются электронными системами управления дроссельной заслонкой (ЭСУДЗ), которые плавно регулируют крутящий момент двигателя в зависимости от положения педали акселератора и текущего режима работы автомобиля. ЭСУДЗ позволяют:

- поддерживать постоянный крутящий момент в режиме холостого хода двигателя или в режиме круиз-контроля;
- сглаживать реакцию двигателя на резкое нажатие педали акселератора, обеспечивая тем самым плавное и свободное от вибраций поведение автомобиля;
- взаимодействовать с системами безопасности автомобиля и в случае экстренной ситуации — ограничивать момент двигателя;
- компенсировать момент нагрузки, который вызван, в частности, переключением передач или неровностью дорожного покрытия.

В терминах теории управления ЭСУДЗ обеспечивает решение задачи слежения крутящего момента за желаемым значением. При этом многофункциональность ЭСУДЗ открывает широкие возможности по усовершенствованию ДВС для разработчиков систем автоматического управления.

подавляющее большинство реализуемых решений по созданию ЭСУДЗ основано на статических таблицах, сформированных на этапе предварительной калибровки двигателя и представляющих собой зависимости управляющих воздействий от переменных состояния двигателя. В то же время двигатель работает, как правило, в динамических режимах в условиях действия возмущений, его характеристики со временем изменяются. Очевидно, что при этом статические таблицы не могут обеспечить надлежащего качества. Важно также отметить: калибровка двигателя — процесс долгий (не один месяц), что также является недостатком этого метода. Таким образом, для повышения точности работы ЭСУДЗ необходимо учесть в законе управления нелинейную динамику, возмущения и неопределенности ДВС, в то же время с целью постоянного уточнения параметров двигателя важно обеспечить возможность его самокалибровки в ходе работы.

За последние 20 лет разработано большое количество методов и алгоритмов, позволяющих парировать те или иные проблемы управления моментом. В [1—7] предлагаются методы теории линейных систем, включая методы локальной линеаризации нелинейных моделей; в [8, 9] представлены алгоритмы нелинейного управления на основе нелинейных моделей с известными параметрами и методов градиентного спуска. В работах [10, 11] рассматриваются методы управления на основе прогнозирующих моделей, в [12—14] проблема управления моментом решается с помощью искусственных нейронных сетей. В статье [15] предложена итеративная процедура обучения регулятора, а в [16] — решение задачи управления на основе принципа инверсной динамики и инверсной модели.

Отличие предлагаемых в настоящей статье алгоритмов управления моментом заключается в том, что лежащая в основе их синтеза нелинейная динамическая модель содержит параметрические и функциональные неопределенности, которые в ходе работы двигателя компенсируются с помощью методов адаптивного управления. Таким образом, повышается точность работы системы и появляется возможность самокалибровки двигателя в ходе его эксплуатации.

Для снижения расхода топлива, увеличения мощностных показателей и уменьшения количества токсичных выбросов используется система переменных фаз газораспределения, позволяющая обеспечивать оптимальные процессы смесеобразования, однако при этом возникают дополнительные неопределенности в законе управления двигателем, которые необходимо компенсировать.

**Постановка задачи.** Задача управления заключается в компенсации нелинейной динамики и неопределенностей двигателя, внешних и внутренних возмущений и в обеспечении выполнения целевого неравенства:

$$\left| M(k) - M^*(k) \right| \leq \Delta_M \quad \text{для всех } k \geq T_M, \quad (1)$$

где  $M(k)$  — усредненный за один цикл работы двигателя момент,  $M^*(k)$  — желаемый момент,  $T_M$  — время переходного процесса,  $\Delta_M$  — погрешность слежения,  $k$  — шаг времени, соответствующий одной второй оборота коленчатого вала (для четырехцилиндровых двигателей). Допустимой погрешностью для системы управления считается 10—15 %.

Переменной управления в проектируемой системе является положение дроссельной заслонки во впускном коллекторе.

Задача решается в предположении, что регулятор топлива, регулятор угла опережения зажигания и регуляторы фаз газораспределения функционируют в рабочих режимах.

**Модель двигателя.** На основе фундаментальных законов физики, описывающих аэродинамику течения воздушного потока во впускном коллекторе и процесс преобразования энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в крутящий момент, формируется математическая модель момента [17—19]. Модель, оперирующая переменными, усредненными за

один цикл работы двигателя (усредненная модель), представляет собой последовательность преобразований сигнала управления  $\alpha$  в регулируемую переменную  $M$ .

Модель состоит из уравнения эффективного момента двигателя и уравнения динамики давления воздуха во впускном коллекторе, описываемого выражением

$$P(k+1) = \left( 1 - \eta_c(P(k), \omega(k), \theta_{ivo}(k), \theta_{evc}(k)) \frac{30V_d}{4\pi V_m} \right) P(k) + \frac{30RT_m}{\omega(k)V_m} \eta_t(P(k)) \varphi_1(P(k)) \varphi_2(\alpha(k)), \quad (2)$$

где  $P$  — давление воздуха во впускном коллекторе,  $\omega$  — скорость вращения коленчатого вала,  $\theta_{ivo}$  и  $\theta_{evc}$  — угол открытия и закрытия выпускных клапанов,  $\eta_c$  — эффективность наполнения цилиндров,  $\eta_t$  — эффективность дроссельной заслонки,  $V_m$  — объем впускного коллектора,  $T_m$  — температура воздуха во впускном коллекторе,  $V_d$  — объем двигателя,

$$\varphi_2(\alpha) = \frac{\pi D^2}{4} \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \right) \quad (3)$$

— площадь поперечного сечения открытой части патрубка с дроссельной заслонкой,  $D$  — диаметр патрубка с дроссельной заслонкой,  $\alpha_0$  — угол дроссельной заслонки при полном закрытии патрубка заслонкой,  $\varphi_1(P)$  — некоторая эмпирически установленная зависимость.

Следующее выражение определяет эффективный крутящий момент как функцию скорости вращения коленчатого вала  $\omega$ , коэффициента избытка воздуха  $\lambda$  и угла опережения зажигания  $\theta_{ign}$ :

$$M = \frac{V_d Q_{hv}}{4\pi RT_m F_S} \eta_c(P(k), \omega(k), \theta_{ivo}(k), \theta_{evc}(k)) \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\theta_{ign}) P - M_L(\omega), \quad (4)$$

где  $Q_{hv}$  — теплотворная способность топлива,  $\eta_f(\omega)$  — эффективность сгорания топлива,  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  — эффективности момента по коэффициенту избытка воздуха и углу опережения зажигания соответственно,  $F_S$  — стехиометрическое соотношение воздух—топливо,  $M_L$  — момент внутреннего трения, определяемый эмпирической зависимостью вида:

$$M_L(\omega) = c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2, \quad (5)$$

где  $c_0, c_1, c_2$  — постоянные параметры.

Представленная модель момента обладает следующими свойствами.

1. Модель является линейной по отношению к функции  $\varphi_2(\alpha)$ .
2. Переменные  $\alpha, M, P, \omega, \lambda, \theta_{ign}, \theta_{ivo}, \theta_{evc}$  доступны прямому измерению.
3. Ни тип инжекторного двигателя, ни вид топлива неизвестны, поэтому параметры  $c_0, c_1, c_2, Q_{hv}$  и функции  $\varphi_1(P), \eta_t(P), \eta_c(P, \omega, \theta_{ivo}, \theta_{evc}), \eta_f(\omega), \varphi_3(\lambda), \varphi_4(\theta_{ign}), M_L(\omega)$  неизвестны. Иными словами, модель момента является параметрически и функционально неопределенной, что требует использования методов адаптивного управления и идентификации.

Для идентификации неизвестные функции

$$\left( 1 - 30\eta_c V_d / 4\pi V_m \right), 30RT_m \eta_t(P(k)) \varphi_1(P(k)) / V_m \omega, V_d Q_{hv} \eta_c \eta_f \varphi_3 \varphi_4 / 4\pi RT_m F_S, M_L$$

раскладываются в ряды Тейлора по своим аргументам, после чего выражения (2) и (4) представляются в формах линейной регрессии:

$$P(k+1) = \theta_{1\dots 15}^T \xi_{1\dots 15}(k) P(k) + \theta_{16\dots 18}^T \xi_{16\dots 18}(k) \varphi_2(\alpha(k)) / \omega(k), \quad (6)$$

$$M(k) = \psi_{1\dots 21}^T \vartheta_{1\dots 21}(k) P(k) - \psi_{22\dots 24}^T \vartheta_{22\dots 24}(k), \quad (7)$$

где  $\theta_{1...15} \in R^{15}$ ,  $\theta_{16...18} \in R^3$ ,  $\psi_{1...21} \in R^{21}$ ,  $\psi_{22...24} \in R^3$  — компоненты вектора неизвестных параметров  $\theta \in R^{18}$  и  $\psi \in R^{24}$  соответственно\*,

$$\xi_{1...15}^T = [1 \ P \ \omega \ \theta_{\text{evc}} \ \theta_{\text{ivo}} \ P^2 \ \omega^2 \ \theta_{\text{evc}}^2 \ \theta_{\text{ivo}}^2 \ P\omega \ P\theta_{\text{evc}} \ P\theta_{\text{ivo}} \ \omega\theta_{\text{evc}} \ \omega\theta_{\text{ivo}} \ \theta_{\text{evc}}\theta_{\text{ivo}}],$$

$$\xi_{16...18}^T = [1 \ P \ P^2]$$

— компоненты вектора измеряемых функций  $\xi^T = [\xi_{1...15} \ \xi_{16...18}]$ ,

$$\vartheta_{1...21}^T = [1 \ \alpha_{\text{ign}} \ \omega \ \theta_{\text{evc}} \ \theta_{\text{ivo}} \ \lambda \ \alpha_{\text{ign}}^2 \ \omega^2 \ \theta_{\text{evc}}^2 \ \theta_{\text{ivo}}^2 \ \lambda^2 \ \alpha_{\text{ign}}\omega \ \alpha_{\text{ign}}\theta_{\text{evc}} \ \alpha_{\text{ign}}\theta_{\text{ivo}} \ \alpha_{\text{ign}}\lambda \ \omega\theta_{\text{evc}} \ \omega\theta_{\text{ivo}} \ \omega\lambda \ \theta_{\text{evc}}\theta_{\text{ivo}} \ \theta_{\text{evc}}\lambda \ \theta_{\text{ivo}}\lambda],$$

$$\vartheta_{22...24}^T = [1 \ \omega \ \omega^2]$$

— компоненты вектора измеряемых функций  $\vartheta^T = [\vartheta_{1...21} \ \vartheta_{22...24}]^T$ .

Для идентификации неизвестных параметров, содержащихся в векторах  $\theta$  и  $\psi$ , используются линейное регрессионное представление (6), (7), алгоритм наименьших квадратов и данные, полученные в ходе эксперимента.

Результаты идентификации параметров и проверки модели момента приведены на рис. 1 ( $P_{\text{мод}}$ ,  $M_{\text{мод}}$  — давление воздуха в коллекторе и момент, генерируемые (6) и (7) соответственно,  $P_{\text{эксп}}$ ,  $M_{\text{эксп}}$  — экспериментальные данные). Параметры двигателя (3) имеют следующие значения:  $\alpha_0 = 0,035$  рад ( $2^\circ$ ),  $D = 0,1$  м.

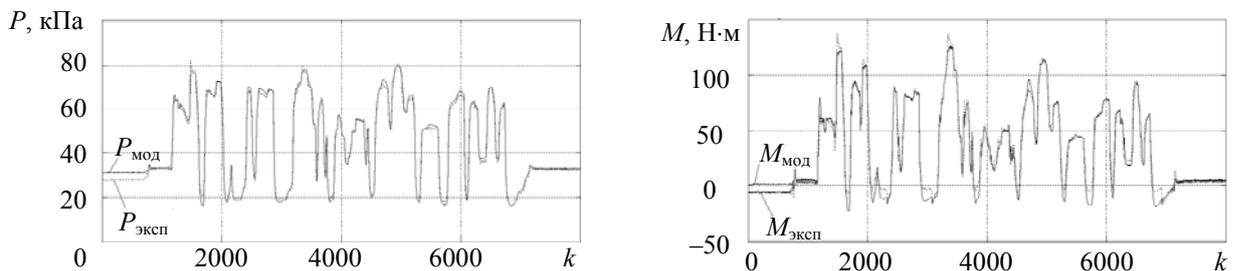


Рис. 1

Результаты эксперимента показали, что погрешность моделирования уравнения давления (6) составляет около 8 %, момента (7) — около 10 %. Важно отметить, что в условиях быстрого изменения давления и момента возникает наивысшая погрешность, которая сравнима с заявленной 10—15 %, в связи с чем возникает необходимость в коррекции коэффициентов модели и повышении ее точности с использованием методов адаптивной идентификации.

Идентифицированные параметры модели используются в дальнейшем для синтеза регулятора и моделирования адаптивной системы управления и именуются номинальными. Модель и закон управления, построенные с использованием этих параметров, также называются номинальными.

**Синтез номинального регулятора.** Пусть параметры модели (6), (7) равны номинальным. Тогда на основе метода модального управления дискретными системами и указанных свойств модели строится номинальный регулятор вида

\* Обозначение  $\theta_{1...15}$  вводится для вектора, состоящего из элементов с первого по пятнадцатый в векторе  $\theta$ . Аналогичные обозначения приняты для  $\theta_{16...18}$ ,  $\psi_{1...21}$ ,  $\psi_{22...24}$ .

$$\alpha(k) = \frac{4}{\pi D^2} \arccos \left\{ 1 - \frac{\omega(k)}{\theta_{16\dots 18}^T \xi_{16\dots 18}} \left[ (\sigma - \theta_{1\dots 15}^T \xi_{1\dots 15}) P(k) + (1 - \sigma) P^*(k) \right] \right\}, \quad (8)$$

где величина  $P^*$  связана с желаемым значением крутящего момента посредством уравнения (7) следующим образом:

$$P^*(k) = \frac{M^*(k) + \psi_{22\dots 24}^T \vartheta_{22\dots 24}(k)}{\psi_{1\dots 21}^T \vartheta_{1\dots 21}(k)}, \quad (9)$$

$\sigma \in [0, 1)$  — параметр регулятора, отвечающий за быстродействие системы.

**Синтез адаптивного управления.** Полагая, что параметры объекта управления, заложенные в векторах  $\theta$  и  $\psi$  неизвестны, заменим в (8), (9)  $\theta$  и  $\psi$  на оценки  $\hat{\theta}$  и  $\hat{\psi}$  и получим адаптивный закон управления:

$$\alpha(k) = \arccos \left\{ 1 - \frac{\omega(k)}{\hat{\theta}_{16\dots 18}^T \xi_{16\dots 18}} \left[ (\sigma - \hat{\theta}_{1\dots 15}^T \xi_{1\dots 15}) P(k) + (1 - \sigma) P^*(k) \right] \right\}, \quad (10)$$

$$P^*(k) = \frac{M^*(k) + \hat{\psi}_{22\dots 24}^T \vartheta_{22\dots 24}(k)}{\hat{\psi}_{1\dots 21}^T \vartheta_{1\dots 21}(k)}, \quad (11)$$

где оценки  $\hat{\theta}$  и  $\hat{\psi}$  генерируются алгоритмом наименьших квадратов на основе линейной регрессионной модели (6), (7).

Для проверки функционирования алгоритма в среде MatLab/Simulink было проведено моделирование системы управления с использованием данных теста автомобиля Chevrolet Equinox и модели момента (2)—(4). Приведенные на рис. 2 результаты моделирования при  $\sigma = 0,8$  подтверждают, что погрешность работы системы соответствует заданной (10—15 %).

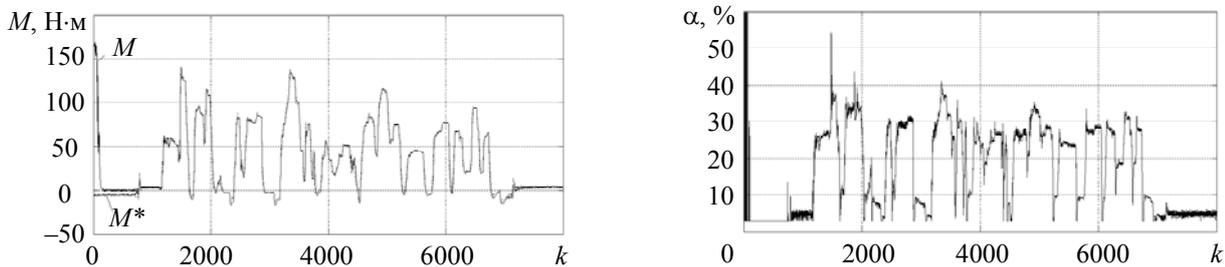


Рис. 2

**Заключение.** В статье предложено решение задачи адаптивного управления крутящим моментом инжекторного ДВС с переменными фазами газораспределения. В основе синтеза регулятора лежит параметрически и функционально неопределенная модель момента. Для достижения цели управления и компенсации неопределенностей модели используется метод непрямого адаптивного управления. Представлены результаты моделирования в среде MatLab/Simulink.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stefanopoulou A. G., Grizzle J. W., Freudenberg J. S. Engine Air-Fuel Ratio and Torque Control using Secondary Throttles // Proc. of the 33<sup>rd</sup> Conf. on Decision and Control. 1994. P. 2748—2753.
2. Jankovic M., Frischmuth F., Stefanopoulou A. et al. Torque management of engines with variable cam timing // IEEE Control Systems Magazine. 1998. Vol. 18. P. 34—42.

3. *Jankovic M., Magner M.* et al. Transient effects and torque control of engines with variable cam timing // Proc. of the American Control Conf. 2000. P. 50—54.
4. *Karnik A. Y., Buckland J. H., Freudenberg J. S.* Electronic Throttle and Wastegate Control for Turbocharged Gasoline Engines // American Control Conf. 2005. P. 4434—4439.
5. *Ali A., Blath J. P.* Nonlinear Torque Control of a Spark-Ignited Engine // Proc. of the American Control Conf. 2006. P. 3266—3271.
6. *Ali A., Blath J. P.* Application of Modern Techniques to SI-Engine Torque Control // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Control Applications. 2006. P. 2405—2410.
7. *Hong M., Ouyang M.* et al. Model-based PI Feedback Control of Engine Torque // IEEE Intern. Conf. on Control and Automation. 2010. P. 12—15.
8. *Kolmanovsky I. V., Druzhinina M., Sun J.* Speed-Gradient Approach to Torque and Air-to-Fuel Ratio Control in DISC Engines // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002. Vol. 10. P. 671—678.
9. *Hong M., Shen T., Ouyang M.* Nonlinear Observer-based Torque Control for SI Engine // ICROS-SICE Intern. Joint Conf. 2009. P. 4114—4119.
10. *Vermillion C., Butts K., Reidy K.* Model Predictive Engine Torque Control with Real-Time Driver-in-the-Loop Simulation Results // American Control Conf. 2010. P. 1459—1464.
11. *Sakai Y., Kanai M., Yamakita M.* Torque demand control by nonlinear MPC with constraints for vehicles with variable valve lift engine // IEEE Intern. Conf. on Control Appl. 2010. P. 1642—1647.
12. *Javaherian H., Liu D., Kovalenko O.* Automotive Engine Torque and Air-Fuel Ratio Control Using Dual Heuristic Dynamic Programming // Intern. Joint Conf. on Neural Networks. 2006. P. 518—525.
13. *Zweiri Y. H., Seneviratne L. D., Jordan K.* Diesel Engine Indicated Torque Estimation Based on Artificial Neural Networks // IEEE Computer Society. 2007. P. 791—798.
14. Feedforward Method of Engine Torque Estimation // IEEE Intern. Conf. on Vehicular Electronics and Safety. 2006. P. 246—249.
15. *Nagata T., Tomizuka M.* Robust Engine Torque Control by Iterative Learning Control // American Control Conf. 2009. P. 2064—2069.
16. *Gerasimov D. N., Javaherian H., Nikiforov V. O.* Data Driven Inverse-Model Control of SI Engines // Proc. American Control Conf. 2011. P. 426—431.
17. *Ginoux S., Champoussin J.* Engine torque determination by crankangle measurements: State of the Art, Future Prospects // SAE Tech. Report № 970532. 1997.
18. *Park S., Sunwoo M.* Torque estimation of spark ignition engines via cylinder pressure measurement // J. Automobile Engineering. 2003. Vol. 217, N 9. P. 809—817.
19. *Герасимов Д. Н., Джавахериан Х., Ефимов Д. В.* и др. Инжекторный двигатель как объект управления. Ч. I. Схема двигателя и синтез математической модели // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 5. С. 135—147.

#### *Сведения об авторах*

- Дмитрий Николаевич Герасимов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: gerasimovdn@mail.ru
- Владимир Олегович Никифоров** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, Санкт-Петербург; проректор; E-mail: nikiforov@mail.ifmo.ru
- Алексей Владимирович Парамонов** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: avp.atrax@gmail.com
- Дмитрий Сергеевич Серов** — студент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: dss-primary@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
21.03.14 г.

И. О. ЖАРИНОВ, О. О. ЖАРИНОВ, П. П. ПАРАМОНОВ,  
М. О. КОСТИШИН, С. А. СУДАРЧИКОВ

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КАНАЛЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ БОРТОВЫХ СРЕДСТВ ИНДИКАЦИИ

Рассматривается задача обеспечения температурных режимов работы оптических и электрорадиоэлементов в изделиях авионики. Предложена схема канала контроля и управления температурными режимами работы компонентов. Приведены результаты экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* температурный режим работы, радиоэлементы, оптические элементы, авионика.

**Введение.** Проектирование бортовых приборов сопряжено с необходимостью обеспечения стойкости и устойчивости изделия авионики к внешним факторам. Наиболее существенное влияние на аппаратуру оказывают параметры окружающей среды, в первую очередь, температура. Диапазон рабочих температур от  $-60$  до  $+70$  °С, в этих условиях изделие авионики должно гарантированно сохранять работоспособность и обеспечивать технические характеристики в соответствии с требованиями технического задания.

Для изделий класса МФЦИ (многофункциональных цветных индикаторов) [1—4], включающих радиоэлектронные компоненты и оптико-электронную жидкокристаллическую (ЖК) матрицу (экран), проблема обеспечения стойкости и устойчивости к температурным воздействиям имеет две составляющие:

- необходимость обдува встроенными средствами охлаждения радиоэлектронных компонентов изделия в условиях воздействия повышенной температуры окружающей среды;
- необходимость подогрева встроенными средствами оптико-электронных компонентов (лампы подсвета, ЖК-матрица) изделия в условиях воздействия пониженной температуры окружающей среды.

Таким образом, для обеспечения стойкости и устойчивости МФЦИ к температурным воздействиям в изделии должны быть реализованы специальные схемные и конструктивно-технологические решения.

**Схема канала контроля и управления температурным режимом работы индикаторов класса МФЦИ** представляет собой двухканальную оптико-электронную измерительную цепь с обратной связью (рис. 1). Представленная схема состоит из:

- чувствительных элементов — датчиков температуры  $ДТ_1$  и  $ДТ_2$ ;
- двух операционных усилителей (ОУ), включенных по схеме аperiodического звена первого порядка ( $AZ_1$ ) в суммирующем включении;
- двухканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), реализующей алгоритм обработки данных по температуре окружающей среды;
- цифро-аналогового преобразователя (ЦАП);
- усилителя тока на базе ОУ, включенного по схеме  $AZ_1$ ;
- электронного ключа, коммутирующего напряжение питания на электровентилятор (ЭВ);
- электронного ключа, коммутирующего напряжение питания на подогреватель;
- объекта управления 1 — высоковольтного источника питания (инвертора, И), ЖК-

матрицы с газоразрядными лампами подсвета (Л) и резистивного подогревателя;  
 — объекта управления 2 — электроventильатора постоянного тока со встроенной схемой управления.

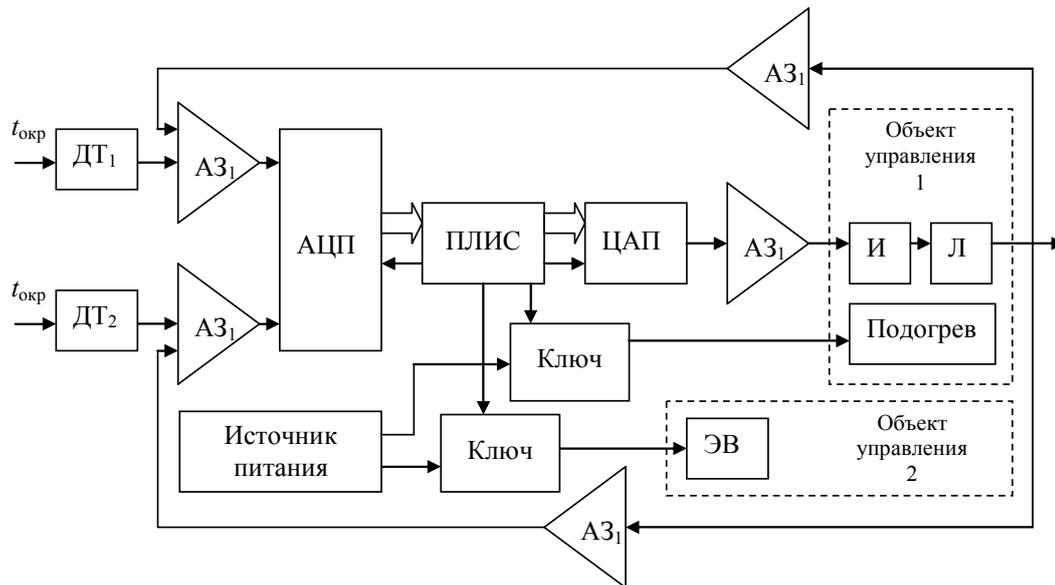


Рис. 1

Обратная связь в такой системе автоматического управления обеспечивается динамическим звеном, выполненным на базе операционного усилителя, включенного по схеме апериодического звена первого порядка. Канал обратной связи предназначен для поддержания требуемого уровня яркости свечения ЖК-экрана и яркостного контраста изображения во всем диапазоне рабочих температур МФЦИ. Расчет схемы произведен в соответствии с рекомендациями работы [5].

Принцип работы схемы контроля и управления следующий. Датчики ДТ<sub>1</sub> и ДТ<sub>2</sub> формируют электрический сигнал, уровень которого прямо пропорционален температуре  $t_{\text{окр}}$  окружающей изделие среды. Сигнал датчиков усиливается на элементах АЗ<sub>1</sub> и подвергается аналого-цифровому преобразованию в АЦП, функционирующем в режиме мультиплексирования во времени для последовательной обработки сигналов от двух датчиков, расположенных внутри МФЦИ. Установкой канала обработки АЦП управляет ПЛИС, в которой реализована пороговая схема обработки данных, предусматривающая формирование управляющего воздействия на цифро-аналоговый преобразователь и электронные твердотельные ключи.

ЦАП в канале управления яркости преобразует код яркости свечения ЖК-экрана от ПЛИС и через усилитель тока передает управляющее воздействие на объект управления 1. Код ПЛИС в канале обдува управляет электронным ключом с целью коммутации напряжения питания на электроventильатор, а в канале подогрева — с целью коммутации на подогреватель ЖК, представляющий собой резистивное напыление малого сопротивления (порядка 7—10 Ом) на стекле внутри ЖК-панели.

**Канал автоматической регулировки яркости в системах индикации геоинформационных данных** предназначен для управления в автоматическом режиме яркостью свечения лампы бокового или заднего подсвета ЖК-экрана. Функциональная схема системы управления для одного канала приведена на рис. 2.

Канал автоматической регулировки яркости (АРЯ) состоит из:

- чувствительного элемента — датчика внешней освещенности (фотодиода);
- операционного усилителя, включенного по схеме апериодического звена первого порядка в суммирующем включении;
- аналого-цифрового преобразователя;

— ПЛИС, реализующей алгоритм АРЯ;  
 — цифро-аналогового преобразователя;  
 — усилителя тока на базе ОУ;  
 — объекта управления — высоковольтного источника питания (инвертора) и ЖК-матрицы с газоразрядными лампами подсвета.

Обратная связь в такой системе автоматического управления (САУ) обеспечивает динамическое звено, выполненное на базе операционного усилителя, включенного по схеме аperiodического звена первого порядка.

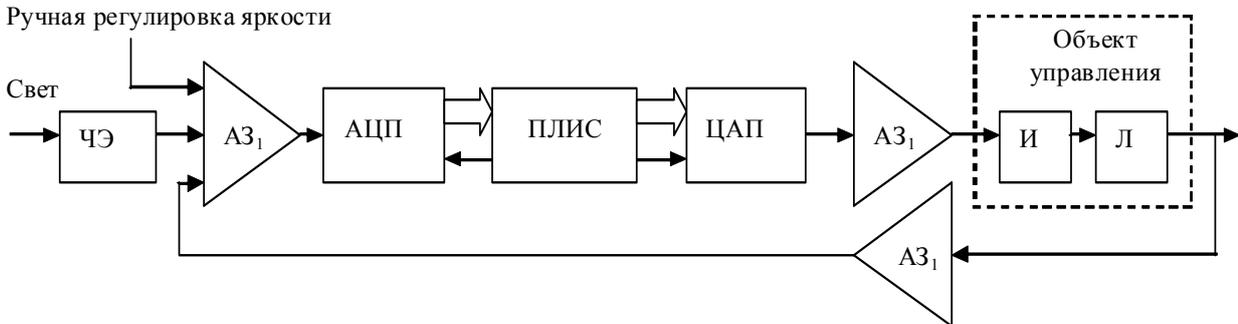


Рис. 2

Канал обратной связи регистрирует уровень изменения яркости свечения ламп подсвета, возникающего при подаче на вход системы АРЯ входного управляющего воздействия от внешнего источника света. Расчет параметров САУ произведен в соответствии с рекомендациями работы [5]. Система АРЯ чувствительна к изменению уровня внешней освещенности, создаваемой в плоскости экрана МФЦИ внешними источниками света. Наиболее существенное воздействие при эксплуатации авиационных систем оказывает естественный источник света — Солнце, создающее при прямой засветке или переотражении света от облаков уровень внешней освещенности в плоскости экрана МФЦИ до 75 кЛк. Такой уровень освещенности даже при наличии на экране МФЦИ специализированных антибликовых и антиотражающих средств (пленок) существенно усложняет восприятие пилотом изображения пилотажно-навигационной информации и геоинформационных данных [6—11].

Система АРЯ на основании результатов измерений от датчиков уровня внешней освещенности формирует управляющее воздействие на высоковольтную систему инвертора, вырабатывающего напряжение „поджига“ инертного газа ламп подсвета, с целью увеличения яркости свечения ЖК-экрана, под воздействием внешней засветки вызывающего перераспределение отношения яркости изображения в цвете к яркости изображения цвета фона (как правило, в авионике цвет фона черный, реже — серый).

**Результаты экспериментов.** Для проверки работоспособности технических решений, положенных в основу схемы контроля и управления температурным режимом компонентов индикатора класса МФЦИ, были проведены эксперименты. Индикатор МФЦИ помещался в климатическую камеру „спокойного“ воздуха, где попеременно устанавливалась температура окружающей среды от  $-60$  до  $+70$  °С с шагом 5 °С. После двухчасовой выдержки при заданной температуре изделие включалось и выполнялся контроль:

- температуры среды (за счет объема климатической камеры, значительно превосходящего объем изделия, гарантировалось постоянство температуры окружающей среды);
- температуры внутри изделия на основании результатов измерений от ДТ<sub>1</sub> и ДТ<sub>2</sub> для разных значений напряжения питания изделия (+27 и +30 В);
- яркости свечения ЖК-экрана и рассчитывался яркостный контраст изображения на экране МФЦИ.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3, *а* — при пониженной температуре, *б* — в нормальных климатических условиях (НКУ), *в* — при повышенной температуре окружаю-

щей среды,  $z$  — при повышенной температуре окружающей среды в канале управления яркостью. Анализ графиков показывает, что схема контроля и управления обеспечивает комфортные условия для работы радио- и оптоэлементов в МФЦИ. Важно заметить, что пороговые уровни для режимов включения и отключения подогрева и электровентилятора в МФЦИ имеют гистерезис.

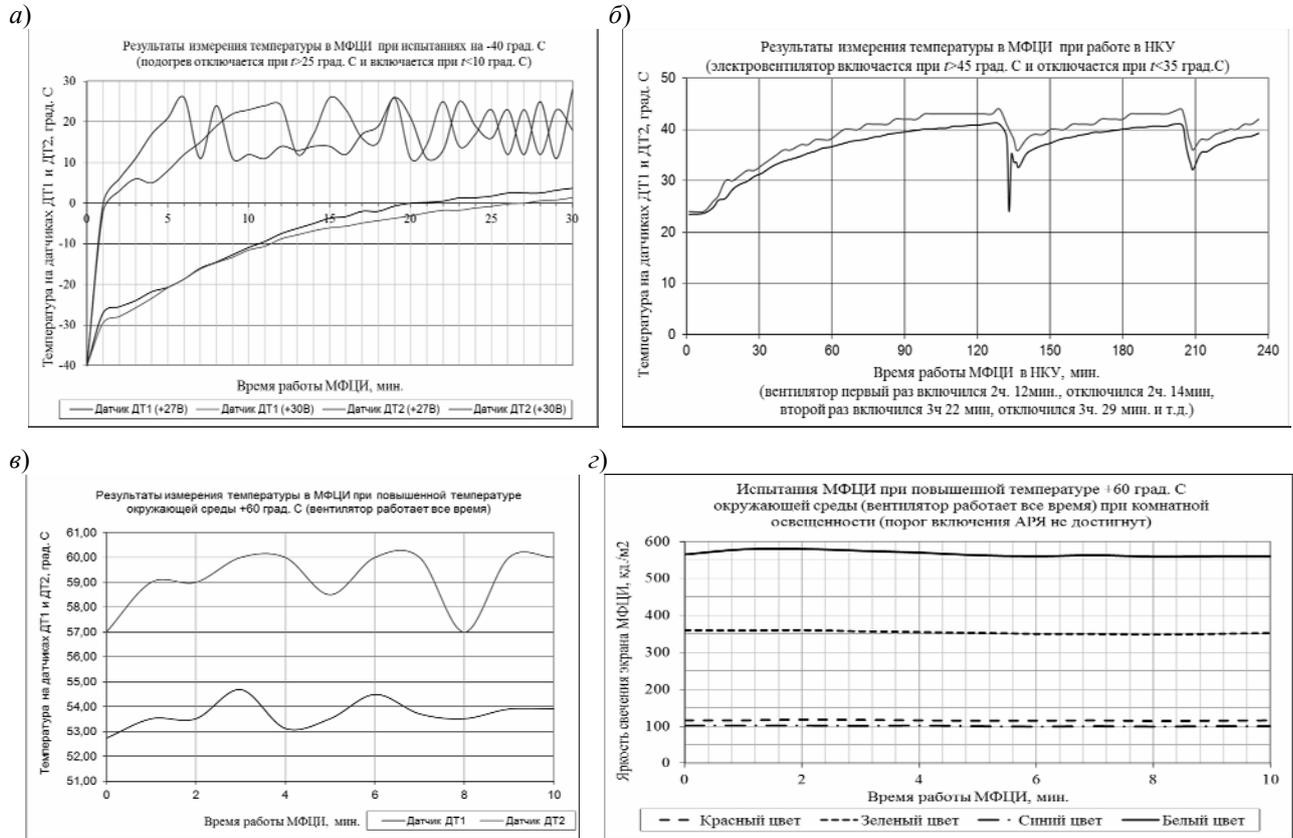


Рис. 3

**Заключение.** Задача обеспечения температурных режимов работы радио- и оптоэлементов в изделиях авиационной промышленности является ключевой для повышения надежности проектируемых изделий [12—15]. Традиционно параметры надежности рассчитываются исходя из  $\lambda$ -характеристик и коэффициентов нагрузки элементов. Коэффициент нагрузки определяется не только электрическими режимами работы компонентов схемы, но и температурными режимами эксплуатации.

Работа радиоэлементов в условиях повышенной, как и ламп подсвета ЖК-матрицы в условиях воздействия пониженной, температуры окружающей среды приводит к снижению их срока службы. В этой связи предлагаемые конструктивно-технические и схемные решения по обеспечению температурных режимов работы компонентов МФЦИ являются безусловно необходимыми и способствуют повышению надежностных характеристик работы изделия авионики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие. СПб: ГУАП, 2005. 144 с.
2. Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Бортовые средства отображения информации современных пилотируемых летательных аппаратов // Современные технологии / Под ред. С. А. Козлова и В. Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 154—165.
3. Жаринов И. О., Емец Р. Б. Индикационное оборудование в авиации XXI века // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2003. № 5 (11). С. 193—195.

4. Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. № 3. (14). С. 238—245.
5. Герасимов А. Н., Григорьева Н. Н., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Исаков В. И., Орлов А. П., Шенета А. П. Линейные системы автоматического управления: Учеб. пособие. СПб: ГУАП, 2009. 232 с.
6. Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 165—167.
7. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
8. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О. Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15—19.
9. Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Система бортовой картографической информации пилотируемых летательных аппаратов. Основные принципы построения // Сб. тр. 10-й Междунар. конф. „Теория и технология программирования и защиты информации“. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. С. 18—23.
10. Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А., Сударчиков С. А. Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.
11. Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нечаев В. А., Суслов В. Д. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 130—137.
12. Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Организация вычислительного процесса в многомашинном бортовом вычислительном комплексе // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 6. С. 41—50.
13. Гатчин Ю. А., Жаринов И. О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. М.: Машиностроение, 2010. 224 с.
14. Парамонов П. П., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 1—17.
15. Гатчин Ю. А., Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Модели и методы проектирования интегрированной модульной авионики // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2010. № 1. С. 12—20.

#### Сведения об авторах

- Игорь Олегович Жаринов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: igog\_rabota@pisem.net
- Олег Олегович Жаринов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра моделирования вычислительных и электронных систем; E-mail: zharinov73@hotmail.ru
- Павел Павлович Парамонов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры, Санкт-Петербург; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru
- Максим Олегович Костишин** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: maksim@kostishin.com
- Сергей Алексеевич Сударчиков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: s-a-sudarchikov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
11.02.14 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 53.082

В. В. ДАВЫДОВ, В. И. ДУДКИН, А. Ю. КАРСЕЕВ

## ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НУТАЦИОННЫМ ЯДЕРНО-МАГНИТНЫМ МАГНИТОМЕТРОМ НА ТЕКУЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрен метод измерения слабых магнитных полей нутационным ядерно-магнитным магнитометром на текущей жидкости. Экспериментально и теоретически определены технические требования как к элементам конструкции самого магнитометра, так и к параметрам текущей жидкости. Экспериментально исследованы рабочие жидкие среды, на наиболее перспективных опробована работа измерительного зонда магнитометра. Определены направления совершенствования разработанного магнитометра и улучшения его точностных характеристик.

*Ключевые слова:* магнитное поле, намагниченность, линия нутации, время продольной релаксации  $T_1$ , время поперечной релаксации  $T_2$ , отношение сигнал/шум.

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество вариантов применения как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях [1, 2]. К магнитометрам, применяемым в этих измерениях, предъявляют очень высокие требования по точности. Это связано с тем, что измерения магнитной индукции в большинстве случаев (пример — магнитные навигационные системы, геофизика и т.д.) производятся в полях, близких к полю Земли ( $B_3 = 31—56$  мкТл), а в некоторых случаях значительно ниже их [1, 3, 4].

Для проведения измерений используются различные типы магнитометров (протонные, СКВИД, феррозондовые, цезиевые с оптической накачкой, нутационные ядерно-магнитные на проточной жидкости), каждый обладает своими достоинствами и недостатками, которые определяют возможность применения при решении конкретных задач [5—7]. Наиболее широко используются квантовые магнитометры [1, 5].

Существует небольшой круг задач, для которых необходимо измерять слабое магнитное поле с высокой точностью в диапазоне 10—1000 нТл. В космическом пространстве (100—1000 нТл) успешно применяется ханле-магнитометр, но он непригоден для работы при индукции  $B < 100$  нТл, поскольку измерения осуществляются в пределах ширины линии регистрируемого оптического сигнала на атомах Rb-87 [8—10]. Кроме того, размеры его датчика (цилиндр, более 15 см в длину и 9 см в диаметре) накладывают ограничения на использование при контроле качества ферромагнитных экранов (размером от 10 см до нескольких метров по трем измерениям: экранированная комната для измерения магнитных полей биологических объектов) с коэффициентом экранирования  $10^{-4}—10^{-5}$ .

Конструктивные особенности феррозондовых магнитометров [2, 7] не позволяют с необходимой точностью проводить контроль качества экранов в лаборатории вследствие большого числа различных помех.

Калиевые магнитометры, обладающие высочайшими метрологическими характеристиками и устойчивостью к помехам [1], использовать нецелесообразно, так как их габариты (минимальные  $15 \times 20 \times 8$  см) позволяют измерить магнитное поле только в одной или нескольких точках, где расположена ячейка.

Одним из возможных решений этой задачи является использование проточного нутационного ядерно-магнитного (ЯМР) магнитометра, обладающего высокой точностью (индукция магнитного поля определяется по частоте ядерного резонанса), не нуждающегося в градуировке и простого в эксплуатации [7, 11, 12]. Высокие метрологические характеристики позволили использовать его в качестве первичного [13] и вторичного [14] средства измерения магнитной индукции. На основе нутационного тесламетра [15] был создан государственный специальный эталон единицы магнитной индукции [16].

В настоящей статье представлен нутационный ЯМР-магнитометр на проточной жидкой среде для измерения магнитных полей с индукцией  $10\text{—}1000$  нТл внутри ферромагнитных экранов.

Структурная схема разработанного нутационного ЯМР-магнитометра представлена на рис. 1 (1 — помпа; 2 — магнит-поляризатор; 3 — сосуд-поляризатор; 4 — катушка нутации; 5 — объем катушки нутации; 6 — соединительный участок трубопровода; 7 — сосуд-анализатор; 8 — катушка модуляции; 9 — магнит-анализатор; 10 — катушка регистрации; 11 — устройство регистрации сигнала ЯМР; 12 — осциллограф; 13, 14 — радиочастотные генераторы; 15 — частотомер). Жидкость от помпы 1 по трубопроводу поступает в сосуд-поляризатор 3, расположенный в магнитной системе 2, создающей сильное магнитное поле в зазоре между полюсными наконечниками  $d_n = 15$  мм с индукцией  $B_n = 0,67$  Тл ( $H_n = 533\ 165$  А/м), где она намагничивается до  $M_n = \chi_0 B_n$  ( $\chi_0$  — статическая ядерная магнитная восприимчивость). Далее жидкость по соединительному участку трубопровода 6 поступает в катушку нутации 4, где под действием резонансного переменного радиополя  $H_1$  изменяется ориентация вектора намагниченности ядерных моментов  $M_n$  относительно направления постоянного магнитного поля  $H_n$  [7, 8]. Это изменение соединительного участка трубопровода фиксируется катушкой регистрации сигнала ЯМР 10 (располагается в поле магнита-анализатора с  $B_a = 0,132$  Тл с неоднородностью  $0,8 \cdot 10^{-3}$  см $^{-1}$ , расстояние между полюсами  $d_a = 10$  мм) — элементом высокочастотного генератора слабых колебаний (автодина), входящего в состав устройства регистрации 11 [17—19]. Сигнал ЯМР поступает в цифровой блок обработки сигнала, осуществляющий его накопление, это позволяет проводить измерения при отношении сигнал/шум 1,2 [19, 20].

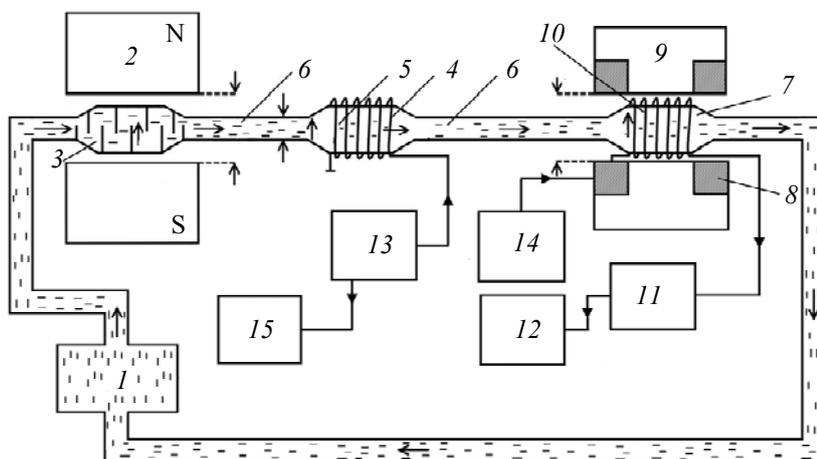


Рис. 1

Полная инверсия намагниченности  $M_n$  происходит на резонансной частоте  $\omega_n$  радиополя  $H_1$ , связанной с магнитным полем  $B_0$ , в котором находится катушка нутации, следующим образом [7, 13—15]:

$$\omega_n = \gamma B_0, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер.

Максимальный сигнал нутации наблюдается при некоторой амплитуде радиополя  $H_1$  с частотой  $\omega_n$ , равной частоте прецессии ядер в  $B_0$ . Ширина сигнала ядерного резонанса в этом случае складывается из естественной ширины линии  $\Delta f_{\text{ЯМР}}$  и уширений, вызванных неоднородностью внешнего магнитного поля и т.д. [21—23].

Внутри ферромагнитного экрана ширина сигнала нутации зависит от  $\Delta f_{\text{ЯМР}}$ , связанной со значением  $T_2$  текущей жидкости следующим соотношением [21—23]:

$$T_2 = 2/\Delta f_{\text{ЯМР}}. \quad (2)$$

Согласно работам [1—5, 9, 10], нижний предел измеряемого поля магнитометром не превышает  $\Delta f_{\text{ЯМР}}/\gamma$ . Из этого условия с учетом (2) было установлено, что при работе с полями  $B \sim 50$  нТл рабочая жидкость должна обладать  $T_2 > 3$  с.

На основании решения уравнений Блоха во вращающейся системе координат было получено условие максимального сигнала нутации [21, 24]:

$$\gamma H_1 \frac{V_n}{q} = \pi,$$

где  $V_n$  — объем катушки нутации (рис. 1, 5),  $q$  — расход жидкой среды.

Для описания процесса нутации используют величину  $\Delta t = V_n/q$  — время действия радиополя  $H_1$  на сегмент жидкости в катушке нутации.

В результате проведенных исследований на нутационном ЯМР-магнитометре (рабочая жидкость — водопроводная вода) при температуре  $t = 10,2$  °С было установлено, что полную инверсию намагниченности в катушке нутации можно получить при

$$\Delta t > T_n, \quad (3)$$

где  $T_n$  — период действия радиополя  $H_1$ ,  $T_n = 2\pi/\omega_n$ .

На рис. 2 представлены экспериментально полученные (при  $B_0 = 91 \cdot 10^{-6}$  Тл,  $V_n = 9,81 \cdot 10^{-3}$  мл) зависимости амплитуды сигнала нутации от расхода жидкости  $q$ . Кривые получены на частоте  $\omega_n$  для напряжений  $U_r$  (1 — 1,6; 2 — 2,5 В) генератора 13 (см. рис. 1) синусоидального колебания, подаваемого на катушку нутации.

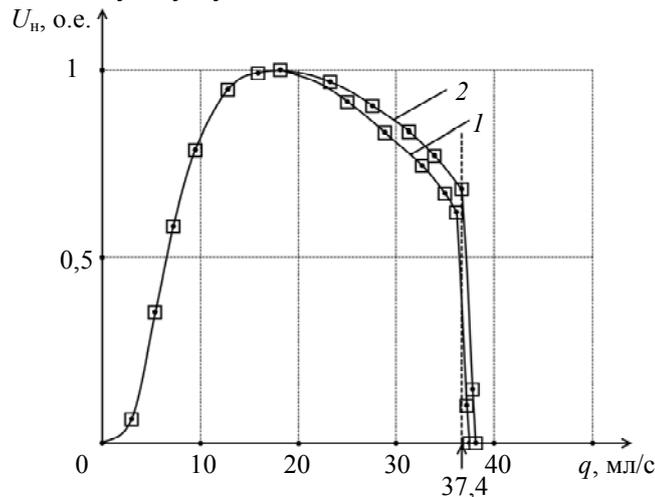


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что при невыполнении соотношения (3) компенсировать уменьшение амплитуды сигнала нутации изменением величины поля  $H_1$  (увеличением напряжения  $U_r$ ) невозможно.

При измерении полей с  $B = 50$  нТл в соответствии с (1) для протонных жидких сред частота нутации  $f_n = 2,1$  Гц, а  $T_n = 0,476$  с.

На основании проведенных исследований и сделанных расчетов, а также с учетом релаксационных процессов при протекании жидкой среды от поляризатора до анализатора [7, 11, 21, 24] были определены требования к рабочей жидкости: при температуре 15—40 °С должны выполняться условия  $T_1 > 7$  с,  $T_2 > 3$  с.

В настоящее время жидких сред с высокой текучестью (вязкость  $\eta < 3,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с) и такими константами релаксации нет. Наиболее близок по параметрам гептан ( $T_1 = 2,1$ ,  $T_2 = 1,2$  с, при температуре 28 °С). Поэтому для разработанного нами макета магнитометра сотрудниками Лаборатории химических и биотехнологий Национального технического университета Украины (НТУУ) „КПИ“ был изготовлен модифицированный раствор с использованием гидроксиданта ниобия. Раствор представляет собой светло-зеленую с резким запахом жидкость, которая устойчиво существует в диапазоне температур 0—65 °С. Число протонов в одном сантиметре кубическом составляет  $6,69 \cdot 10^{22}$  — данная жидкая среда хорошо намагничивается [15, 21—23].

На рис. 3, а и б представлены результаты экспериментальных исследований зависимости констант релаксации  $T_1$  и  $T_2$  модифицированного раствора (2) и гептана (1) от температуры, а на рис. 3, в — вязкости этих жидких сред (соответственно 2 и 1) и воды (3) от температуры, выполненных в НТУУ.

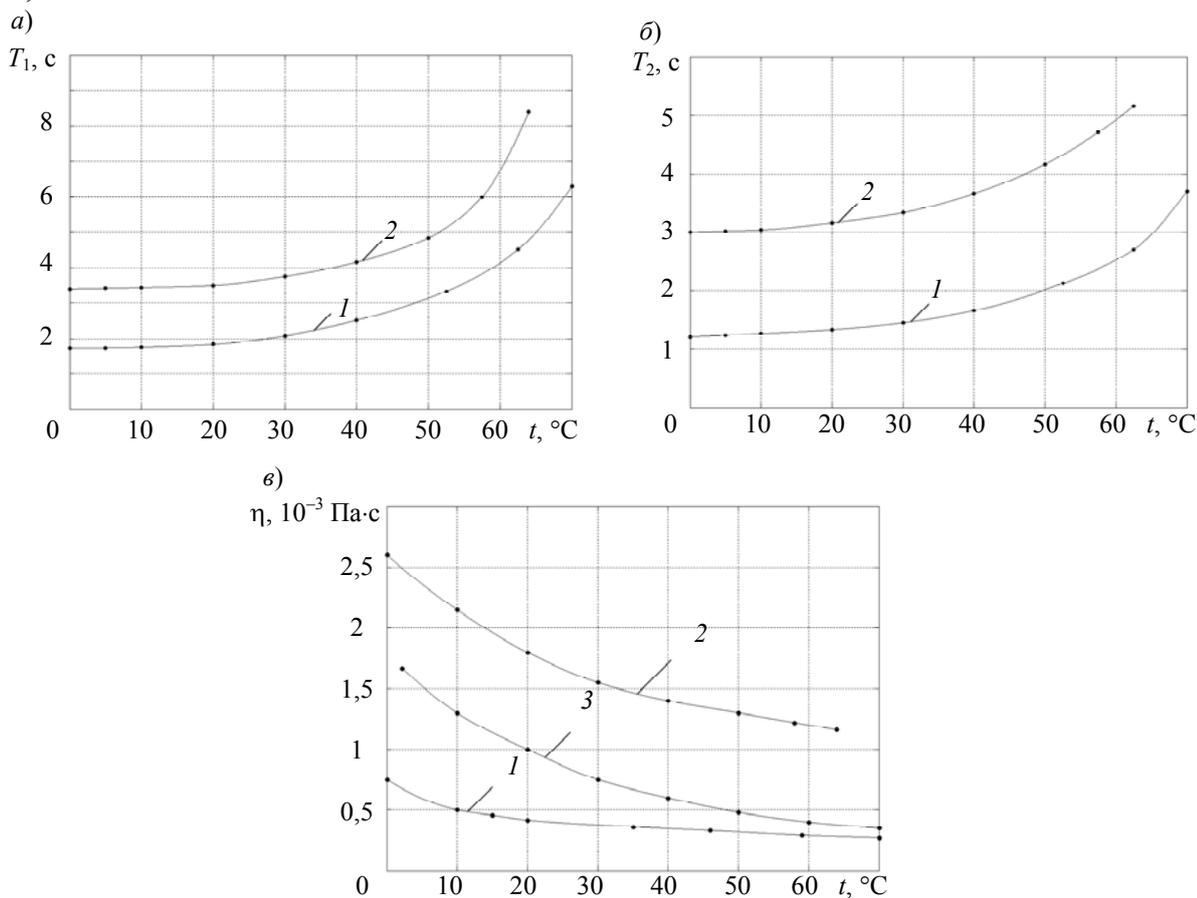


Рис. 3

Модифицированный раствор с некоторыми допущениями можно применить в качестве рабочей жидкой среды в нутационном ЯМР-магнитометре. Быстрое затухание сигнала ЯМР можно компенсировать использованием схемы накопления.

Для модифицированного раствора с учетом (3), а также того обстоятельства, что измерения необходимо проводить на расстоянии более 1,5 м от магнитных систем магнитометра,

было предложено несколько измерительных конструкций (зондов), которые включали в себя соединительные участки трубопровода  $b$  и катушку нутации  $4$  (см. рис. 1).

Оптимальным оказался вариант, в котором диаметр соединительного участка трубопровода составил  $d_T = 1,5$  мм. Длина каждого соединительного участка 2000 мм. Объем сосуда-поляризатора  $V_n = 42$  мл. В зоне размещения катушки нутации диаметр трубопровода был увеличен до 18 мм, как в [20]. Объем катушки нутации  $V_n = 12,72$  мл, сопротивление  $R_n = 1,38$  Ом, индуктивность  $L_n = 237$  мкГн. С целью уменьшения влияния релаксационных процессов на величину регистрируемого сигнала ЯМР при протекании жидкости от сосуда-поляризатора до анализатора измерения проводились при максимально допустимом для такого диаметра трубопровода расходе жидкости  $q = 3,0$  мл/с.

На рис. 4 представлен сигнал ЯМР, полученный при подключении измерительного зонда между поляризатором и анализатором. В качестве рабочей жидкости использовалась чистая вода с  $T_1 = 3,62$  с при  $t = 19,7$  °С. Модифицированный раствор при этой температуре обладает таким же значением  $T_1$  (рис. 3, *a*). Из рисунка видно, что амплитуда ЯМР-сигнала невелика из-за проходящих релаксационных процессов. Поэтому для увеличения отношения сигнал/шум была использована схема накопления (100 накоплений).

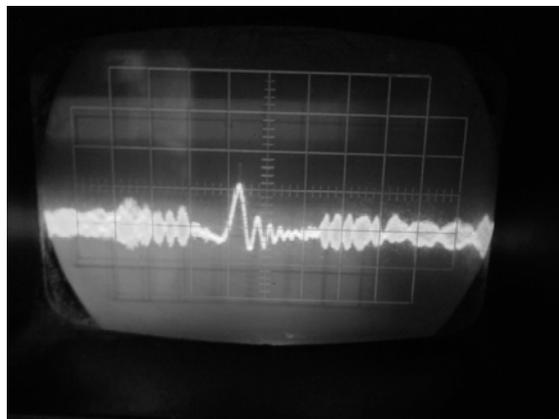


Рис. 4

На рис. 5 представлен сигнал ЯМР после накопления без инверсии намагниченности (рис. 5, *a*) и с инверсией (рис. 5, *б*). Измерения магнитного поля проводились внутри ферромагнитного экрана с коэффициентом экранирования более  $10^{-3}$ . Для определения магнитного поля внутри экрана было проведено десять измерений  $\omega_n$  при точной настройке генератора  $I3$  (см. рис. 1) на частоту измеряемого магнитного поля  $\omega_0 = \gamma B_0$ , что соответствует максимуму инвертируемого сигнала (рис. 5, *б*). Поле внутри экрана  $B_0 = 50,33 \pm 0,15$  нТл.

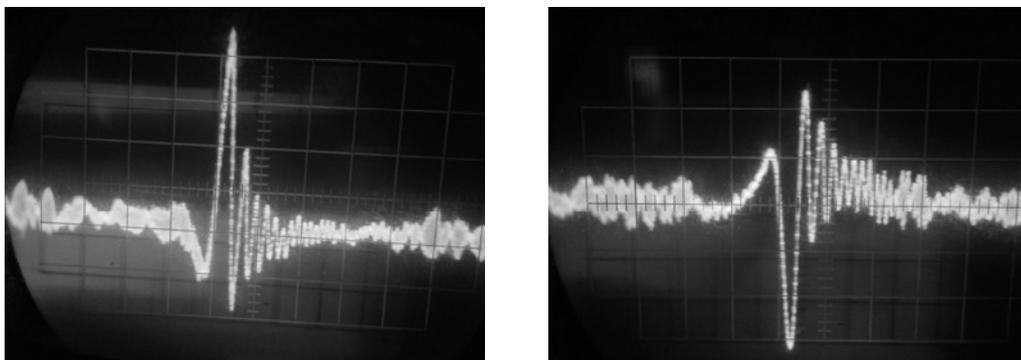
*a)**б)*

Рис. 5

Полученные результаты показали, что

— разработанный макет нутационного ЯМР-магнитометра пригоден для проведения измерения слабых магнитных полей, например, внутри ферромагнитного экрана;

— использованный модифицированный раствор имеет недостаточное значение  $T_1$  для проведения разработанным магнитометром эффективных измерений физических величин [25, 26]. Так как из-за релаксационных процессов (без использования схемы накопления) инвертированный сигнал ЯМР обладает низким отношением сигнал/шум, точная настройка генератора нутации на частоту поля  $B_0$  будет затруднена, поэтому предлагается использовать жидкую среду с более высоким  $T_1$ .

Для эффективного применения макета нутационного ЯМР-магнитометра необходимо в первую очередь изготовить жидкую среду с  $T_1 > 9$  с,  $T_2 > 4$  с в диапазоне температур 15—40 °С и вязкостью  $\eta < 2,0 \cdot 10^{-3}$  Па·с. Интерес с этой точки зрения представляют некоторые жидкие среды (см. таблицу), но у всех у них  $T_2$  порядка нескольких миллисекунд. А другие вещества, например чистый ацетон ( $T_2 \sim 19$  с), очень летучи, что в случае прорыва трубопровода создаст большие проблемы. Кроме того, при использовании сильно летучих веществ к конструкции проточного магнетометра будут предъявляться очень жесткие требования, выполнение которых может сделать предложенный нами метод измерения слабых магнитных полей нецелесообразным.

Жидкая среда	$T_1$ , с	$\eta$ , Па·с
Бензол	19,3	$0,44 \cdot 10^{-3}$
Чистый бензин	18,9	$0,51 \cdot 10^{-3}$
Чистый керосин	17,9	$1,32 \cdot 10^{-3}$
Толуол для кольцевых протонов	16,0	$0,42 \cdot 10^{-3}$
Ацетон	15	$0,25 \cdot 10^{-3}$
Хлорбензол	15	$0,33 \cdot 10^{-3}$
Этиловый эфир	14,5	$0,63 \cdot 10^{-3}$
Толуол для протонов группы $\text{CH}_3$	9,0	$0,46 \cdot 10^{-3}$

Возможность применения чистого бензина и керосина ограничивают требования по безопасности, кроме того при многократном контакте этих веществ с воздухом в помпе их времена релаксации могут уменьшиться до 3—5 с.

Наибольший интерес представляет смесь метилового спирта ( $T_1 = 8,2$  с) с небольшим количеством чистого бензола и муравьиной кислоты ( $T_1 = 8,0$  с). Проведенные опыты по смешиванию бензола с кислотами и солями [24] позволяли получать химические соединения с  $T_1 \geq 60$  с и  $T_2 \sim 20$ —30 с.

Увеличение значения индукции  $B_n$  за счет использования новых магнитных материалов позволит сократить время поиска резонансной частоты измерительного датчика регистрирующей системой в магнитном поле  $B_0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиоптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 6. С. 605—637.
2. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. Простое чувствительное устройство для измерения слабых магнитных полей на основе высокотемпературного сверхпроводящего иттриевого купрата // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 3. С. 81—85.
3. Вершовский А. К., Александров Е. Б. Устранение фазовой ошибки  $M_x$ -магнитометра и контроль формы линии резонанса в нестабильном поле методом инвариантного отображения сигнала спиновой прецессии // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 100, № 1. С. 23—25.
4. Александров Е. Б., Вершовский А. К., Пазгалев А. С. Магнитометр на симметричной паре переходов в сверхтонкой структуре Rb-87 // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 7. С. 103—107.
5. Александров Е. Б., Балабас М. В., Вершовский А. К. и др. Быстродействующий трехкомпонентный магнитометр-вариометр на основе цезиевого датчика // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 1. С. 115—120.

6. Александров Е. Б. Исследования в области магнитных полей. Л., 1978. 216 с.
7. Жерновой А. И. Измерение магнитных полей методом нутации. Л.: Энергия, 1979. 104 с.
8. Дудкин В. И., Пахомов Л. Н. Квантовая электроника. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2012. 496 с.
9. Померанцев Н. Н., Рыжков В. М., Скроцкий Г. В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 286 с.
10. Блинов Е. В., Гизбург Б. И., Житников Р. А., Кулешов П. П. Щелочно-гелиевый магнитометр с оптической ориентацией атомов калия // Журнал технической физики. 1984. Т. 54, № 2. С. 287—292.
11. Давыдов В. В., Семенов В. В. Нестационарный режим работы нутационных ЯМР расходомеров и магнитометров // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 3. С. 151—153.
12. Davydov V. V. The different work regimes of the nutation nuclear – magnetic flowmeter // Contemporary Technical Physics J. of Boston Physical Society. 1998. Vol. 9, N 3. P. 74—77.
13. ГОСТ 8.096-73. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции.
14. ГОСТ 8.144-75. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции в диапазоне 0.05—2 Тл.
15. Симонов В. М., Ягола В. К. Широкодиапазонный протонный тесламетр // Измерительная техника. 1975. № 10. С. 76—77.
16. Ягола Г. К., Казанцев Ю. И., Симонов В. М. и др. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции для диапазона 2—10 Тл // Измерительная техника. 1976. № 3. С. 52—53.
17. Давыдов В. В., Семенов В. В. Линия нутации ядерно-магнитного спектрометра с текущим образцом // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 12. С. 1528—1531.
18. Пряхин А. Е., Шушкевич С. С., Оробей И. О. и др. Ядерно-магнитный расходомер жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 6. С. 216.
19. Давыдов В. В., Карсеев А. Ю. Малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр для экспресс-анализа жидких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 87—92.
20. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Повышение точности измерения констант релаксации текущей жидкости в ядерно-магнитном спектрометре // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 64—68.
21. Жерновой А. И. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964. 254 с.
22. Лёше А. Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963. 678 с.
23. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1967. 686 с.
24. Бородин П. М., Мельников А. В., Морозов А. А., Чернышев Ю. С. Ядерный магнитный резонанс в земном поле. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. 232 с.
25. Кабардина С. И., Шефер Н. И. Измерения физических величин. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 152 с.
26. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. М.: Лань, 2005. 112 с.

#### Сведения об авторах

- Вадим Владимирович Давыдов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;  
E-mail: davydov\_vadim66@mail.ru
- Валентин Иванович Дудкин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;  
E-mail: vidoodkin@mail.ru
- Антон Юрьевич Карсеев** — студент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;  
E-mail: antonkarseev@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
квантовой электроники

Поступила в редакцию  
15.04.14 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 523.34. 536.2. 536.33. 536.58

Е. В. ЛАПОВОК, С. И. ХАНКОВ

## СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ БАЗИРУЕМОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ ОБЪЕКТА С ВНУТРЕННИМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ

Исследован стационарный тепловой баланс цилиндрического объекта, установленного на экваторе Луны, на солнечном и теневом ее участках. Показана возможность термостатирования внутреннего корпуса, отделенного от внешнего слоем теплоизоляции, на заданном температурном уровне с помощью проточного теплообменника при массовом расходе воды не более 5,5 г/мин.

*Ключевые слова:* стационарный тепловой баланс, цилиндрический объект, солнечный и теневой участки поверхности Луны, термостатирование корпуса.

**Введение.** В связи с предстоящим в ближайшие десятилетия освоением Луны актуальна задача разработки методов расчета тепловых режимов оптической, оптико-электронной, а также радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на ее поверхности. Такие методы необходимы для обоснованного выбора параметров систем обеспечения тепловых режимов (СОТР) объектов различного функционального назначения.

В литературе, посвященной космическим аппаратам, уделяется значительное внимание методам расчетов их теплового режима [1, 2]. В основном в литературе рассматриваются тепловые режимы космических объектов, движущихся по различным траекториям в околоземном пространстве. Исследованы также способы термостабилизации космических объектов при заходе в тень Земли и выходе из нее [3]. Меньше внимания уделено исследованию тепловых режимов объектов, размещаемых на других планетах. Анализ тепловых режимов объектов, размещаемых на поверхности Луны, проводился в ограниченной постановке [4, 5]. Остались неизученными основные факторы, определяющие энергетический баланс и тепловой режим объекта на Луне; не определена зависимость температуры объекта на подсвеченной Солнцем части поверхности Луны и на теневой от основных параметров. Кроме того, актуальна задача определения требований к параметрам СОТР, обеспечивающим термостабилизацию внутренней полости оболочечного объекта.

Цель настоящей работы — создание методики расчета средних температур оболочки объекта цилиндрической формы, находящегося на экваторе Луны, исследование полного теплового баланса и выявление наиболее значимых факторов, формирующих тепловой режим объекта, а также определение требований к параметрам СОТР, обеспечивающей термостабилизацию внутреннего корпуса объекта на заданном температурном уровне.

**Физическая модель процессов теплообмена объекта, базирующегося на поверхности Луны.** Необходимо конкретизировать форму и размеры, ориентацию его поверхностей

относительно поверхности Луны и источников тепловых воздействий. Нами рассматривается цилиндрический объект, ось которого перпендикулярна поверхности Луны. Схема размещения объекта, его структура, а также направление поглощаемых и отдаваемых тепловых потоков представлены на рис. 1 ( $P_s$  — поток от Солнца, падающий на верхний торец объекта, принято допущение — Солнце в зените;  $P_b$  — поток отраженного поверхностью Луны солнечного излучения, падающий на боковую цилиндрическую поверхность объекта;  $P_m$  — результирующий тепловой поток от нагретой поверхности Луны к боковой поверхности объекта;  $P_k$  — тепловой поток от поверхности Луны к объекту через нижний его торец;  $P_{bk}$  — лучистый тепловой поток от боковой поверхности объекта в холодный космос;  $P_{uk}$  — лучистый тепловой поток от верхнего торца объекта в холодный космос; 1 — наружный корпус; 2 — слой теплоизоляции; 3 — трубопровод теплообменника, размещенный на внутреннем корпусе; черные стрелки — тепловые потоки в спектре теплового инфракрасного излучения; белые — в спектре солнечного излучения).

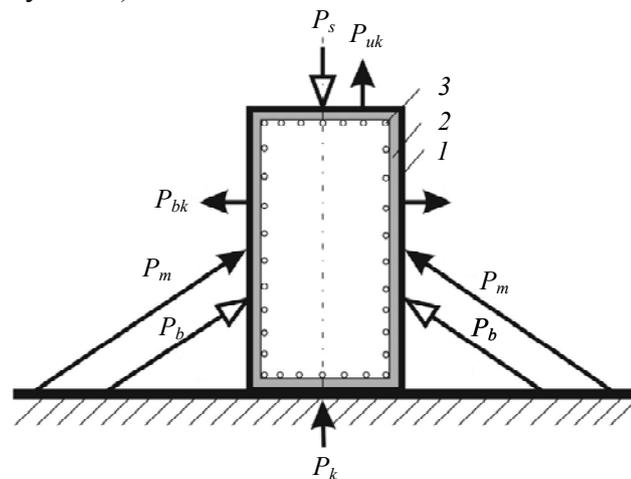


Рис. 1

Наружный прочный металлический корпус подвергается внешним тепловым воздействиям. Направления стрелок на рис. 1 для потоков  $P_m$  и  $P_k$  условны и могут меняться для освещенной Солнцем и теневой частей поверхности Луны.

Для уточнения особенностей физической (тепловой) модели объекта на поверхности Луны введем ряд допущений и ограничений:

- 1) исследуемый объект находится на лунном экваторе;
- 2) при нахождении объекта на освещенной Солнцем части поверхности Луны принимаются экстремальные условия нагрева, т.е. считается, что Солнце находится в зените. Ось объекта перпендикулярна поверхности Луны. Следует отметить, что незначительные отклонения оси объекта от вертикального положения (до  $10^\circ$ ) мало влияют на его тепловой режим [6];
- 3) при достаточно большой толщине и теплопроводности материала неравномерности распределения температуры по поверхности внешнего корпуса незначительны, что позволяет считать его изотермичным;
- 4) ввиду продолжительности лунного дня и ночи 29 земных суток [4] при ограниченных габаритах и массе, а также малой полной теплоемкости объекта можно считать, что реализуется стационарный тепловой режим объекта. Это позволяет проводить расчеты для крайних экстремальных ситуаций воздействия на объект потока солнечного излучения;
- 5) данные по температуре поверхности Луны в литературе несколько разнятся. Примем значения температуры поверхности Луны на ночной стороне  $T_m = 100$  К, а на освещенной части поверхности при Солнце в зените — 400 К, что близко к данным [4], однако соответствует минимально и максимально возможным значениям. Это позволяет определять наиболее жесткие требования к СОТР;

6) во всех расчетах внутренний корпус считается термостабилизированным на уровне 293 К и по этой температуре определяются требования к СОТР;

7) перепад температур между наружным и внутренним корпусами определяется только тепловым сопротивлением теплоизоляционного слоя (например, экранно-вакуумной теплоизоляции, ЭВТИ). Тепловое сопротивление ЭВТИ на всех поверхностях считается одинаковым и постоянным. Температурный перепад по толщине стенки наружного корпуса принимается пренебрежимо малым;

8) степень черноты, коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью наружного корпуса и тепловая проводимость ЭВТИ не зависят от температуры.

**Математическая модель теплового взаимодействия объекта с поверхностью Луны и с космическим пространством.** Уравнение стационарного теплового баланса наружного корпуса объекта на освещенной Солнцем стороне Луны можно представить в виде

$$P_s + P_b + P_m + P_k = P_{bk} + P_{uk} + P_h, \quad (1)$$

где  $P_h$  — тепловая мощность системы термостабилизации объекта;

$$P_s + P_b = \alpha_s E S_u + \alpha_s \varphi_k S_b A E = \alpha_s E S_u (1 + 4n\varphi_k A), \quad (2)$$

$\alpha_s$  — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью объекта;  $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$  — солнечная постоянная;  $S_u$  — площадь торца объекта;  $\varphi_k$  — комбинированный коэффициент облученности боковой поверхности объекта отраженным Луной солнечным излучением;  $S_b$  — площадь боковой поверхности объекта;  $A = 0,12$  — альбедо Луны.

В формуле (2) использованы площади поверхностей и их отношение:

$$S_u = \frac{\pi d^2}{4}; \quad S_b = \pi d L; \quad \frac{S_b}{S_u} = 4n; \quad n = \frac{L}{d}, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр объекта;  $L$  — высота объекта.

Тепловой поток от поверхности Луны через нижний торец объекта пропорционален величине контактной тепловой проводимости  $\sigma_k$ :

$$P_k = \sigma_k (T_m - T) = \alpha_k S_u (T_m - T), \quad (4)$$

где  $T$  — температура наружного корпуса объекта;  $\alpha_k$  — контактный коэффициент теплообмена границы раздела поверхности Луны и нижнего торца объекта.

Радиационные тепловые потоки в формуле (1) описываются соотношениями:

$$P_m = \varepsilon_e \varphi_b S_b \sigma (T_m^4 - T^4); \quad P_{bk} = \varepsilon (1 - \varphi_b) S_b \sigma T^4; \quad P_{uk} = \varepsilon S_u \sigma T^4, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_e$  — приведенная степень черноты  $\varepsilon$  между поверхностью Луны и боковой поверхностью объекта;  $\varphi_b$  — коэффициент облученности боковой поверхности объекта поверхностью Луны в спектре инфракрасного теплового излучения;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Мощность, необходимая для термостабилизации внутреннего корпуса, определяется из соотношения

$$P_h = \sigma_r (T - T_{in}) = \alpha_r S_\Sigma (T - T_{in}); \quad S_\Sigma = 2S_u + S_b, \quad (6)$$

где  $T_{in}$  — внутренняя температура объекта,  $\sigma_r$  — тепловая проводимость слоя теплоизоляции;  $\alpha_r$  — коэффициент теплопередачи через теплоизоляцию между наружным и внутренним корпусом.

Уравнение теплового баланса (1) с учетом соотношений (2)—(6) можно представить в виде

$$\begin{aligned} & \varepsilon (1 - \varphi_b) S_b \sigma T^4 + \varepsilon S_u \sigma T^4 + \varepsilon_e \varphi_b S_b \sigma (T^4 - T_m^4) = \\ & = \alpha_s S_u E + \alpha_s \varphi_k S_b A E + \alpha_k S_u (T_m - T) + \alpha_r (2S_u + S_b) (T - T_{in}). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) для исключения площадей поверхностей удобно с учетом (3) представить в виде

$$\begin{aligned} & \varepsilon(1-\varphi_b)4n\sigma T^4 + \varepsilon\sigma T^4 + \varepsilon_e\varphi_b4n\sigma(T^4 - T_m^4) = \\ & = \alpha_s E + \alpha_s\varphi_k4nAE + \alpha_k(T_m - T) + \alpha_r(2+4n)(T - T_{in}). \end{aligned} \quad (8)$$

В дальнейших расчетах примем поверхность Луны абсолютно черной, что соответствует условию  $\varepsilon = \varepsilon_e$ .

В работе [7] было показано, что при малой высоте над поверхностью Земли коэффициенты облученности площадки собственным тепловым излучением планеты и отраженным от нее солнечным излучением в случае нахождения Солнца в зените равны. Для Луны по аналогии с Землей указанные коэффициенты облученности вертикальной поверхности описываются соотношением [7, 8]:

$$\varphi_b = \varphi_k = \varphi = \frac{1}{\pi} \left( \arcsin \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\varphi_0} \sqrt{1 - \varphi_0} \right); \quad \varphi_0 = \left( \frac{R}{R+h} \right)^2, \quad (9)$$

где  $\varphi_0$  — коэффициент облученности поверхностью Луны плоской площадки, лежащей в плоскости местного горизонта;  $R$  — радиус Луны;  $h$  — высота над поверхностью Луны.

Для объекта на поверхности Луны  $h = 0$  и  $\varphi_0 = 1$ , при этом  $\varphi = 0,5$ .

Помимо вычисления зависимости температуры внешней оболочки цилиндра от степени черноты его поверхности проводились расчеты требуемой для термостабилизации внутреннего корпуса объекта удельной тепловой мощности, а также необходимого массового расхода теплоносителя (или хладагента).

Требуемый массовый расход  $M$  (в кг/с) определялся по формуле

$$M = \frac{Q_h S_u}{c(T_{in} - T_0)}; \quad Q_h = \alpha_r(2+4n)(T - T_{in}), \quad (10)$$

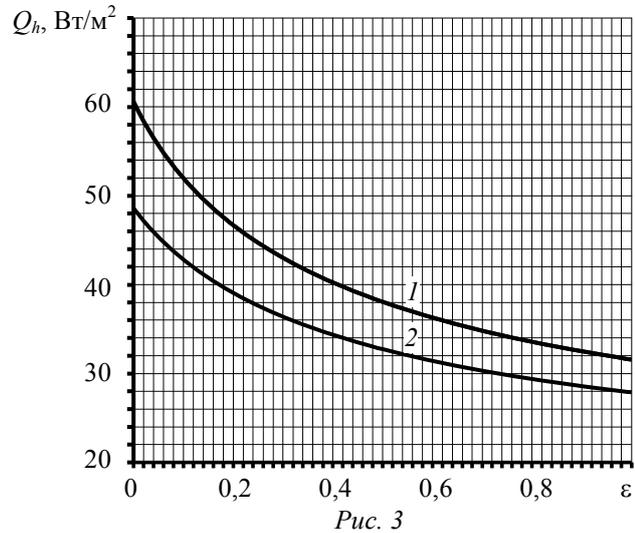
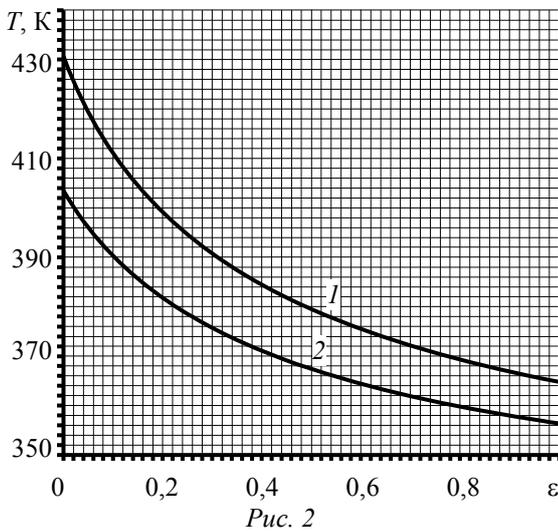
где  $Q_h$  — удельная мощность теплового потока, проходящего через теплоизоляцию от внешнего корпуса к внутреннему;  $c$  — удельная теплоемкость хладагента (теплоносителя);  $T_0$  — температура хладагента на входе в трубопровод теплообменника, установленного на внутреннем корпусе объекта.

Формула (10) соответствует условию полной рекуперации в трубопроводе, когда температура теплоносителя на выходе становится равной температуре охлаждаемой (нагреваемой) поверхности. Выбор необходимой для обеспечения этого условия длины трубопровода осуществляется на основе известных расчетных методик [9, 10]. В этом случае можно выбрать достаточно большую длину, при которой полная рекуперация будет осуществляться задолго до окончания трубопровода.

**Результаты расчетов.** В расчетах принимались значения параметров  $n = 5$ ,  $\alpha_k = 100$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $\alpha_r = 0,02$  и  $0,2$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $\alpha_s = 0,1$  и  $1$ . Расчеты проводились для случая вертикально ориентированного цилиндра при нахождении Солнца в зените и для теневого участка Луны.

На рис. 2 представлены зависимости температуры наружного корпуса исследуемого объекта при нахождении Солнца в зените от степени черноты его наружной поверхности для  $\alpha_s = 0,1$  (кривая 2) и  $1$  (1). Как видно из рисунка, температура наружного корпуса падает вследствие роста  $\varepsilon$  более существенно, чем вследствие уменьшения коэффициента поглощения солнечного излучения наружной поверхностью объекта. При уменьшении  $\alpha_s$  от  $1$  до  $0,1$  температура наружного корпуса снижается всего на  $20$  К (от  $410$  до  $390$  К) при  $\varepsilon = 0,1$  и менее чем на  $10$  К при  $\varepsilon = 1$ . В то же время при увеличении  $\varepsilon$  от  $0,1$  до  $1$  при  $\alpha_s = 1$  температура снижается с  $415$  до  $365$  К, т.е. на  $50$  К, а при  $\alpha_s = 0,1$  — с  $390$  до  $356$  К (на  $34$  К). Отсюда можно сделать вывод о необходимости использования абсолютно черного покрытия поверхности в спектре инфракрасного излучения, по возможности с минимальным коэффициентом поглощения солнечного излучения.

На рис. 3 приведены зависимости удельной мощности  $Q_h$ , необходимой для термостабилизации внутреннего корпуса ( $T_{in} = 293 \text{ K}$ ), от степени черноты поверхности наружного корпуса для тех же, что и на рис. 2, двух значений  $\alpha_s$ . Ход кривых полностью коррелирует с характером зависимостей  $T(\varepsilon)$  на рис. 2.



Как видно из рис. 3, для компенсации внешнего теплопотока требуются относительно небольшие значения  $Q_h$ . Например, при  $\varepsilon = 1$  и  $\alpha_s = 0,1$  достаточно обеспечить  $Q_h = 28 \text{ Вт/м}^2$ . При диаметре объекта  $0,24 \text{ м}$  и длине  $1,2 \text{ м}$  ( $n = 5$ )  $S_{ii} = 0,0452 \text{ м}^2$ . Тогда требуемая мощность всего  $P_h = 1,27 \text{ Вт}$ . В качестве хладагента целесообразно использовать воду, для которой  $c = 4200 \text{ Дж/(кг K)}$ , с начальной температурой  $T_0 = 283 \text{ K}$ . Тогда из (10) можно получить  $M = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} = 1,8 \text{ г/мин}$ . Такие характеристики легко достигаются с использованием малогабаритных насосов и устройств термостабилизации воды с отдельным теплообменником.

Расчетные исследования показали, что на теневой (ночной) стороне Луны температура наружного корпуса объекта практически не зависит от степени черноты его поверхности. Значительно больше температура зависит от качества теплоизоляции. Для  $\alpha_r = 0,02 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$  при увеличении  $\varepsilon$  с 0 до 1 температура объекта падает линейно с  $99,2$  до  $98,6 \text{ K}$ , т.е. всего на  $0,6 \text{ K}$ . При  $\alpha_r = 0,2 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$  в тех же пределах изменения  $\varepsilon$  температура также линейно уменьшается от  $91,2$  до  $90,9 \text{ K}$ . В любом случае температура поверхности наружного корпуса ниже температуры поверхности Луны. Увеличение коэффициента теплопередачи изоляции  $\alpha_r$  на порядок (от  $0,02$  до  $0,2 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$ ) приводит к понижению температуры наружного корпуса на  $7,7 \text{ K}$ .

На теневой стороне Луны большее влияние величина  $\alpha_r$  оказывает на требуемую для термостабилизации внутреннего корпуса удельную тепловую мощность  $Q_h$ . При  $\alpha_r = 0,02 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$  значение  $Q_h$  падает от  $-85,31$  до  $-85,54 \text{ Вт/м}^2$ , т.е. на  $0,23 \text{ Вт/м}^2$  (или на  $0,27 \%$ ) при увеличении  $\varepsilon$  от 0 до 1. При увеличении  $\alpha_r$  на порядок (до  $0,2 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$ ) необходимая величина  $Q_h$  также возрастает на порядок и падает по линейному закону от  $-888 \text{ Вт/м}^2$  при  $\varepsilon = 0$  до  $-889 \text{ Вт/м}^2$  при  $\varepsilon = 1$ . Отсюда следует вывод о необходимости обеспечения качественной теплоизоляции. Значение  $\alpha_r = 0,02 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$  вполне допустимо. Из соотношения (10) при  $T_0 = 303 \text{ K}$  можно получить  $P_h = 3,8 \text{ Вт}$  и  $M = 5,5 \text{ г/мин}$ , что в три раза больше требуемого массового расхода на дневной части поверхности Луны. Такой расход и температуру воды также нетрудно обеспечить, используя компактный электронагреватель.

Анализ баланса тепловых потоков для освещенной Солнцем поверхности Луны позволил сделать вывод о преобладающем вкладе трех удельных тепловых потоков при  $\varepsilon = 1$ : отдаваемого боковой поверхностью объекта в космическое пространство (до  $10 \text{ кВт/м}^2$ ), отдаваемого от боковой поверхности объекта к поверхности Луны (до  $3,5 \text{ кВт/м}^2$  при  $\alpha_s = 1$

и 4,3 — при 0,1), а также отдаваемого через контакт наружного корпуса с лунной поверхностью (до  $450 \text{ Вт/м}^2$  при  $\alpha_s = 1$  и до  $420 \text{ Вт/м}^2$  при 0,1). При  $\alpha_s = 1$  удельный поток  $Q_k = P_k/S_u$  переходит в область отрицательных значений при  $\varepsilon < 0,2$ , когда, в соответствии с рис. 2, температура наружного корпуса превышает 400 К, т.е. температуру поверхности Луны.

На теневой части поверхности Луны наибольший вклад в энергетический баланс вносят потоки: отдаваемый боковой поверхностью объекта в космическое пространство (до  $52 \text{ Вт/м}^2$ ), отдаваемый от боковой поверхности объекта к поверхности Луны (до  $3,5 \text{ кВт/м}^2$ ), передаваемый от поверхности Луны к корпусу объекта через контакт с нижней торцевой поверхностью ( $180 \text{ Вт/м}^2$ ), а также отдаваемый от внутреннего корпуса к внешнему через слой теплоизоляции ( $-70 \text{ Вт/м}^2$  при  $\alpha_r = 0,02 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ ) независимо от степени черноты поверхности наружного корпуса).

**Выводы.** Исследованный объект представляет собой термостат, помещенный в слой теплоизоляции и защищенный от внешних воздействий прочным наружным корпусом. Исследование теплового баланса такого оболочечного объекта на поверхности Луны позволило определить требования к системе термостабилизации внутреннего корпуса при заданном температурном уровне.

В результате можно сформулировать следующие выводы:

1) для термостабилизации внутреннего объема с аппаратурой на уровне  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  целесообразно применять водяное охлаждение и использовать теплообменник в виде трубопровода на внутреннем корпусе. Такая система экономична, она требует электрической мощности до  $\pm 4 \text{ Вт}$  на теневой и освещенной Солнцем стороне Луны. За лунные сутки затраты энергии не превысят  $400 \text{ кДж}$ , или  $110 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ;

2) расход воды в контуре не превышает  $5,5 \text{ г/мин}$ . На солнечной стороне Луны достаточно обеспечить температуру воды на входе в теплообменник  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на теневой стороне  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это может быть реализовано с использованием регулятора электрической мощности и тепловыделений с отдельным теплообменником, изолированным от внешних тепловых воздействий;

3) в порядке значимости основных параметров следует отметить необходимость обеспечения максимальной степени черноты внешней поверхности наружного корпуса и по возможности — минимального коэффициента поглощения солнечного излучения; весьма важно качество теплоизоляции между внутренним и наружным корпусами. Тепловая развязка основания цилиндра с поверхностью Луны в рассмотренном случае существенного влияния не оказывает;

4) при выборе материала наружного корпуса и типа покрытия на нем необходимо учитывать значительные перепады температур днем и ночью, которые могут достигать для абсолютно черной поверхности наружного корпуса  $260 \text{ К}$  (от  $360$  до  $100 \text{ К}$ );

5) предложенная методика расчета легко может быть использована для объектов других конфигураций (параллелепипед, конус и др.) и для произвольной ориентации оси объекта относительно плоскости местного горизонта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
2. Залетаев В. М., Капинос Ю. В., Сургучев О. М. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1971. 317 с.
3. Баева Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 56—61.
4. Космические аппараты / Под общ. ред. К. П. Феоктистова. М.: Воениздат, 1983. 319 с.

5. *Wong-Swanson B.* Factors which affect heat rejection system design for lunar production systems // AIAA and SSI. 1991. P. 1—6.
6. *Дзгоев А. М., Ханков С. И.* Методика расчета коэффициентов облученности цилиндрического космического объекта подсветкой Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 145—150.
7. *Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. СПб: НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2006. 186 с.
8. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. *Г.П. Петрова*. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
9. *Ханков С. И.* Теоретические основы теплового проектирования теплонагруженных узлов оптико-электронных систем. СПб: НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2002. 182 с.
10. *Дзгоев А. М., Ханков С. И.* Методика оптимизации параметров криостатируемого экрана в криогенно-вакуумном стенде // Вестник международной академии холода. 2014. № 1. С. 11—15.

**Сведения об авторах**

- Евгений Владимирович Лаповок** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга, Санкт-Петербург;  
E-mail: leva0007@rambler.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Университет ИТМО, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга, Санкт-Петербург;

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики и  
энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
08.09.14 г.

А. А. БАГДАСАРОВ, О. В. БАГДАСАРОВА, Е. В. ДАНЧИНА

## РУЧНАЯ ЩЕЛЕВАЯ ЛАМПА НА БАЗЕ МИКРОСКОПА ГРЕНУ ДЛЯ ОФТАЛЬМОЛОГИИ

Рассмотрено современное состояние аппаратного обеспечения офтальмологии, предложено одно из направлений разработки портативных малогабаритных исследовательско-диагностических устройств, в частности, ручной щелевой лампы для проведения оперативной диагностики передней и задней камер глаза. Приведен пример расчета первой отечественной ручной щелевой лампы.

*Ключевые слова:* офтальмология, щелевая лампа, микроскоп, освещение, инвариант, апертура.

Согласно современной статистике, более двух миллиардов людей на Земле имеет проблемы со зрением. В связи с интенсивной механизацией, компьютеризацией большинства отраслей, возросшим объемом информации, воспринимаемой глазами, значительно возрастает нагрузка на зрительный нерв, что провоцирует развитие зрительных расстройств [1]. В связи с этим задача ранней массовой диагностики и контроля зрения имеет важное социальное значение [2].

Современная офтальмология представляет собой высокотехнологичное направление медицины, офтальмологическое обследование предполагает использование целого ряда методов, а также приборов для диагностики глазных заболеваний [3—10]. Одним из таких приборов является фундус-камера [8] — цифровой прибор, предназначенный для визуального наблюдения состояния глазного дна и получения его подробного полноцветного видеофотоизображения и, по сути, одного из самых достоверных и полезных инструментов, используемых в офтальмологии.

Для точной постановки диагноза могут понадобиться и другие приборы (например, щелевая лампа, гониоскоп, кампиметр, периметр). Обследование с помощью щелевой лампы необходимо при выявлении повреждений роговицы.

Собственно щелевая лампа — аппарат, позволяющий проводить биомикроскопический анализ видимых частей глаза — век, склеры, конъюнктивы, радужки, хрусталика и роговицы. Лампа состоит из источника узконаправленного света и бинокулярного микроскопа (иногда — с возможностью фотосъемки).

Стационарные и широко в последние годы применяемые ручные щелевые лампы базируются на едином принципе работы [3, 4] — проекции изображения щели в осветительном канале на исследуемый глаз.

На рис. 1 представлена схема стационарной щелевой лампы ЩЛ-3Г (1 — лампа накаливания; 2 — коллектор; 3 — диафрагма; 4 — щелевая диафрагма; 5 — светофильтры; 6 — объектив (конденсор); 7 — апертурная диафрагма; 8 — призма; 9 — линза Хруби; 10 — матовое стекло;

11 — поляроид; 12 — объектив микроскопа; 13 — галилеевские телескопические системы; 14 — бинокулярная приставка).

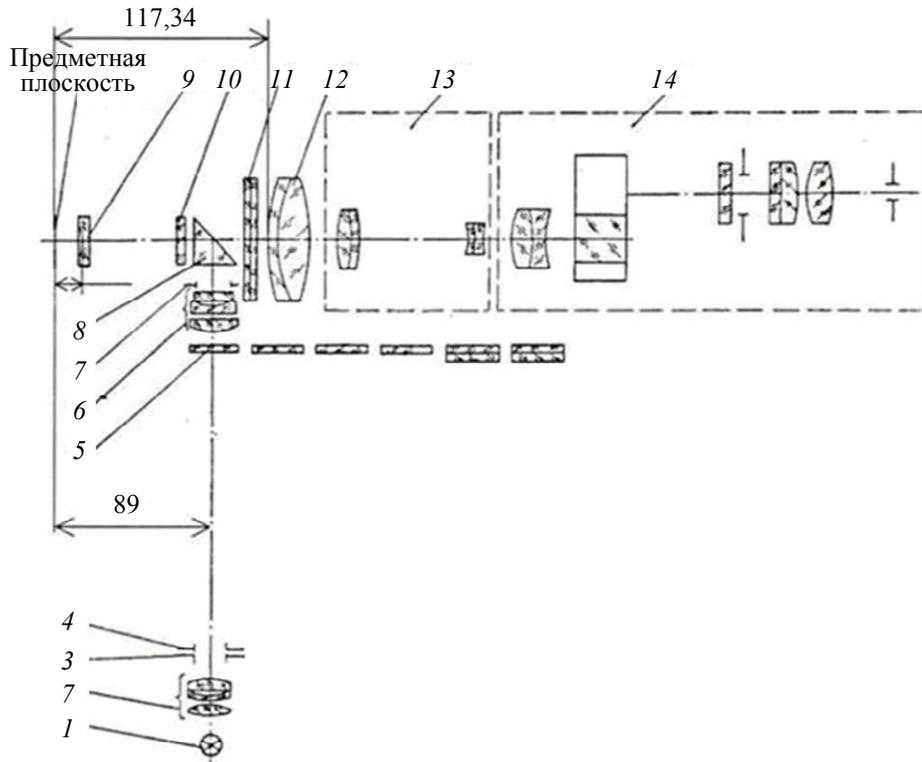


Рис. 1

Форма светового пучка задается щелевой диафрагмой, входящей в оптическую систему осветителя, строящей изображение щелевой диафрагмы на оси вращения осветителя. Исследуемый участок глаза должен быть совмещен с изображением щелевой диафрагмы, пучок света, ограниченный ею, подобен световому „ножу“. Проходя через прозрачные среды глаза, световой „нож“ образует „оптический срез“ — главный объект исследования, выполняемого с помощью бинокулярного микроскопа, позволяющего в этом узком пучке обнаружить помутнения в роговице, хрусталике, стекловидном теле. Для изучения состояния глазного дна применяется офтальмоскопическая отрицательная линза (линза Хруби), которая позволяет рассматривать участок диаметром 5—6 мм.

Существенно расширяет возможности исследования то, что „оптический срез“ можно рассматривать в бинокулярный микроскоп под различными углами. С этой целью осветитель и микроскоп вращаются вокруг вертикальной оси, совпадающей с серединой лобно-подбородной опоры прибора, они могут поворачиваться на  $\pm 60^\circ$ , при угле между ними от 0—120°. При любой величине этого угла оси осветителя и микроскопа пересекаются в одной точке — там, где должен быть расположен исследуемый глаз.

При биомикроскопии глаза обеспечиваются:

— диффузное освещение, создаваемое при максимально открытой щели, что позволяет получать наиболее широкий пучок света. С помощью этого вида освещения можно производить предварительный осмотр всех участков переднего отдела глаза;

— прямое фокальное освещение — плоскость изображения щели осветителя совпадает с фокусом микроскопа, что позволяет выделять и осматривать какой-либо участок глаза (с точки зрения микроскопостроения этот вид освещения относится к боковому освещению по методу темного поля);

— не прямое освещение — участок глазного яблока исследуется в отраженном свете. Источником света является соседний, ярко освещенный участок, на который фокусируют ос-

ветитель, а фокус микроскопа расположен в зоне, освещаемой непрямим светом. С помощью такого метода удастся обследовать глубокие слои непрозрачных тканей;

— проходящий свет применяют для осмотра прозрачных сред глаза. Для этого следует позади исследуемой ткани в какой-либо плоскости получить путем фокусировки осветителя яркое освещение. Отраженные от непрозрачной ткани лучи освещают исследуемый участок, на который фокусируется микроскоп;

— метод зеркального поля, используемый в биомикроскопических исследованиях в отраженных от зеркальных поверхностей (например, роговицы и хрусталика) лучах;

— скользящий луч (осветитель ставится перпендикулярно микроскопу) — подобный вид освещения дает возможность хорошо рассмотреть рельеф оболочек глаза, особенно радужки.

Разворот призмных систем вокруг оптических осей левой и правой ветвей бинокулярной приставки позволяет согласовывать расстояния между осями окуляров с межзрачковым расстоянием глаз врача.

При добавлении отрицательной линзы Хруби (см. рис. 1, 9) оптическая система стереомикроскопа преобразуется в телескопическую, которая позволяет исследовать задний отдел глаза, включая сетчатку.

При обследовании сред глаза в поляризованном свете совместно с поляроидом-светофильтром 5 используют поляроид 11 (анализатор), вращением которого вокруг оптической оси стереомикроскопа устраняются блики, появляющиеся на изображении исследуемой поверхности.

Как показала практика, расчет визуальных каналов и системы освещения производится в предположении плоской поверхности освещаемого и рассматриваемого объекта, несмотря на то что передняя поверхность роговицы имеет определенную кривизну (порядка 7,7 мм) [10], что при диаметре освещаемого поля 15 мм дает расфокусировку порядка 6 мм. Однако мгновенное поле зрения, в пределах которого четко с высоким разрешением виден рассматриваемый объект, не превышает 1,5—2° [11], а процесс рассматривания объекта заключается в последовательном его сканировании по полю с последующей аккомодацией. Исходя из сказанного, с учетом глубины резкости системы „прибор—глаз“ и, в первую очередь, объема аккомодации эметропического глаза  $\approx 8D$  [10], можно считать такой подход к расчету оптики прибора оправданным, что и подтверждает практика использования щелевых ламп.

Для оперативного диагностирования требуется разработка портативных малогабаритных исследовательско-диагностических устройств, в том числе и ручной щелевой лампы, для возможности проведения оперативной диагностики передней и задней камер глаза как в амбулаторных, так и в домашних условиях.

Подобные параметры присущи всем выпускаемым в настоящее время ручным щелевым лампам. Компактность и высокие эксплуатационные качества сочетают в себе ручные щелевые лампы HSL150 (фирма HEINE, Германия), XL-1 (ShinNippon, Япония).

На рис. 2 представлены внешний вид, на рис. 3 — схема ручной щелевой лампы SL-15 японской фирмы KOWA (*a* — вид сверху, *b* — вид сбоку; 1 — корпус призмы, 2 — окуляры, 3 — линзы объектива, 4 — угловая шкала — показывает угол наклона кронштейна осветительной лампы, 5 — диск выбора щели, 6 — тумблер включения/выключения света, 7 — съемная верхняя крышка, 8 — диск выбора яркости/фильтра, 9 — крышка съемного блока питания, 10 — соединяемый кронштейн, 11 — рукоятка, 12 — корпус лампы, 13 — крышка лампы, 14 — рукоятка выбора увеличения [12]), а в табл. 1 — ее технические характеристики.

В стационарных стереоскопических щелевых лампах используется микроскоп однообъективный с устройством для перемены увеличения, а в ручных — два микроскопа по типу Грену [10].



Рис. 2

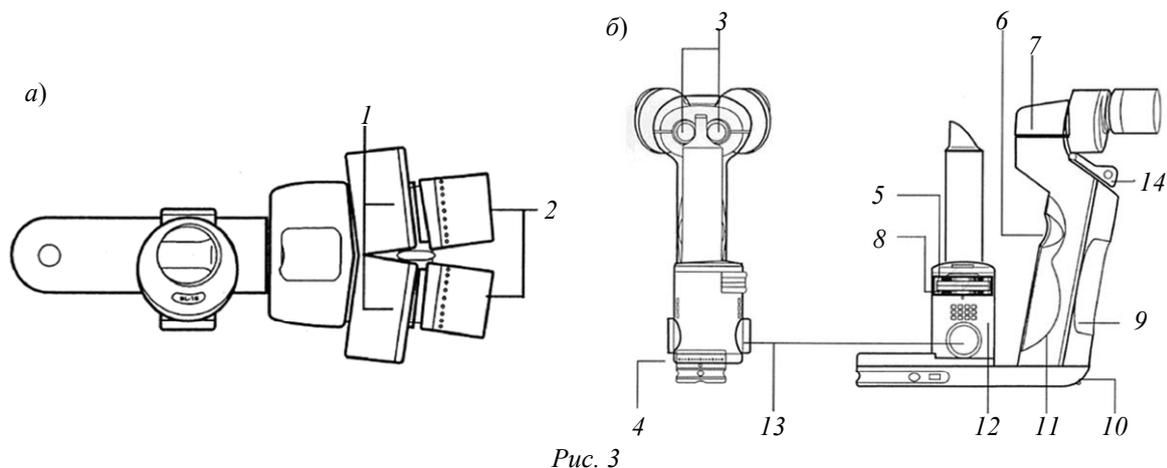


Рис. 3

Таблица 1

Технические характеристики щелевой лампы SL-15

Микроскоп	
Тип	Бинокулярный прямой, производящий реальное изображение
Угол конвергенции, ...°	13
Увеличение, крат	16 и 10
Рабочее расстояние, мм	~80 (16 <sup>х</sup> ), ~100 (10 <sup>х</sup> )
Поле зрения, мм	10 (16 <sup>х</sup> ), 15 (10 <sup>х</sup> )
Диоптрийная коррекция окуляров	От -8D до +4D
Визирное перекрестие	Встроено в оба окуляра
Проектор щели	
Выбор щели	Револьверный
Длина щели, мм	12, фиксированная
Ширина щели, мм	0,1; 0,2; 0,8; диаметр пятна 12 мм
Регулировка яркости	Полная, 1/4, 1/16
Угол проекции щели, ...°	±60, горизонтальный
Фильтры	Встроенные, синий
Источник света	Галогеновая лампа 7,5 В, 15 Вт
Продолжительность непрерывного освещения, мин	≈40
Дополнительно	
Элемент питания	8,4 В, 15 Вт
Размеры, вес	Главный блок: 221×106×214 мм, 700 г

В микроскопах по схеме Грену поверхность объекта развернута на угол, равный половине угла конвергенции (13—15°), что приводит к незначительному различию увеличения для противоположных краев поля зрения в сагиттальной плоскости и дополнительной расфо-

кусировке изображения, но меньшей, чем расфокусировка, вызванная кривизной передней поверхности роговицы. Как уже было сказано выше, эта разница нивелируется глубиной резкости системы „прибор—глаз“.

Следует отметить, что схема Грену была предложена еще в XIX в., но широкого применения в оптических стереоскопических приборах не нашла. Этому способствовал ряд причин, в частности, неудобство наблюдения, требование устранения расхождения аккомодации и конвергенции. Однако опыт применения ручных щелевых ламп показал перспективность разработки таких приборов.

В России разработки ручной щелевой лампы с параметрами, не уступающими вышеперечисленным, а в ряде случаев и превосходящими их, были начаты в 2013 г.

В табл. 2 представлены технические требования к разработке визуальной части прибора при условии соблюдения постоянного расстояния между наблюдаемым объектом и окулярной плоскостью микроскопа для всех увеличений. Предложенный микроскоп с габаритными параметрами, схожими с параметрами прибора (см. рис. 2, 3 и табл. 1), дополнительно обеспечивает наблюдение прямого изображения при большем увеличении ( $25,6\times$ ) за счет применения окуляра с увеличением  $\Gamma_{ок} = 16\times$ .

Таблица 2

Параметры визуальной системы ручной щелевой лампы			
Оптические характеристики			
Увеличение микроскопа, крат	10	16	25,6
Линейное поле зрения в плоскости предметов, не менее, мм	15	10	5
Рабочее расстояние микроскопа, мм	100	80	80
Угол конвергенции, ...°	13	13	13
Увеличение объектива, крат	1,0	1,6	1,6
Увеличение окуляра, крат	10	10	10; 16
Удаление выходного зрачка, мм	20	20	20

Одно из преимуществ разработанного микроскопа — требование большого выноса выходного зрачка для окуляров (20 мм), при таком выносе окуляры должны иметь диоптрийную подвижку  $\pm 8D$ .

Для обеспечения компактности прибора ограничен световой диаметр линз объективов микроскопа (не более 10 мм) при относительной простоте всей композиции. Выходная призма оптической системы осветительного устройства должна иметь размеры  $20\times 20\times 10$  мм (10 мм — толщина).

Рассчитанные объективы микроскопа представляют двухкомпонентную систему из склеенной и простой линз с входной числовой апертурой 0,04 и 0,05 для увеличения  $1\times$  и  $1,6\times$  соответственно.

Окуляр с увеличением  $\Gamma_{ок} = 10\times$  композиционно соответствует схеме Кельнера [13]. Как известно, обычный вынос выходного зрачка в схеме Кельнера составляет порядка половины от фокусного расстояния окуляра, что при фокусном расстоянии окуляра с указанным увеличением и угловом поле за окуляром  $\sim 45\text{—}50^\circ$  должно быть около 13 мм. В разработанном варианте за счет несколько меньшего поля ( $2\omega = 37^\circ$ ) удалось обеспечить вынос выходного зрачка 20 мм.

Однако для окуляра с  $\Gamma_{ок} = 16\times$  ( $f'_{ок} = 15,6$  мм) вынос выходного зрачка до 20 мм при условии сохранения высокого качества изображения невозможен без усложнения композиции окуляра Кельнера.

Очевидно, что усложнение композиции не должно было повлиять ни на фокусное расстояние, ни на сферическую aberrацию в зрачках окуляра. Оптимизация разработанной

композиции сопровождалась постоянным контролем системообразующих критериев качества изображения (сферической и полевых аберраций, а также дисторсии и хроматизма увеличения). Отрицательная линза при этом приблизилась к предметной плоскости окуляра, но на расстояние, достаточное для осуществления диоптрийной подвижки окуляра в диапазоне 8D.

В целом при всех увеличениях микроскопа разрешающая способность наблюдения в пределах полей зрения превышала 90 лин/мм.

Расчет осветительной системы щелевой лампы был проведен в соответствии с условием освещения по методу Келера [14], когда изображение светящегося тела (светодиода высокой яркости с размером площадки 1,8×1,8 мм, диагональ 2,5 мм) совпадает с выходной гранью прямоугольной призмы канала освещения и является выходным зрачком системы. Изображение щели осветительного канала с максимальным размером щели 12 мм проецируется на объект — глаз пациента.

В этом случае благодаря выпуклой форме передней поверхности роговицы глаза с достаточно большой кривизной, а также значительной аберрации широких наклонных пучков, возникающей при отражении от этой поверхности, отраженный в сторону глаза свет распространяется в пределах широкого угла, намного перекрывающего расчетные числовые апертуры объективов микроскопа.

В такой ситуации числовая апертура осветительной системы в пространстве обследования будет определяться размерами светового пятна на выходной грани прямоугольной призмы и расстоянием от призмы до глаза (в рассматриваемом случае 54 мм).

Когда размер засвеченной области больше выходной грани прямоугольной призмы осветителя (20×10 мм), с учетом фасок на ребрах призмы и аберраций в прямом ходе лучей (от светящегося тела на глаз) можно положить для исходного шага в расчетах диаметр светящегося пятна 8 мм.

В этом случае числовая апертура в пространстве обследования

$$A' = \frac{8}{2} \cdot 54 = 0,074. \quad (1)$$

В соответствии с работой [10] в любом пространстве инвариант Лагранжа—Гельмгольца

$$I = n\alpha l = n'\alpha' l', \quad (2)$$

где  $n$  и  $n'$  — показатели преломления рассматриваемых сред,  $\alpha$  и  $\alpha'$  — апертурные углы в средах,  $l$  и  $l'$  — размеры изображений в средах, при  $n = n' = 1$   $I = 15 \cdot 0,074 = 1,11$  (15 мм — максимальный размер изображения щели на объекте).

Со стороны светящегося тела при его размерах (1,8×1,8) входная числовая апертура коллектора ( $A_{\text{кол}}$ ), характеризующая угол охвата коллектора, определится как

$$A_{\text{кол}} = 1,11 / 2,5 = 0,44.$$

В этом случае можно использовать одну линзу с одной асферической поверхностью, если не использовать асферических линз, коллектор будет состоять из двух линз. В предложенном варианте осветительной системы линзы выполнены из кварцевого стекла, обладающего большей теплостойкостью, чем обычное стекло.

В разработанном варианте осветительной системы удалось при двухкомпонентной схеме коллектора с фокусным расстоянием 14,53 мм получить расстояние от светящегося тела до первой линзы коллектора в прямом ходе световых лучей 10,15 мм, что позволяет разместить в этом пространстве тепловые фильтры и светофильтры.

Конденсор, обеспечивающий проекцию изображения щелевой диафрагмы на обследуемый объект (глаз) с линейным увеличением в прямом ходе световых лучей  $-1,25\times$  выполнен из двух двусклеенных линз с эквивалентным фокусным расстоянием 52,8 мм.

Общая длина осветительной системы от светящегося тела до выходной грани прямоугольной призмы ~190 мм, применены широко известные отечественные марки стекол.

Допуски на изготовление оптических элементов соответствуют среднестатистическим, применяемым в отечественном оптическом приборостроении.

**Заключение.** В настоящее время специалисты-офтальмологи располагают большим количеством разнообразных приборов, предназначенных для проведения всесторонних исследований и диагностирования. Тенденции развития в проектировании этой аппаратуры базируются на внедрении современных базовых элементов с асферической оптикой, а также разработке малогабаритных портативных ручных приборов для оперативного исследовательско-диагностического выявления патологий медицинского характера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нарушение зрения: причины, симптомы, лечение и профилактика. 2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.domadoctor.ru/179-narushenie-zreniya.html>>.
2. Нанотех-экспресс. Разработка методов и оптических приборов нового поколения для широкого использования в офтальмологии, включая диагностику и коррекцию зрения. 2012 [Электронный ресурс]: <<http://www.nanotech-express.ru/projects/Optics/index.html>>.
3. Урмахер Л. С. Справочник по офтальмологической оптике и приборам. М.: Медицина, 1971. 189 с.
4. Урмахер Л. С., Айзенштат Л. И. Офтальмологические приборы. М.: Медицина, 1988. 108 с.
5. Медицинская энциклопедия. Биомикроскопия. 2007—2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.medical-enc.ru/2/biomikroskopia.shtml>>.
6. Оптические методы исследования в офтальмологии. 2010 [Электронный ресурс]: <<http://www.knowledge.allbest.ru/Медицина/0.html>>.
7. Офтальмоскопия. 2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.websight.ru/exam/fundoscopy.php>>.
8. Фундус-камера. 2011—2014 [Электронный ресурс]: <<http://medbuy.ru/fundus-kamera>>.
9. Гониоскопия. 2008—2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.bolezni-glaza.ru/content/view/786/810>>.
10. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
11. Травникова Н. П. Эффективность визуального поиска. М.: Машиностроение, 1985. 129 с.
12. Kowa Pharmaceutical Europe Co. Ltd. 2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.kowapharmaceuticals.eu>>.
13. Панов В. А. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980. 743 с.
14. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1969. 511 с.

#### Сведения об авторах

- Александр Аванесович Багдасаров** — канд. техн. наук; ОАО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: [balexol@yandex.ru](mailto:balexol@yandex.ru)
- Ольга Васильевна Багдасарова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург; E-mail: [balexol@yandex.ru](mailto:balexol@yandex.ru)
- Елена Владимировна Данчина** — студент; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
25.03.14 г.

Ю. В. ФЕДОРОВ, А. Ю. ФЕДОРОВА

**АККОМОДОСТИМУЛЯТОРЫ**

Описаны способы и устройства для развития и сохранения аккомодационной способности глаз на стабильно высоком уровне. Разработаны действующие макеты аккомодостимуляторов, представлен алгоритм компьютерной зрительной стимуляции.

**Ключевые слова:** аккомодация, глазные зрительные тренажеры, микрозатуманивание, диапазон резкого видения.

Глазные мышцы, как и любые другие, нуждаются в хорошем питании (кровообращении) и постоянной тренировке [1]. Последняя осуществляется как естественным путем в процессе видения окружающего, так и посредством различных устройств и приспособлений (тренажеров). Наиболее перспективны и апробированы устройства, основанные на эффектах „микрозатуманивания“ (аккомодостимулятор АКС1) и „раскачки диапазона резкого видения“ (аккомодостимулятор АКС2). Предлагаемый метод компьютерной аккомодостимуляции также перспективен в силу массового распространения компьютерной техники.

**Аккомодостимулятор АКС1.** На основе исследований врача-офтальмолога, профессора А. И. Дашевского создано несколько модификаций устройств [2], предназначенных для тренировки и поддержания аккомодационного аппарата на высоком уровне. Их действие основано на эффекте „микрозатуманивания“ — искусственного улучшения видимости знаков тренировочной строки (теста) до уровня эталонной путем приближения ее к глазу (при миопии) и последующего малого отдаления, такого чтобы видимость ее не ухудшалась либо восстанавливалась в течение 3—5 с в результате работы глазных мышц, которые, стараясь привести новое положение теста в соответствие его *запомненному изображению* на сетчатке глаза, нормализуют (ослабляют) оптическую силу хрусталика. Схема действия и пространственная реализация метода приведена на рис. 1, а, внешний вид действующего макета тренажера АКС1 — на рис. 1, б. На основании макета, расположенном для комфортной работы под некоторым углом к горизонтальной плоскости, расположены стойка с коллиматорной линзой, переносящей изображение теста в „начало бесконечности“, и подвижная стойка с тестом и индексом. Размеры неподвижной стойки обеспечивают комфортную работу без применения окклюдора [3, 4].

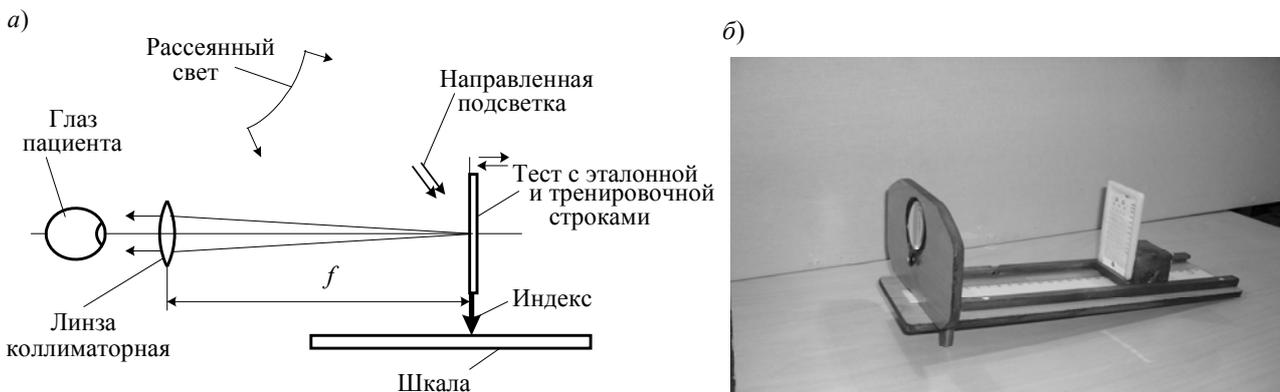


Рис. 1

Метод микрозатуманивания применяется в детской офтальмологической практике. Ежедневное использование тренажера АКС1 улучшает зрение при близорукости без хирургического вмешательства, повышает остроту зрения и устраняет прогрессирование дальнозоркости, снимает спазмы аккомодации. Метод может с успехом использоваться на производстве

для улучшения зрения сотрудников с интенсивной зрительной нагрузкой, а также в домашних условиях.

При ежедневных занятиях (не более 10—15 мин) тренажер помогает осуществлять эффективное восстановление зрения при близорукости и дальнозоркости. Тренажер удобен и прост в применении.

Использование тренажера позволяет сохранить зрение при длительной работе за компьютером и навсегда избавиться от очков, излечить близорукость и дальнозоркость.

**Аккомодостимулятор АКС2.** Принцип действия АКС2 поясняет рис. 2, а. При попеременном наблюдении тест-объектов (последовательно от крупных  $T_1$  к мелким  $T_2$ ) регистрируется диапазон резкого видения  $\Delta$ . Тренировка аккомодационного аппарата заключается в том, что глазные мышцы при смене крупного объекта на более мелкий „обрабатывают“, стремясь привести диапазон резкого видения мелких объектов ( $\Delta_2$ ) в соответствие *запомненному* диапазону резкого видения крупного объекта ( $\Delta_1$ ).

Аккомодостимулятор предназначен для проведения тренировочных упражнений зрительного аппарата в амбулаторных и домашних условиях с целью профилактики функциональных нарушений зрения у детей и взрослых.

Внешний вид действующего макета аккомодостимулятора АКС2 представлен на рис. 2, б. Под некоторым углом к основанию макета установлена направляющая, снабженная четырехпозиционным бегунком с тест-объектами и роликами, фиксирующими крайние положения бегунка. Для оценки (измерения) диапазона резкого видения теста направляющая снабжена миллиметровой шкалой.

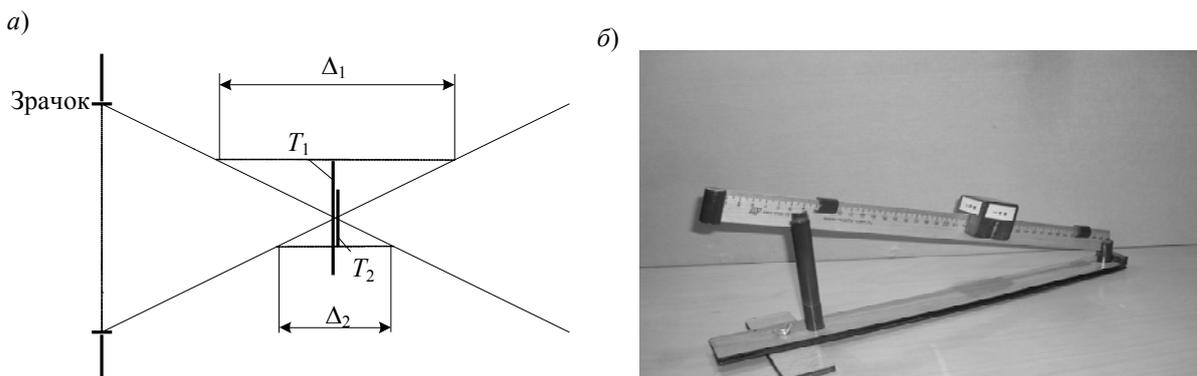


Рис. 2

Тренажер обеспечивает как отдельную тренировку аппарата аккомодации каждого глаза (монокулярная тренировка), так и совместную тренировку аккомодации и конвергенции (бинокулярная тренировка). Показания к применению: начальная и прогрессирующая близорукость (миопия), пресбиопия (возрастная дальнозоркость), астигматизм (зрительная утомляемость), скрытое и явное расходящееся косоглазие, нистагм (непроизвольные скачкообразные движения глаз), нарушения аккомодационной способности. Противопоказания к применению тренажера и побочные явления отсутствуют. Наибольший эффект (по данным Крымского республиканского медицинского центра реабилитации зрения) наблюдается у детей и лиц до 20—25 лет. У людей старшего возраста стабилизируется зрение, задерживается развитие пресбиопии, снижается зрительная утомляемость.

Перед началом упражнений на обоих тренажерах рекомендуется обратиться к врачу-офтальмологу для выяснения причин расстройства зрения, определения параметров зрения (рефракция, острота зрения вдаль и вблизи, резервы аккомодации и др.) и выбора вариантов упражнений.

В зависимости от варианта упражнений, вида и величины рефракции тренировки проводятся без очков либо в очках — своих или специальных. При монокулярных упражнениях используют окклюдор.

На рис. 3 представлены тест-объекты: кольцо Ландольта — „С“ и растровая решетка „ромашка“ (четыре типоразмера соответствуют размерам чертежных шрифтов по ГОСТ 2.304-81).

Выбор тест-объекта для упражнений производится в зависимости от остроты зрения вблизи. При остроте зрения (в своих очках) 0,6 и выше для упражнений используется тест-объект наименьшего размера, при 0,4—0,5 — среднего, при 0,3 и ниже — максимального.



Рис. 3

Во всех случаях при определении размера тест-объекта и выявлении необходимости применения очков следует руководствоваться следующим основным правилом: в начале упражнений тест-объект, расположенный на корпусе тренажера,

должен быть ясно различим с расстояния 10—25 см от глаз пациента.

Упражнения выполняются сидя или стоя, голова слегка наклонена вперед, тренажер располагается горизонтально так, чтобы он был хорошо освещен естественным или искусственным светом.

Занятия продолжаются в течение 7—10 мин, затем следует перерыв не менее 20 мин, после чего упражнение повторяется для другого глаза.

**Компьютерная аккомодостимуляция.** Разработанная авторами программа компьютерной аккомодостимуляции может запускаться пользователем на собственном персональном компьютере (после консультации с врачом). Работа с программой заключается в просмотре циклического слайд-шоу (рис. 4). Длительность цикла 35—40 с, дискретные изменяющиеся тест-объекты равномерно распределены по времени. Сеанс состоит из 10—20 циклов, в течение дня следует выполнять 5—6 сеансов.

Доступны три варианта исполнения: текстовая строка на белом, черном или цветном поле.

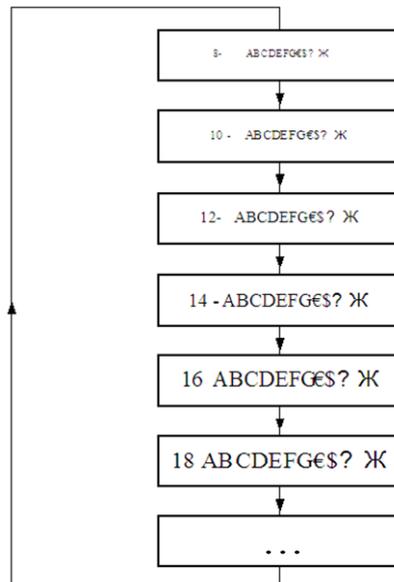


Рис. 4

Для достижения максимального эффекта от применения компьютерной зрительной стимуляции целесообразно индивидуально опытным путем подобрать временные характеристики цикла и при необходимости проконсультироваться с врачом-офтальмологом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тренажеры [Электронный ресурс]: <<http://www.oko-training.ru/base.htm>>.
2. Аккомодотренер домашний — силовой АД-С [Электронный ресурс]: <<http://eyecenter.com.ua/pacien/trenager/01.htm>>.
3. Федоров Ю. В. Зрение: линзовая коррекция. Зрительная гимнастика. Цветотерапия. СПб: НП-Принт, 2013. 104 с.
4. Федоров Ю. В. Зрение: глазные зрительные тренажеры. СПб: Лена, 2014. 97 с.

*Сведения об авторах*

- Юрий Владимирович Федоров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, Санкт-Петербург;  
E-mail: FedorovYV@yandex.ru
- Александра Юрьевна Федорова** — Университет ИТМО, кафедра экономической теории и бизнеса, Санкт-Петербург; старший преподаватель; E-mail: AYFedorova@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
измерительных технологий  
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию  
22.01.14 г.

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 535.65, 637.052

Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, Е. А. ЛАСТОВСКАЯ

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТА МЯСА

Предложена компьютерная модель, предназначенная для исследования влияния биохимических факторов, а также особенностей освещения на цвет мяса.

*Ключевые слова:* цвет, мясо, миоглобин, компьютерная модель.

В условиях развития технологий и увеличения объемов мирового производства продуктов питания все более актуальным является контроль их качества с целью обеспечения продовольственной безопасности, это утверждение относится, в том числе, к мясу и мясным продуктам.

Одним из информативных показателей свежести мяса является его цвет, который, в свою очередь, зависит от содержания основного пигмента — миоглобина — и его формы. Изменение цвета происходит в результате окисления миоглобина и превращения его в метмиоглобин (форма, лишенная кислорода) и оксимиоглобин (форма, насыщенная кислородом) [см. лит.].

Авторским коллективом разработана компьютерная модель, позволяющая симитировать цвет куска мяса при различном процентном содержании миоглобина, метмиоглобина и оксимиоглобина. При моделировании учитываются:

- рельефность поверхности образца мяса;
- возможные блики от поверхности анализируемого образца;
- изменения оптических свойств волокон мяса во времени;
- спектральная характеристика используемого источника освещения (расчет проводится для источников типа А, В, С, Е, белого люминесцентного светодиода и люминесцентной лампы).

В модели не учитываются изменения оптических свойств жировых и соединительных тканей.

В дальнейшем предполагается учесть также возможность смешивания ферментов и переналожения их спектров в различных пропорциях.

Представленная модель является основой для разработки гибких алгоритмов анализа параметров качества мяса в автоматическом режиме и создания соответствующих оптоэлектронных систем контроля.

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (Госзадание 2014/190).

## ЛИТЕРАТУРА

Мурашев С. В., Воробьев С. А. Моделирование цветовых переходов между формами миоглобина // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 2. С. 239—247.

*Сведения об авторах*

- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра опико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Валерий Викторович Кортаев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра опико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: kortaev@grv.ifmo.ru
- Елена Александровна Ластовская** — студент; Университет ИТМО, кафедра опико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: plastelinchik@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
опико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
11.08.14 г.

УДК 681.786

В. В. КОРОТАЕВ, Х. В. НГУЕН, А. Н. ТИМОФЕЕВ, С. Н. ЯРЫШЕВ

**МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЯ  
ДЛЯ АКТИВНОЙ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ**

Разработан оригинальный алгоритм выделения препятствия на автомобильной дороге из облака пространственных точек, полученных активной стереоскопической системой. Предложен метод, основанный на анализе градиентов высоты. Алгоритм обработки результатов съемки реализован в среде MatLab.

**Ключевые слова:** активная стереоскопическая система, облако точек, безопасность автомобиля, распознавание препятствий.

Системам безопасности движения автомобиля уделяется повышенное внимание. Одним из вариантов реализации может служить активная стереоскопическая система (АСС) [1]. Для ее успешной работы требуется решить задачу распознавания полотна дороги и препятствий, выделяемых из облака пространственных точек. Известные пассивные стереоскопические системы на основе полученных в стереопаре изображений выделяют объекты и определяют их положение в пространстве [2—5]. Отличительной особенностью активных стереоскопических систем является то, что они включают в себя лазер, с помощью которого пространство перед камерами сканируется путем перемещения луча в вертикальном направлении. В процессе обработки полученных кадров АСС создает пространственную картину, которая может быть представлена в виде облака пространственных точек. Существующие методы выделения объектов из облака пространственных точек [6—9] требуют больших вычислительных ресурсов, поэтому их применение затруднено.

Авторами предложен и разработан алгоритм выделения препятствия из облака пространственных точек. Поскольку на трехмерном изображении препятствия отличаются от дорожного полотна градиентом высоты объекта (т.е. скоростью ее нарастания), то задача алгоритма — выделить препятствия по градиенту  $G$  и принять решение исходя из его порогового значения

$$G = h/d,$$

где  $h$  — разница высот двух точек;  $d$  — расстояние между ними.

Предложенный алгоритм работает следующим образом:

— облако пространственных точек по оси  $OZ$  делится на участки шириной, равной максимальной ширине углубления  $d_{\max}$ , через которое автомобиль сможет проехать;

— выбираются первая и последняя точки каждого участка, сравниваются соответственно с первой и последней точками соседних участков. Выбираются точки с максимальной и минимальной высотой, определяются градиент высоты  $G$  и разница по высоте между этими точками (рис. 1). В случае  $G > G_{\max}$  участок получает статус „1“. Если  $G > G_{\max}$  и высота  $h$  больше порогового значения по высоте  $h_{\max}$ , этот участок получает статус „2“. Если на выбранном участке нет ни одной точки, участок получает статус „3“;

— для двух соседних участков определяется расстояние от последней точки первого участка до первой точки последующего. Если это расстояние больше  $d_{\max}$ , то эти два участка получают статус „3“;

— если два или более участков со статусом „1“ следуют друг за другом и их суммарная высота больше  $h_{\max}$ , эти участки получают статус „2“;

— решение принимается на основе следующих данных: участки со статусами „2“ и „3“ представляют опасность для проезда автомобиля, остальные участки — проезжая часть дороги, свободная от препятствий.

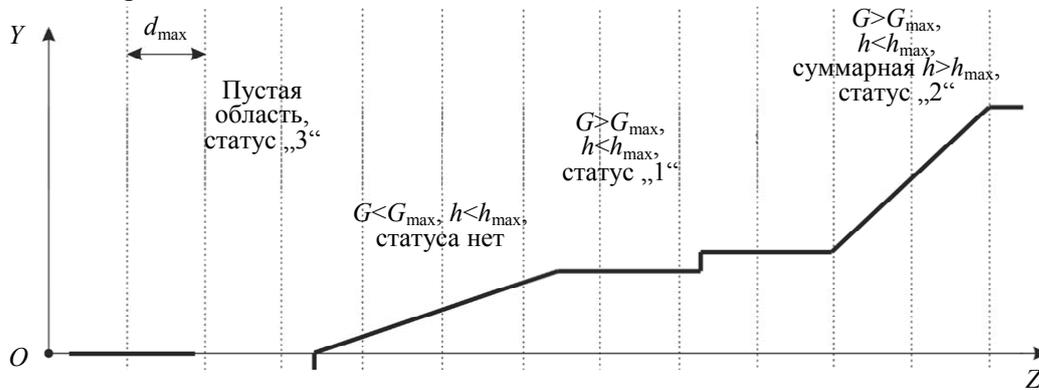


Рис. 1

Апробация метода проводилась на физической модели, включающей в себя АСС, движущийся макет автомобиля и наклонную поверхность, имитирующую дорогу. В модели использованы лазер IE84-05CLF (длина волны 650 нм), две камеры Microsoft LifeCam HD-5000 с разрешением 1280×780 пикселей. Величина стереобазы 128 мм. Алгоритм обработки результатов съемки реализован в среде MATLAB. Трехмерная картина, полученная с помощью физической модели, после преобразования представляла собой облако из 36 842 пространственных точек (рис. 2). Время обработки составляет около 3 с. Моделирование подтвердило, что разработанный алгоритм устойчиво выделяет на сцене силуэт автомобиля.

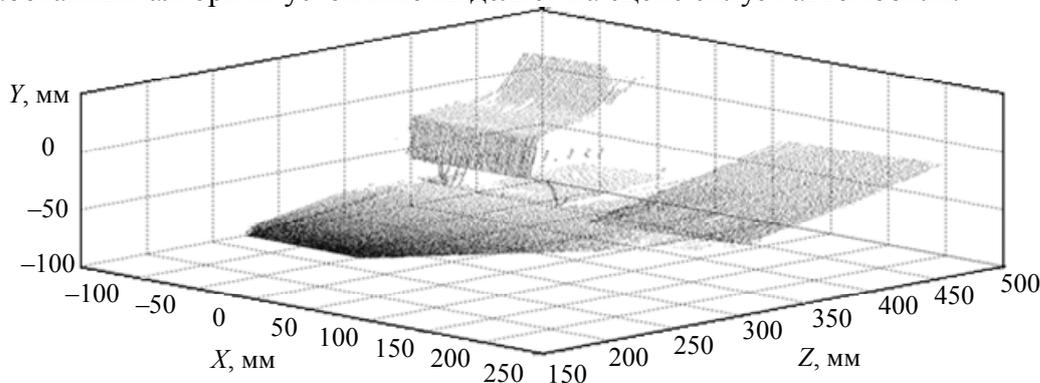


Рис. 2

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (Госзадание 2014/190).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moreno S. A. M., Zuniga S. J. M., Garcia D., Martinez A. L., Gonzalez J. M.* Laser application in industrial close range photogrammetry // Proc. SPIE. Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection 1999. Vol. 3835, N 184.
2. *Hwang J., Huh K., Lee D.* Vision-based vehicle detection and tracking algorithm design // Optical Engineering. 2009. Vol. 48, N 12.
3. *Nedevschi S., Danescu R., Grafn Frentiu Th., Marita T., Oniga F., Pocol C., Schmidt R.* High Accuracy Stereo Vision System for Far Distance Obstacle Detection // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. University of Parma. Parma, Italy. 2004. P. 292—297.
4. *Toulminet G., Bertozzi M., Mousset S., Benschrair A.* Vehicle detection by means of stereo vision-based obstacles features extraction and monocular pattern analysis // Image Processing. IEEE Transact. 2006. Vol. 15, N 8. P. 2364—2375.
5. *Linga B., Zeifmana M. I., Gibson D. R. P.* Multiple Pedestrians Detection Using IR LED Stereo Camera // Proc. Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision. 2007. Vol. 6764.
6. *Golovinskiy A., Kim V. G., Funkhouser T.* Shape-based recognition of 3D point clouds in urban environments // Computer Vision. 12th Intern. Conf. 2009. P. 2154—2161.
7. *Frome A., Huber D., Kolluri R., Bülow Th., Malik J.* Recognizing Objects in Range Data Using Regional Point Descriptors // Proc. of the European Conf. on Computer Vision (ECCV). 2004. P. 224—237.
8. *Sithole G., Vosselman G.* Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape // Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop. 2003. P. 67—71.
9. *Rabbania T., van den Heuvel F. A., Vosselman G.* Segmentation of Point Clouds Using Smoothness Constraint // IAPRS. Dresden, 2006. Vol. XXXVI, Pt. 5. P. 248—253.

**Сведения об авторах**

- Валерий Викторович Коротяев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Хоанг Вьет Нгуен** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: ngvietvn@gmail.com
- Александр Николаевич Тимофеев** — Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург
- Сергей Николаевич Ярышев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: ysn63@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
24.10.14 г.

С. В. ИВАНОВ, А. А. ВИШЕРАТИН, Д. А. НАСОНОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ РЕДКОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ

Рассмотрен метод реконструкции нагонных наводнений, основанный на построении синтетического циклона, форма и траектория движения которого определяется по ретроспективным метеорологическим данным. Метод может использоваться для исследования чувствительности формы наводнений к локальной изменчивости погодных условий, а также при конструировании ансамблей синоптических ситуаций с целью тестирования систем прогнозирования и предотвращения наводнений.

*Ключевые слова:* синтетический сценарий, комбинированный метод, предотвращение наводнений, ансамбль синоптических ситуаций, ретроспективные данные, реконструкция экстремальных природных явлений.

Нагонные наводнения в Санкт-Петербурге относятся к экстремальным природным явлениям редкой повторяемости (за время существования города угроза наводнения возникала в среднем один раз в год). Традиционно для решения таких задач используются методы статистики экстремальных значений, позволяющие получить оценки подъемов уровня, возможных 1 раз в 100 и более лет [1], эти величины могут рассматриваться как основа для оценок рисков и использоваться, например, при проектировании защитных сооружений или объектов берегозащиты. Вместе с тем оперативная эксплуатация защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений требует более полной информации о потенциально возможных наводнениях, включая, например, характеристики движения нагонной волны в Финском заливе и темпы роста уровня воды в различных пунктах наблюдений. Эта потребность связана, в первую очередь, с необходимостью настройки методов и алгоритмов, обеспечивающих работу системы предотвращения угрозы наводнений: в силу того что наводнения бывают достаточно редко, опираться только на ретроспективные данные не представляется возможным. Дополнительно такая информация может использоваться для построения синтетических сценариев особо опасных наводнений, применяемых как для тестирования самой системы, так и для обучения ее персонала.

Существует два подхода к построению оценок экстремальных природных явлений редкой повторяемости:

— реконструкция экстремальных природных явлений на основе статистики многомерных экстремумов. Этот подход позволяет параметризовать исходное явление в форме многомерной случайной величины, для которой определяется многообразие, соответствующее одинаковой повторяемости сочетаний значений ее компонентов. Подход, несмотря на формальную обоснованность, требует введения дополнительной функции риска для выбора целевого значения многомерного экстремума, поскольку в такой логике разные сочетания параметров (например, высоты пика наводнения и его длительности) могут иметь одну и ту же вероятность появления;

— реконструкция экстремальных природных явлений на основе синтетических штормов. Подход предусматривает построение некоторого сценария на основе комбинации элементов исторических экстремальных явлений таким образом, чтобы получившийся в результате многомерный объект (например, циклон или шторм) обладал наиболее выраженными экстремальными свойствами с точки зрения какого-либо целевого процесса (например, раз-

мыва берегов, затопления территории и пр.). Получаемые при этом результаты достаточно реалистичны, однако вследствие зависимости между компонентами многомерного экстремума, характеризующего его составляющие, не всегда возможно корректно оценить вероятность появления конкретного синтетического шторма.

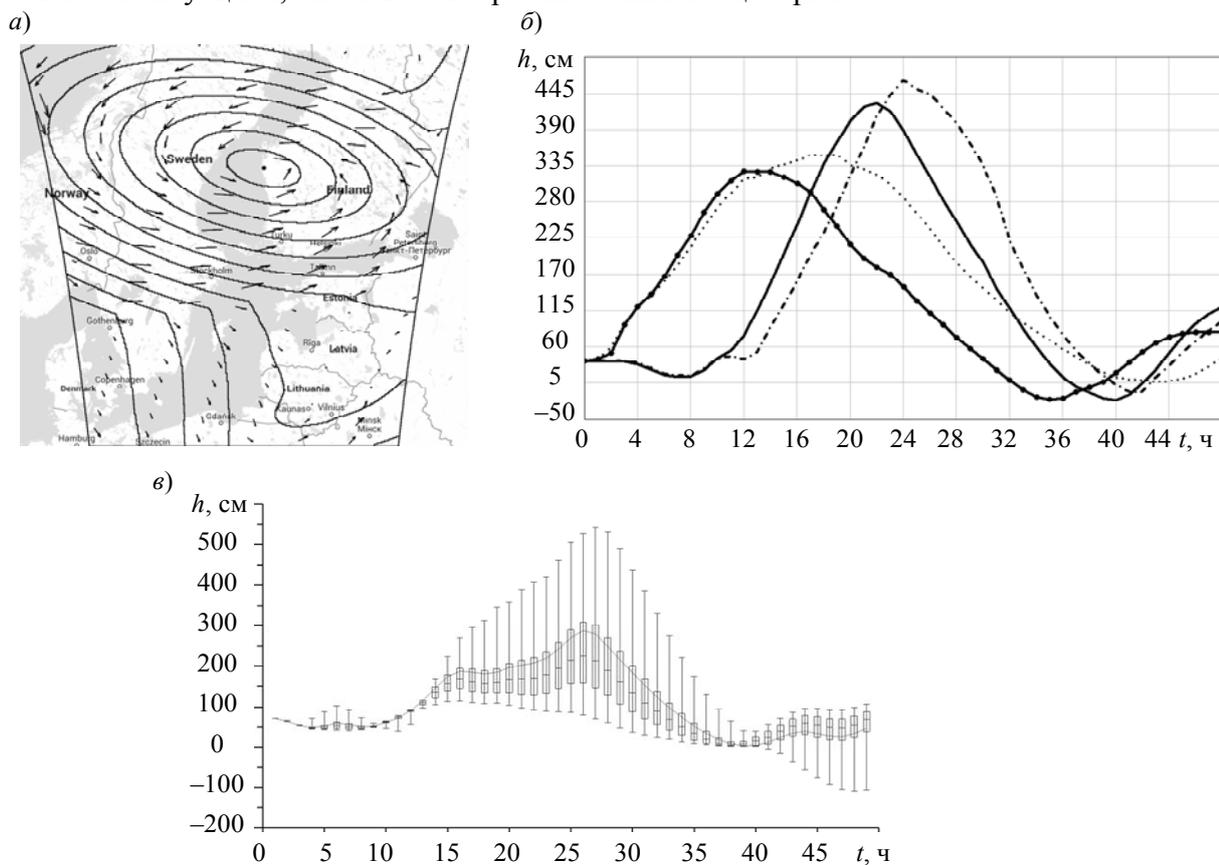
Для реконструкции нагонных наводнений редкой повторяемости, возникающих в восточной части Финского залива, предложен комбинированный метод, сочетающий в себе возможности и первого, и второго подходов. Он основан на том, что каждому наводнению ставится в соответствие синтетический циклон (или даже последовательность циклонов для наводнений с несколькими пиками), который в каждый момент времени характеризуется набором пространственных характеристик, таких как минимальное приземное давление, площадь циклона, коэффициент анизотропии, скорость движения и глубина циклона. Кроме того, для каждого синтетического циклона задается траектория движения, соответствующая историческим ситуациям [2]. При этом сам синтетический циклон не является экстремальным природным явлением, потому сочетания характеристик его формы и движения могут быть описаны в виде классических многомерных распределений случайных величин, определяемых, например, по данным реанализа (ERA, NCEP/NCAR) за климатический интервал (не менее 30 лет). Однако экстремальный характер обуславливает сочетание параметров формы и движения синтетического циклона с заданной траекторией, что в целом и приводит к возникновению нагонной волны и наводнения в Санкт-Петербурге.

На основе синтетического циклона по полю давления, с использованием методики [3], определяется геострофический и далее — приводный ветер над Балтийским морем, на основе которого по гидродинамической модели (в данном исследовании применена модель BSM-2010) рассчитываются нагонная волна и ход уровня в наводнении. Таким образом, с точки зрения оперативной эксплуатации, синтетические поля давления и ветра заменяют собой штатный метеорологический прогноз, используемый в системе предотвращения угрозы наводнений. На рисунке приведены результаты реконструкции экстремальных наводнений в Санкт-Петербурге: *a* — пример синтетического циклона, *b* — изменение уровня воды (*h*) в синтетическом наводнении (давление в центре 960 гПа; *1* — скорость 40 км/ч, *2* — 30 км/ч, *3* — 45 км/ч, *4* — 40 км/ч, поворот 15° к югу, лаг 4 часа), *в* — наводнение, возможное один раз в сто лет, с оценкой вариабельности до 10 000 лет.

Предложенный метод может использоваться для оценки чувствительности методов и моделей, применяемых в системе предотвращения угрозы наводнений Санкт-Петербурга, к локальным изменениям метеорологических условий. Для этого синтетический циклон строится не на основе вектора параметров заданной повторяемости, а на основе какого-либо ретроспективного наводнения, для которого определяются траектория циклона и его параметры, например, с использованием данных метеопрогнозов (HIRLAM). Далее рассматривается возможность изменения одного или нескольких параметров циклона в различные моменты времени, с оценкой, например, устойчивости результатов при вариациях локальных ветров, которые невозможно отразить в региональной прогностической модели. При этом экстремальность самого природного явления трактуется исходя из величины отклонения от исходного наводнения. Например, на рисунке *в* приведена расчетная оценка хода уровня в наводнении, возможном раз в сто лет, а интервальные оценки вокруг нее соответствуют изменчивости характеристик синоптической ситуации, отражающей возможность возникновения наводнений повторяемостью до 1 раз в 10 000 лет (верхняя огибающая графика).

Таким образом, предложенный метод реконструкции экстремальных природных явлений редкой повторяемости, апробированный на наводнениях в Санкт-Петербурге, может быть использован для повышения эффективности функционирования систем оперативного прогнозирования и противодействия последствиям экстремальных природных явлений. Это достигается как за счет повышения надежности самой системы (настройка системы на

синтетических данных, нагрузочное тестирование и пр.), так и за счет обучения персонала действиям в ситуациях, описываемых реалистичными сценариями.



Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по договору № 14.Z56.14.6547-МК от 3 февраля 2014 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухановский А. В., Рожков В. А. Невские наводнения редкой повторяемости // Изв. РГО. 1999. Т. 131, вып. 3. С. 42—48.
2. Померанец К. С. Наводнения в Петербурге 1703—1997. СПб: Балтрус-бук, 1998.
3. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Иванов С. В. Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. I. Постановка задачи и входные данные // Вестн. СПбГУ, сер. 7. 2005. Вып. 3. С. 62—74.

#### Сведения об авторах

**Сергей Владимирович Иванов**

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий; Санкт-Петербург; E-mail: sergei.v.ivanov@gmail.com

**Александр Александрович Вишератин**

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений, Санкт-Петербург

**Денис Александрович Насонов**

— Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений, Санкт-Петербург; преподаватель

**Александр Валерьевич Бухановский**

— д-р техн. наук; Университет ИТМО, Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий; Санкт-Петербург; директор НИИ НКТ; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию  
20.11.14 г.

## SUMMARY

P. 3—9.

### COMPENSATION OF TEST SIGNALS PROPAGATION PATHS DIFFERENCE IN DUPLEX COMPARISON OF REMOTE SYNCHRONIZERS SCALES

A method of remote triggers timelines comparison with the use of a rolling space-based relay is considered. The duplex method of determination of diversity sources scales mistiming is taken as a basis. A mechanism is proposed for counteracting the difference between the traces of test signals propagating in the opposite direction caused by inevitable orbital dynamics of the repeater on the base of empirical synthesis of basic functions with polynomial approximation of multi-temporal measurements at coinciding points in time.

**Keywords:** scales comparison, direct and counter delay measurement, polynomial approximation/empirical support function, error of comparison.

#### *Data on authors*

- Andrey P. Aleshkin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru
- Timofey O. Mislivtsev* — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru
- Andrey A. Makarov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru

P. 9—14.

### ESTIMATION OF DISPERSION AREA OF THE SPECIAL SPACE VEHICLE COORDINATES ON THE BASE OF FIELD TEST RESULTS

The problem of estimation of spherical area radius for special space vehicle position relative to an investigated object after the approaching maneuver is considered. The method of priority of experimental data is used to improve the estimation accuracy.

**Keywords:** space dust, special space vehicle, limited number of field tests.

#### *Data on authors*

- Vladimir N. Arseniev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of On-Board Information and Measuring Complexes, St. Petersburg; E-mail: vladar56@mail.ru
- Pavel V. Labetsky* — Post-Graduate Student; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; E-mail: p.v.labetskiy@gmail.com

**P. 15—21.****ACCURACY IMPROVEMENT OF CORRECTABLE INERTIAL NAVIGATION SYSTEM**

A model of dynamics of the extended state vector of integrated system consisting of strapdown inertial navigation system and non-autonomous navigation system is proposed. An algorithm for estimation of not-measured errors of accelerometers and gyroscopes and correction of their readouts in the further autonomous operation of the inertial navigation system is presented.

**Keywords:** inertial navigation, accelerometer, gyroscope, error equation, correction, integrated systems.

*Data on authors*

- Pavel V. Vasiliev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; E-mail: vasp1971@mail.ru
- Alla V. Meleshko* — Cand. Techn. Sci.; Scientific-Production Enterprise „RADAR MMS“, JSC, St. Petersburg; Leading Specialist; E-mail: allaluna@list.ru
- Vyacheslav V. Pyatkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Television JSC, Department of Research and Technology Complex, St. Petersburg; Head of the Complex; E-mail: pyatkov@niitv.ru

**P. 21—27.****PROTOCOL FOR PREVENTION OF TASK DEADLOCKS IN REAL-TIME SYSTEMS**

A new protocol ensuring task deadlock prevention is proposed for access to mutual resource information database. The protocol is oriented to efficient implementation of multitask software applications which contain tasks with intersected critical intervals for access to mutual resources. The protocol is reported to use the proposed protocol not only with static priority scheduling modes, but with dynamic ones as well. For real-time system with a multi-core processor, the option of picking a scheduling mode from a wide enough set is shown to increase the processor efficiency of time usage by a factor of 2-3.

**Keywords:** multitask systems, multi-core processor system, real-time system, protocol for access to resources.

*Data on author*

- Viktor V. Nikiforov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Software Technologies and Systems; E-mail: nik@iias.spb.su

**P. 28—33.****ADAPTIVE CONTROL OF TORQUE IN FUEL-INJECTION INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH VARIABLE VALVE TIMING**

A solution to the problem of adaptive torque control in fuel-injection internal combustion engine with variable valve timing is proposed. The controller design is based on parametrically and functionally uncertain torque model. To achieve the control objective and to compensate for uncertainties of the model, the method of indirect adaptive control is employed. Workability of the proposed approach is illustrated by presented results of computer simulation.

**Keywords:** fuel-injection internal combustion engine, variable valve timing, internal combustion engine modeling, adaptive control over internal combustion engine.

*Data on authors*

- Dmitry N. Gerasimov* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics, St. Petersburg; E-mail: gerasimovdn@mail.ru
- Vladimir O. Nikiforov* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, St. Petersburg; Pro-Rector; E-mail: nikiforov@mail.ifmo.ru
- Alexey V. Paramonov* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics, St. Petersburg; E-mail: avp.atrax@gmail.com
- Dmitry S. Serov* — Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics, St. Petersburg; E-mail: dss-primary@yandex.ru

P. 34—38.

### PRINCIPLES OF AUTOMATIC SYSTEM DESIGN FOR CONTROL OVER THERMAL AND LIGHTING CHARACTERISTICS OF AIRBORNE INDICATION MEANS

The problem of thermal operation modes maintaining for electrical, radio, and optical elements in avionics products is considered. A schematic of the components thermal mode control channel is proposed. Results of experimental studies are presented.

**Keywords:** temperature modes, radio elements, optical elements, avionics.

#### *Data on authors*

- Igor O. Zharinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer-Assisted Design of On-Board Computers, St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: igor\_rabota@pisem.net
- Oleg O. Zharinov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Modeling of Computational and Electronic Systems; E-mail: zharinov73@hotmail.ru
- Pavel P. Paramonov* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer-Assisted Design of On-Board Computers, St. Petersburg; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru
- Maxim O. Kostishin* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics, St. Petersburg; E-mail: maksim@kostishin.com
- Sergey A. Sudarchikov* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics, St. Petersburg; E-mail: s-a-sudarchikov@yandex.ru

P. 39—45.

### MEASUREMENT OF WEAK MAGNETIC FIELDS BY NUTATION NUCLEAR-MAGNETIC MAGNETOMETER ON FLOWING LIQUID

A method of weak magnetic fields measurement with nutation nuclear-magnetic magnetometer on the flowing liquid is considered. Technical requirements for various construction elements of magnetometer and flowing liquid parameters are defined both experimentally and theoretically. Operation of the measuring sensor has been tested experimentally with the use of the most optimal liquid medium. Further avenues for improvement of the construction and of accuracy characteristics of the developed magnetometer are formulated.

**Keywords:** magnetic field, magnetization, line nutation, spontaneous relaxation time  $T_1$ , transverse relaxation time  $T_2$ , signal to noise ratio.

#### *Data on authors*

- Vadim V. Davydov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: davydov\_vadim66@mail.ru
- Valentin I. Dudkin* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: vidoodkin@mail.ru
- Anton Yu. Karseev* — Student; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: antonkarseev@gmail.com

P. 46—52.

### STATIONARY THERMAL REGIME OF MOON-BASED OBJECT WITH INTERNAL THERMOSTATIC CONTROL

Thermal regime of a cylindrical object on lunar surface is studied for the cases when the object is mounted at the Moon equator, on illuminated and shadowed areas. The possibility of thermal stabilization of the inner body separated from the outer envelope by a thermal insulating layer is demonstrated; the desired temperature level may be maintained with the use of a flowing-water heat-exchanger at mass of water discharge of no more than 5.5 g/min.

**Keywords:** stationary thermal balance, cylindrical object, illuminated and shadowed lunar surface areas, thermal stabilization.

#### *Data on authors*

*Evgeny V. Lapovok* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Computer Thermal Pysics and Energy Monitoring, St. Petersburg; E-mail: leva0007@rambler.ru

*Sergey I. Khankov* — Dr. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Computer Thermal Pysics and Energy Monitoring, St. Petersburg

P. 53—59.

### HAND SLIT LAMP BASED ON GREENOUGH MICROSCOPE FOR OPHTHALMOLOGY

The current state of hardware used in ophthalmology is observed, an avenue of development of small portable research and diagnostic tools is proposed. The particular instrument under consideration is hand slit lamp for rapid diagnostics of frontal and rear eye cameras. Results of detailed calculation of the first Russian hand slit lamp schematic performed in 2013 is presented.

**Keywords:** ophthalmology, slit lamp, microscope, lighting, invariant, aperture.

#### *Data on authors*

*Alexander A. Bagdasarov* — Cand. Techn. Sci.; S. I. Vavilov State Optical Institute, JSC, St. Petersburg; Leading Researcher; E-mail: balexol@yandex.ru

*Olga V. Bagdasarova* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics, St. Petersburg; E-mail: balexol@yandex.ru

*Elena V. Danchina* — Student; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics, St. Petersburg

P. 60—63.

### ACCOMMODATION STIMULATORS

Methods and apparatus designed for development and maintenance of eyes accommodation ability at constantly high level are reviewed. Developed action mock-ups off accommodation stimulators and an algorithm of computer-based vision stimulation are described.

**Keywords:** accommodation, eye training apparatus, micro misting, sharp vision range.

#### *Data on authors*

*Yury V. Fedorov* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography, St. Petersburg; E-mail: FedorovYV@yandex.ru

*Alexandra Yu. Fedorova* — ITMO University, Department of ITMO University, Department of Economic Theory and Business; Senior Lecturer; E-mail: AYFedorova@gmail.com

P. 64—65.

### COMPUTER SIMULATION OF MEAT COLOR

A computer model for investigation on the influence of biochemical factors and lighting features on the meat color is described.

**Keywords:** color, meat, myoglobin, computer model.

#### *Data on authors*

- Elena V. Gorbunova* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Elena A. Lastovskaya* — Student; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; E-mail: plastelinchik@mail.ru

P. 65—67.

### METHOD OF OBSTACLE ISOLATION FOR ACTIVE STEREOSCOPIC CAR SAFETY SYSTEM

A method is proposed and an original algorithm is developed for picking obstacles on the road out of the point cloud obtained with an active stereoscopic system. The method is based on analysis of the height gradient; the algorithm of the survey results processing is implemented in MatLab medium.

**Keywords:** active stereoscopic system, point cloud, car safety, obstacles recognition.

#### *Data on authors*

- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Hoang Viet Nguyen* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; E-mail: ngvietvn@gmail.com
- Alexander N. Timofeev* — ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg
- Sergey N. Yaryshev* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Optoelectronic Systems and Devices, St. Petersburg; E-mail: ysn63@mail.ru

P. 68—70.

### METHOD OF RECONSTRUCTION OF EXTREME NATURAL PHENOMENA OF LOW FREQUENCY FOR IMPROVEMENT OF SAINT PETERSBURG FLOOD-PREVENTION FACILITY

A method of reconstruction of surge flooding is proposed. The method is based on construction of synthetic cyclone with shape and motion pass determined from retrospective meteorological data. The method may be applied to the study of flood shape dependence on local variations of weather conditions, as well as to development of ensemble of synoptic situations used for testing a system of flood prediction and prevention.

**Keywords:** synthetic scenario, combined method, flood prevention, ensemble of synoptic situations, retrospective data, reconstruction of extreme natural events.

#### *Data on authors*

- Sergey V. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, eScience Research Institute, St. Petersburg; E-mail: sergei.v.ivanov@gmail.com
- Alexander A. Visheratin* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of High Performance Computing, St. Petersburg
- Denis A. Nasonov* — ITMO University, Department of High Performance Computing, St. Petersburg; Lecturer
- Alexander V. Boukhanovsky* — Dr. Techn. Sci.; ITMO University, eScience Research Institute, St. Petersburg; Director of the Institute; E-mail: avb\_mail@mail.ru

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2014 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Алешкин А. П., Мысливцев Т. О., Макаров А. А.	Метод компенсации неидентичности трасс распространения тестовых радиосигналов при дуплексном сличении шкал удаленных синхронизаторов	12
Арсеньев В. Н., Булекбаев Д. А.	Метод уточнения модельных значений параметров атмосферы для прогнозирования районов падения отделяемых частей ракет-носителей	1
Арсеньев В. Н., Лабецкий П. В.	Оценивание области рассеивания координат специального космического аппарата по результатам испытаний	12
Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.	Обратное Z-преобразование при идентификации дискретных систем с запаздыванием	5
Бондаренко И. Б.	Метод многоуровневой оптимизации в задаче раздельного резервирования элементов	5
Васильев П. В., Мелешко А. В., Пятков В. В.	Повышение точности корректируемой инерциальной навигационной системы	12
Востриков А. А., Балонин Ю. Н.	Матрицы Адамара — Мерсенна как базис ортогональных преобразований при маскировании видеоизображений	1
Готюр И. А., Костромитинов А. В.	Технология описания и раскодирования метеорологических данных на основе алгебраического подхода	1
Денисов А. В., Белянский М. А.	Особенности моделирования случайно-неоднородной ионосферы в задаче о распространении радиоволн в околоземном пространстве	3
Диковицкий В. В., Шишаев М. Г.	Технология формирования адаптивных пользовательских интерфейсов для мультипредметных информационных систем промышленных предприятий	10
Дружков П. Н.	Уменьшение размерности признаков описаний в задаче детектирования объектов на изображениях	5
Дударенко Н. А., Полинова Н. А., Сержантова М. В., Ушаков А. В.	Кратные биномиальные структуры в задаче аппроксимации динамических цепей, содержащих звено чистого запаздывания	7
Красильников А. В., Красильников Р. В.	Моделирование процесса отделения необитаемого подводного аппарата от надводного носителя	3
Никифоров В. В.	Протокол предотвращения взаимного блокирования задач в системах реального времени	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Парамонов И. Ю., Смагин В. А.	Объемная информационная сеть и ее свойства	7
Парамонов И. Ю., Смагин В. А.	Сложность и эффективность информационных сетей	5
Сеньченков В. И., Некрасов И. Н.	Ограничения в задачах построения оптимальных алгоритмов определения технического состояния системы	10

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аверкиев Н. Ф., Салов В. В., Жаткин А. Т., Киселев В. В.	Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления	7
Аверьянов А. В., Барановский А. М., Эсаулов К. А.	Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем	3
Арсеньев В. Н., Булукбаев Д. А., Силантьев С. Б.	Метод коррекции координат точки прицеливания ракеты космического назначения	3
Арсеньев В. Н., Лабцкий П. В.	Метод апостериорного оценивания характеристик систем управления летательного аппарата	10
Буйносов А. П., Стаценко К. А., Кислицын А. М.	Автоматическая измерительная система для контроля геометрических параметров колесных пар локомотивов	3
Герасимов Д. Н., Никифоров В. О., Парамонов А. В., Серов Д. С.	Адаптивное управление крутящим моментом в инжекторных двигателях внутреннего сгорания с переменными фазами газораспределения	12
Данилова Т. В.	Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата при отсутствии априорной информации	5
Жаринов И. О., Жаринов О. О., Парамонов П. П., Костишин М. О., Сударчиков С. А.	Принципы построения автоматических систем в канале управления тепловыми и светотехническими характеристиками бортовых средств индикации	12
Журов Г. Е., Цивинский М. Ю.	Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени	5
Колола А. Л., Попов С. О.	Оптимизация автоматизированной системы контроля и учета энергоресурсов	7
Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л.	Условие и критерий устойчивости упругих чувствительных элементов герконов	10

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Лисов О. И., Чжо Зо Е, Пайе Тэйи Наинг	Методика оптимизации управления технологическими процессами распределенных систем	3
Лоскутов А. И., Бянкин А. А., Дуников А. С., Паршуткин А. В.	Метод символьной синхронизации радиотелеметрических систем в частотно-временной области	10
Мальцев Г. Н., Афонин Г. И.	Оптимизация параметров адаптивного контура следящей системы автоматического управления на основе анализа частотной характеристики	7
Неугодникова Л. М.	Задача планирования действий информационного беспилотного летательного аппарата	7
Посягин А. И., Южаков А. А.	Самомаршрутизация сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети	5
Фисенко В. Т., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю., Вилесов Л. Д., Фёдоров Д. А.	Метод автоматического обнаружения и прослеживания многих малоразмерных объектов в условиях априорной неопределенности	10
Фуртат И. Б.	Управление объектами в условиях неопределенности и ограничений на амплитуду входного сигнала	1
Шакирьянов М. М.	Система защиты турбокомпрессора от помпажа	1
Шарапов В. М., Петрищев О. Н., Прохоренков А. М., Базило К. В., Сотула Ж. В.	Методы повышения звукового давления мономорфных акустических пьезоэлементов	5
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА</b>		
Балонин Н. А., Сергеев М. Б.	Вычисление матриц Мерсенна методом Пэли	10
Жаринов О. О., Жаринов И. О.	Синтез и оптимизация вычислительных алгоритмов обработки сигнала на основе корреляционно-экстремального метода в электрокардиографии высокого разрешения	1
Мамедов Н. Я., Абдуллаев Н. Т., Агаева Г. С.	Численный алгоритм спектрального анализа измерительных сигналов	7
Немолочнов О. Ф., Осовецкий Л. Г.	Кризис промышленной технологии программирования, недеklarированные возможности и don't care	1

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Непомнящий О. В., Хабаров В. А., Рыженко И. Н., Комаров А. А.	Методы и средства определения частотной ошибки сигнала спутниковой связи в режиме реального времени	3
Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.	Метод контроля доступа к файлам на основе их ручной и автоматической разметки	7

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Козлов А. В., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А.	Программный прием и обработка сигналов навигационной системы "Compass"	3
Барабанова Л. П.	Алгоритм для приемников глобального спутникового позиционирования в неоднородной атмосфере	10
Ветренко В. И., Романова Т. И., Романов А. С.	Гироскопическая стабилизация двухколесного подвижного устройства	10
Северов Л. А., Пономарев В. К., Панферов А. И., Овчинникова Н. А.	Модель динамики микромеханических гироскопов на основе кольцевого резонатора в упругом подвесе	10

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю.	Поляризатор для эффективного намагничивания текущей жидкости	3
--	--	---

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Артюшенко В. М., Воловач В. И., Иванов В. В.	Статистические характеристики сигналов и помех радиотехнических устройств ближнего действия	7
Афонин В. С., Кривобоков Д. Е.	Применение нейросетевых технологий для определения величины расхода сыпучего вещества	1
Ватутин М. А.	Нелинейное звено с запаздыванием для автоколебательного акселерометра	7
Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю.	Измерение слабых магнитных полей нутационным ядерно-магнитным магнитометром на текущей жидкости	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Куц С. А.	Формирование оптимальных булевых функций при аналого-цифровом преобразовании с cognate-реализацией	10
Передельский Г. И.	Мостовые цепи с импульсным питанием и уравниванием заземленными регулируемые элементами	3

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Аллес М. А., Соколов С. В.	Оптический генератор импульсных последовательностей	7
Андреев Л. Н., Ежова В. В., Дегтярева Г. С.	Модульное проектирование оптических систем	3
Антонов А. С., Ишанин Г. Г.	Оптико-электронный газоанализатор для контроля диоксида азота	1
Борзов С. М., Потатуркин О. И.	Алгоритм выделения малоразмерных объектов на основе поиска пространственных аномалий для тепловизионных систем наблюдения	3
Голубева А. Ю., Иванов А. И., Прокопенко В. Т.	Компьютерное моделирование светодиодных светильников	7
Демин А. В., Менделеева Л. М.	Алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов	1
Ежова В. В., Зверев В. А., Тимошук И. Н.	Аберрационные свойства тонкой линзы в широких и узких пучках лучей	5
Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б.	Условия построения двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения	7
Зацепина М. Е., Кирилловский В. К.	Реализация современного количественного теневого метода	3
Зацепина М. Е., Кирилловский В. К.	Тенеграмма линейной решетки как геометрическая модель интерферограммы сдвига	5
Кирилловский В. К., Голубев А. М.	Модернизация рефрактометра Аббе и теоретическое обоснование повышения его точности	1
Липатов А. Н., Экономов А. П., Макаров В. С., Захаркин Г. В., Богачев Д. Л., Румянцев Д. М., Антоненко С. А.	Камера-спектрометр для исследований минералогического состава грунта	3
Смирнов А. П., Романова Т. Л.	Стабилизация космической платформы с помощью трех автоколлиматоров	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Смирнов Н. В., Лопатина М. С., Митрофанов С. С.	Считывающая система преобразователя линейных перемещений	5
Сухов Т. М.	Реализация принципа постоянной цветовой яркости для систем кодирования видеоинформации	7
Сушков А. Л.	Коррекция кривизны поля изображения линзы с радиальной неоднородностью показателя преломления	10
Трофимов В. А., Нагибин Ю. Т., Прокопенко В. Т., Уразгалиев В. Т.	Исследование масштаба изображений проекционной картины эллипса поляризации света	3
Федоров Ю. В., Федорова А. Ю.	Перфорационные очки	5

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Лаповок Е. В., Ханков С. И.	Стационарный тепловой режим базируемого на поверхности Луны объекта с внутренним термостатированием	12
Захаров И. В., Кремез Г. В., Фролков Е. В.	Экспериментальное исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры на космических аппаратах серии „Можаец“	10

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Гончаров И. Н., Козырев Е. Н., Аскеров Р. О.	Исследование вторично-эмиссионной способности многоканальных электронных умножителей на пористых анодированных структурах	7
Егоров И. М., Алексанин С. А., Федосовский М. Е., Птицына А. С.	Влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора	10
Косаревский С. В., Латыпов В. Н.	Имитационное моделирование сборки винтовых пар деталей машиностроения по данным компьютерной томографии	10
Хуинь Конг Ту, Скворцов А. М., Петров А. А.	Формирование морфологии системы SiO <sub>2</sub> /Si под действием излучения эксимерного лазера	1
Черных С. В.	Возможная чувствительность магнитных датчиков на основе гранулированных сверхпроводников	1
Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Грибовский А. А.	Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий	5

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Марчук С. М.	Использование среды MathCAD для расчета оптических систем в области аббераций третьего порядка	7
--------------	--	---

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ</b>		
Багдасаров А. А., Багдасарова О. В., Данчина Е. В.	Ручная щелевая лампа на базе микроскопа Грену для офтальмологии	12
Федоров Ю. В., Федорова А. Ю.	Аккомодостимуляторы	12
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>		
Алехин А. А., Перетягин В. С.	Двухканальная оптико-электронная система цветового анализа минералов	7
Горбунова Е. В., Кортаев В. В., Ластовская Е. А.	Измерительная система для анализа оптических характеристик покрытий	10
Горбунова Е. В., Кортаев В. В., Ластовская Е. А.	Компьютерное моделирование цвета мяса	12
Златов А. С., Захаров В. В.	Проведение температурных исследований на конфокальном сканирующем микроскопе	10
Иванов С. В., Вишератин А. А., Насонов Д. А., Бухановский А. В.	Метод реконструкции экстремальных природных явлений редкой повторяемости для повышения эффективности защиты Санкт-Петербурга от наводнений	12
Кортаев В. В., Нгуен Х. В., Тимофеев А. Н., Ярышев А. Н.	Метод выделения препятствия для активной стереоскопической системы безопасности автомобиля	12
Марусин М. П., Протасеня Т. А.	Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов	10
Павленко Н. А., Петухова Д. Б.	Возможности оптического метода обогащения минерального сырья	7
Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В., Райхерт В. А., Кузнецов М. В., Чесноков В. В.	О возможности реализации одностадийного лазерного метода микроструктурирования поверхности сапфира	10
<b>ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК</b>		
<b>РЕЧЕВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b>		
Алейник С. В., Столбов М. Б.	Оценка временного сдвига между аудиосигналами в задачах двухканальной фильтрации	2
Алейник С. В., Столбов М. Б.	Стохастичность акустических сигналов и ее оценивание	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бибиков С. В., Матвеев Ю. Н., Семенов Н. Н.	Оценка функциональной безопасности обнаружения виброакустического сигнала приближающегося поезда	2
Булгакова Е. В., Краснова Е. В.	Экспертные системы и методы идентификации диктора	2
Дырмовский Д. В., Коваль С. Л., Хитров М. В.	Концепция системы национального фоноучета и голосового биометрического поиска	2
Киселёв В. В., Ткачя А. В., Хитров М. В.	Исследование каналонезависимых информативных признаков	2
Матвеев Ю. Н., Шулипа А. К.	Анализ возможности применения методов машинного обучения на основе многообразий в задачах распознавания дикторов	2
Новоселов С. А., Сухмель В. А., Шолохов А. В., Пеховский Т. С.	Применение DTW-метода для мультисессионного обучения скрытых марковских моделей в задаче текстозависимой верификации диктора	2
Столбов М. Б., Татарникова М. Ю.	Разделение речи целевого и сторонних дикторов с использованием двухмикрофонной системы	2
Томашенко Н. А., Хохлов Ю. Ю.	Исследование проблемы сбалансированности данных при построении акустических моделей систем автоматического распознавания речи	2
Хитров М. В., Васильев А. Ю.	Статистические языковые особенности и их гендерные различия на примере литовского языка	2
Черных Г. А., Кореневский М. Л., Левин К. Е., Пономарева И. А., Томашенко Н. А.	Кроссвалидационный контроль состояний при обучении акустических моделей систем автоматического распознавания речи	2
Чистиков П. Г., Хомицевич О. Г., Рыбин С. В.	Статистические методы автоматического определения мест и длительности пауз в системах синтеза речи	2
Щемелинин В. Л., Симончик К. К.	Исследование устойчивости голосовой верификации к атакам, использующим систему синтеза	2

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА  
ЧАСТЬ III**

Бабанин В. С.	Методика создания конструкторско-технологической модели детали в среде CAD-системы	8
Валетов В. А., Филимонова Е. А.	Применение непараметрических критериев для оценки микрогеометрии при импульсном фрезеровании	8

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Восоркин А. С.	Применение систем моделирования при проектировании изделий из полимерных композиционных материалов	8
Клевцов В. А., Помпеев К. П.	Автоматизация процесса проектирования технологий на основе структурного синтеза размерных связей	8
Красильников А. В.	Методика проектной оценки характеристик системы поддержания давления гидродинамического стенда	8
Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А.	Исследование влияния регуляризации микрорельефа поверхностей на качество склеивания стекла с металлом	8
Куликов Д. Д.	Управление знаниями в автоматизированной системе технологической подготовки производства	8
Куликов Д. Д., Клеванский Н. С., Бабанин В. С.	Автоматизированное формирование моделей операционных заготовок	8
Куликов Д. Д., Падун Б. С., Яблочников Е. И.	Перспективы автоматизации технологической подготовки производства	8
Куликов Д. Д., Сагидуллин А. С., Носов С. О.	Интеграция САД-системы с системами автоматизированного проектирования	8
Леонов Д. Б., Иванов А. Ю.	Воздействие внешней среды на эксплуатационные свойства поверхностей деталей	8
Медунецкий В. М., Солк С. В.	Конструкторско-технологические методы повышения показателей качества инфракрасных оптико-механических систем	8
Носов С. О., Сагидуллин А. С.	Организация метаданных в системе управления знаниями	8
Падун Б. С.	Взаимодействие процессов механического и сборочного производства	8
Пирогов А. В., Васильков С. Д., Савченко В. П.	Контроль качества оптических изделий из термопластичных полимерных материалов	8
Рябчиков И. Н.	Проектирование шаблонов управляющих программ измерения на основе конструкторско-технологической модели заготовки	8
Филимонова Е. А., Юльметова О. С., Третьяков С. Д.	Оценка шероховатости поверхности с использованием трехмерных топографий	8
Филоуков Н. Е.	Система администрирования web-ориентированной автоматизированной системы технологической подготовки производства	8

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Яблочников Е. И., Смирнов П. В., Воробьев А. С.	Применение систем виртуального моделирования для разработки технологических процессов корпусирования электронных компонентов	8

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СФЕРЕ СЕРВИСА**

Богатырев В. А., Богатырев А. В.	Уточненная граничная оценка надежности структурно сложных систем при композиции методов Эзари — Прошана и Литвака — Ушакова	9
Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В.	Перераспределение запросов между вычислительными кластерами при их деградации	9
Верзун Н. А., Воробьев А. И., Пойманова Е. Д.	Моделирование процесса передачи информации с разграничением прав доступа пользователей	9
Воробьев А. И., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.	Оценка вероятностно-временных характеристик процесса предоставления информационно-справочных услуг	9
Головкин Ю. Б., Гусаренко А. С.	Применение нечетких гиперграфов в моделях генерации web-компонентов	9
Головкин Ю. Б., Ярцев Р. А., Газетдинова С. Г.	Моделирование процессов инструментальной подготовки сервисного обслуживания на основе экспертных оценок	9
Емельянов А. А.	Психодиагностическое тестирование как инструмент повышения надежности программного обеспечения	9
Колбанёв М. О., Верзун Н. А., Омельян А. В.	Об энергетической эффективности сетей пакетной передачи данных	9
Колбанёв М. О., Пойманова Е. Д., Татарникова Т. М.	Физические ресурсы информационного процесса сохранения данных	9
Коршунов И. Л.	Состояние и концепция развития информационных технологий в сфере сервиса	9
Левкин И. М.	Модель обработки документальных источников информации деловой разведки	9
Микадзе С. Ю., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.	Модель информационного взаимодействия для предприятий сервиса	9
Попова Е. В.	Эффективность системы защиты информации с учетом критерия обеспечения конкурентоспособности предприятия	9

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Пуха Г. П., Попов П. В., Драчев Р. В., Попцова Н. А.	Построение системы интеллектуальной поддержки принятия решений по организации услуг мобильной связи	9
Пуха Г. П., Прохорова Е. А.	Вариант построения балльно-рейтинговой системы оценки знаний при реализации образовательных услуг	9
Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В.	Оценка функциональной надежности корабельной сети передачи данных	9

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Будков В. Ю., Ронжин А. Л.	Информационная модель сопровождения распределенных мероприятий в интеллектуальном зале совещаний	11
Бураков В. В.	Моделирование и идентификация дефектов объектно-ориентированного программного кода	11
Дойникова Е. В., Котенко И. В.	Анализ текущей ситуации и поддержка принятия решений по безопасности компьютерной сети на основе системы показателей защищенности	11
Кулаков А. Ю.	Модель оценивания расхода топлива космического аппарата с учетом нештатных ситуаций	11
Мануйлов Ю. С., Зиновьев С. В., Прищепа Ю. В., Алешин Е. Н.	Исследование динамической и энергетической совместимости системы позиционирования и управления угловым движением космической солнечной энергостанции	11
Муравьев А. В., Березин А. Н., Молдовян Д. Н.	Протокол стойкого шифрования сообщений с использованием коротких ключей	11
Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В.	Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы	11
Павлов А. Н., Павлов Д. А., Москвин Б. В., Григорьев К. Л.	Модифицированная модель гибкого перераспределения технологических операций информационного взаимодействия	11
Потрясаев С. А.	Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами	11
Рыжиков Ю. И.	Оптимизация маршрутной матрицы в сетях обслуживания	11
Тележкин А. М.	Система САМПО+ для создания и анализа исторической базы данных	11
Федорченко Л. Н.	Метод регуляризации грамматик в системах построения языковых процессоров	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Федорченко А. В., Чечулин А. А., Котенко И. В.	Построение интегрированной базы уязвимостей	11

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**  
**К 100-ЛЕТИЮ С. А. МАЙОРОВА**  
**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

Алиев Т. И.	Проектирование систем с приоритетами	4
Антонов А. А., Быковский С. В., Кустарев П. В.	Монитор временных ограничений для систем на кристалле	4
Батура В. А., Тропченко А. Ю.	Эффективность алгоритмов маркирования цифровых изображений в частотной области на основе дискретного преобразования Адамара	4
Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В.	Оптимизация перераспределения нагрузки в кластерах при изменяющейся активности источников запросов	4
Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В.	Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени	4
Гедич А. А., Зыков А. Г., Лаздин А. В., Поляков В. И.	Поиск процедур по графу переходов функциональной программы при верификации вычислительных процессов	4
Дергачев А. М., Дергачев А. А.	Параметры качества обслуживания web-сервисов отрасли приборостроения	4
Калинин И. В., Клименков С. В., Харитонов А. Е., Цопа Е. А.	Преобразование естественного языка в формат RDF с помощью семантических анализаторов текстовой информации	4
Кормилицын А. Ю., Поляков В. И.	Методы и средства мониторинга дыхания	4
Маркина Т. А., Щеглов А. Ю.	Метод защиты от атак типа drive-by-загрузка	4
Муравьева-Витковская Л. А.	Метод расчета характеристик замкнутых детерминированных моделей мультисервисных компьютерных сетей	4
Ожиганов А. А.	Квазиабсолютный цифровой преобразователь угла на основе двухдорожечной рекурсивной нелинейной кодовой шкалы	4
Платунов А. Е.	Реконфигурируемые встраиваемые системы и системы на кристалле	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Поляков В. И., Скорубский В. И.	Использование многозначной логики при проектировании функциональных схем	4
Ростовский К. М., Ожиганов А. А.	Кодовые шкалы на основе инверсно-сопряженных двоичных последовательностей	4
Соснин В. В.	Время ожидания в неоднородных системах с очередями при обслуживании заявок в порядке поступления	4
Тропченко А. А.	Методы повышения робастности распознавания в мультимодальных биометрических системах	4
Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.	Непротиворечивая модель мандатного контроля доступа	4

### СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

#### ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

Азарова В. В., Макеев А. П., Симонов В. П.	Численная модель поляризационных и спектральных характеристик лазерных зеркал и оптических резонаторов	6
Азарова В. В., Цветкова Т. В.	Анализ шероховатости прецизионных оптических поверхностей с использованием метода интерференционной микроскопии	6
Вейко В. П., Агеев Э. И., Колобов А. В., Томинага Дж.	Лазерно-индуцированная структурно-фазовая модификация стеклообразных материалов	6
Вейко В. П., Самохвалов А. А.	Анализ механизма лазерной абляции под слоем жидкости на основе термофлуктуационной теории разрушения	6
Вейко В. П., Слободов А. А., Одинцова Г. В.	Применение метода химической термодинамики при анализе лазерного термохимического воздействия на металлы	6
Волков М. В., Кишалов А. А., Храмов В. Ю.	Применение волоконного лазера для закалки резьбовых соединений с целью повышения их износостойкости	6
Заколдаев Р. А., Сергеев М. М., Костюк Г. К., Яковлев Е. Б.	Лазерное формирование волноводных структур в объеме пластин пористого стекла, пропитанного водным раствором глицерина	6
Петров А. А., Варжель С. В., Куликов А. В., Паланджян Д. А., Грибаев А. И., Коннов К. А.	Запись решеток Брэгга в анизотропном оптическом волокне излучением эксимерного ArF лазера	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Петров А. А., Кочетова В. А., Кочетов А. Д., Синев Д. А., Якушева А. А.	Лазерная вытяжка стеклянных волокон нано- и субмикронного размера	6
Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л., Попов И. А., Чеботаревский Ю. В.	Численное моделирование напряжений, генерируемых при воздействии лазерных ультракоротких импульсов на стеклоуглеродные материалы	6
Струсевич А. В., Полтаев Ю. А., Синев Д. А.	Лазерная очистка поверхности стекла от граффити	6
Темников А. О., Гайосо де лос Сантос А. Р.	Методы коррекции формы импульса тока в источниках питания лазеров с диодной накачкой	6
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
Шехонин А. А., Гвоздев С. С., Абдеева А. Ф.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров по оптическим и приборостроительным направлениям и специальностям в 2013 г.	1
—	Николай Васильевич Бутенин. К 100-летию со дня рождения	10