

Министерство обороны Российской Федерации
Министерство промышленности и энергетики Саратовской области
ПАО «Тантал», ОАО «Институт критических технологий»
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

Решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ издание включено в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

Гетеромагнитная микроэлектроника

Сборник научных трудов

ВЫПУСК 21

**Теоретические и экспериментальные исследования,
компьютерные технологии.
Методические аспекты физического образования.
Экономика в промышленности**

Под редакцией профессора *А. В. Ляшенко*

Саратов
Издательство Саратовского университета
2016

УДК 621.382.029.6
ББК 548.537.611.44
Г44

Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. – Вып. 21 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. – 148 с. : ил.

В настоящем выпуске сборника представлены материалы по автономным системам ориентации и навигации, повышению их отказоустойчивости и техническому обеспечению, компьютерному моделированию биполярного транзистора, декодеру битов управления, методическим аспектам физического образования, инновационной активности, эконометрической модели по краткосрочным кредитам.

Для специалистов-разработчиков, экспертов, работающих в области геомагнитной ориентации и навигации, а также докторантов, аспирантов и студентов.

Редакционная коллегия:

А. А. Игнатьев, д-р физ.-мат. наук, проф. (отв. редактор); *М. Н. Куликов*, канд. физ.-мат. наук, проф. (зам. отв. редактора); *Л. Л. Страхова*, канд. физ.-мат. наук, доц. (отв. секретарь); *С. Ю. Глазьев*, д-р экон. наук, проф., акад. РАН; *В. И. Борисов*, д-р техн. наук, член-корр. РАН; *С. А. Никитов*, д-р физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН; *О. С. Сироткин*, д-р техн. наук, член-корр. РАН; *О. Ю. Гордашникова*, д-р экон. наук, проф.; *А. Н. Плотников*, д-р экон. наук, проф.; *Е. А. Наумов*, канд. экон. наук, проф., акад. РАЕН; *Л. С. Сотов*, д-р техн. наук, проф.; *А. А. Солопов*, канд. экон. наук; *С. П. Кудрявцева*, канд. техн. наук, доц.; *С. В. Овчинников*, канд. физ.-мат. наук, доц.; *В. А. Малярчук*, канд. техн. наук., доц.; *А. Л. Хвалин*, д-р техн. наук, проф.; *Б. А. Медведев*, канд. физ.-мат. наук, доц.; *Л. А. Романченко*, канд. техн. наук, доц.; *А. С. Краснощекова*, зам. нач. КБ КТ по общим вопросам (референт ОАО «Институт критических технологий»)

УДК 621.382.029.6
ББК 548.537.611.44

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» включен 1 декабря 2015 г. под № 1168 в обновленный Перечень (п. 1168) ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Сборник выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном доступе (спецвыпуски) – публикует материалы по группам научных специальностей:

- 01.04.00 «Физика»;
- 05.12.00 «Радиотехника и связь»;
- 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»;
- 05.27.00 «Электроника»;
- 08.00.00 «Экономические науки».

В настоящем выпуске сборника «Гетеромагнитная микроэлектроника» представлены материалы по разделам «Теоретические и экспериментальные исследования», «Методические аспекты физического образования», «Экономика в промышленности».

В разделе «Методические аспекты физического образования» рассмотрены особенности текущей и промежуточной аттестации научно-исследовательской работы студентов магистратуры «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности», предложена методическая разработка определения намагниченности пластинообразных магнитов.

В разделе «Экономика в промышленности» представлены аспекты инновационной активности социально-экономических систем, эконометрическая модель для прогнозирования процентной ставки по краткосрочным кредитам.

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук,
профессор *А. А. Игнатьев*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 531.38

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТОИНЕРЦИАЛЬНОГО МОДУЛЯ

**А. В. Ляшенко, Г. М. Проскуряков, М. В. Поздняков, Г. Н. Румянцев*,
А. А. Игнатъев**, А. В. Васильев**, Д. М. Спиридонов****

ОАО «Институт критических технологий»,
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
E-mail: kbkt@renet.ru

*ФГУП «НПЦ Автоматики и приборостроения им. акад. Н. А. Пилюгина»,
Россия, 117342, Москва, Введенского, 1
E-mail: info@npcar.ru

**Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Решена задача технологического обеспечения магнитоинерциального модуля, сформулированная как задача многомерного оценивания и учета векторов. Применительно к бесплатформенному магнитоинерциальному модулю доказана необходимость проведения в четыре этапа технологических операций индивидуальных калибровок, аналитических юстировок, алгоритмической идентификации инструментальных ошибок и параметров измерительных каналов, платформы и окружающей среды.

Ключевые слова: технологическое обеспечение, калибровка, матрица сборки и монтажа блоков, алгоритмическая идентификация.

Technological Environment of Magnetic-inertial Module

**A. V. Lyashenko, G. M. Proskuryakov, M. V. Pozdnyakov, G. N. Romyantsev,
A. A. Ignatiev, A. V. Vasiliev, D. M. Spiridonov**

The task of the technological support of the magnetic-inertial module is solved as a problem of a multidimensional estimation and accounting of the vectors. It was demonstrated that for the magnetic-inertial module it is necessary to carry out in four steps the series of the individual calibration tests, analytical alignments, algorithmical identification of instrumental errors, measurement canals, base and environment.

Key words: technological support, calibration, matrix of assemblage and mounting, algorithmical identification.

В век широкомасштабного внедрения и использования информационно-компьютерных технологий в различных областях техники важно

обеспечить разработку и совершенствование разнообразных по назначению измерительно-вычислительных систем (аппаратных модулей, а также их программно-алгоритмического и технологического обеспечения).

В соответствии с такой тенденцией развития информационно-компьютерных технологий и систем в КБ критических технологий (г. Саратов) разработан бесплатформенный *магнитоинерциальный модуль* (МИМ) [1, 2], который как универсальный многофункциональный навигационно-измерительный комплекс предназначен для выполнения следующих функций [1–4]:

- решение задач *ориентации и навигации* подвижных объектов;
- *позиционирование* роботов, беспилотных летательных, плавающих, наземных, баллистических и космических аппаратов, автомобилей;
- бесконтактный дистанционный магнитный *поиск, обнаружение и идентификация* различных ферромагнитных объектов (затонувших кораблей, пропавших летательных аппаратов, мин и снарядов, месторождений железосодержащих руд, историко-архитектурных объектов и пр.);
- бесконтактное дистанционное магнитное *наведение* ракет и антиракет на объекты военной техники в условиях отсутствия прямой видимости;
- применение в магнитных охранно-поисковых системах (МОПС) для обеспечения периметровой и пространственной *охраны* специальных объектов гражданского и военного назначения (аэродромы, порты и вокзалы, АЭС и ГЭС, стратегические мосты и путепроводы, мегаполисы и заповедники, охраняемые национальные акватории и территории, охраняемые государственные границы территорий стран, архитектурно-исторические памятники и ансамбли и др.).

МИМ представляет собой малогабаритный бесплатформенный моноблок (масса около 200 г, диаметр 110 мм, длина 65 мм) с фланцевым креплением к корпусу объекта. В состав измерительной части входят трехосные блоки магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА), гироскопов (ТБГ), микробаровысотомер, антенный *GPS*-модуль, устройство ввода информации. Вычислительная часть содержит аналого-цифровые преобразователи и микроконтроллер.

Коллективом КБ критических технологий создан комплекс всех необходимых для работы МИМ обеспечений [1–7]:

- математического (МО);
- алгоритмического (АО);
- программного (ПО);
- технического (ТО);
- методико-технологического (МТО).

Выполнение МИМ различных функций реализуется за счет сменного *программно-алгоритмического обеспечения* (ПАО) при неизменной аппаратной части модуля. ПАО МИМ строится на основе преобразования уравнений, описывающих формирование девятимерных показаний модуля [2]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_M^T \mathbf{u}_a^T \mathbf{u}_r^T \bar{\mathbf{T}} = u_{xM} \quad u_{yM} \quad u_{zM} \quad u_{xa} \quad u_{ya} \quad u_{za} \quad u_{xr} \quad u_{yr} \quad u_{zr} \quad \bar{\mathbf{T}}, \quad (1)$$

где \mathbf{u} – вектор показаний модуля; \mathbf{u}_m^T , \mathbf{u}_a^T , \mathbf{u}_r^T – транспонированные матрицы-столбцы (векторы), соответствующие показаниям блоков магнитометров, акселерометров и гироскопов; u_{xm} , u_{ym} , u_{zm} , u_{xa} , u_{ya} , u_{za} , u_{xr} , u_{yr} , u_{zr} – компоненты векторов ТБМ, ТБА, ТБГ.

Трехмерные показания блоков описываются с помощью векторов:

– ТБМ

$$\mathbf{u}_m = \begin{bmatrix} u_{xm} & u_{ym} & u_{zm} \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

– ТБА

$$\mathbf{u}_a = \begin{bmatrix} u_{xa} & u_{ya} & u_{za} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

– ТБГ

$$\mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} u_{xr} & u_{yr} & u_{zr} \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

Квазилинейные метрологические характеристики измерительных каналов ТБМ, ТБА, ТБГ могут быть представлены в векторно-матричной форме [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_m &= \text{diag} \begin{bmatrix} \gamma_x & \gamma_y & \gamma_z \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}_m + \Delta \mathbf{u}_m, \\ \mathbf{u}_a &= \text{diag} \begin{bmatrix} k_x & k_y & k_z \end{bmatrix} \cdot \mathbf{n}_m + \Delta \mathbf{u}_a, \\ \mathbf{u}_r &= \text{diag} \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega}_m + \Delta \mathbf{u}_r, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\text{diag}(\dots)$ – условное обозначение диагональных матриц масштабных коэффициентов (3×3); $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, k_x, k_y, k_z, n_x, n_y, n_z$ – масштабные коэффициенты соответствующих измерительных каналов ТБМ, ТБА, ТБГ; $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \boldsymbol{\omega}_m$ – векторы напряженности магнитного поля, кажущегося ускорения и угловой скорости вращения основания, заданные в связанном трехграннике $m = XYZ$; $\Delta \mathbf{u}_m, \Delta \mathbf{u}_a, \Delta \mathbf{u}_r$ – векторы нулевых сигналов ТБМ, ТБА, ТБГ.

В свою очередь, измеряемые векторы напряженности магнитного поля (\mathbf{T}_m), кажущегося ускорения (\mathbf{n}_m) и абсолютной угловой скорости ($\boldsymbol{\omega}_m$) вращения подвижного объекта, заданные в связанном ортогональном трехграннике $m = XYZ$, описываются с помощью уравнений Пуассона и Эйлера [2]:

$$\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix}^T = B_m \cdot M \cdot (S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^q + \mathbf{T}_{МПП}^q + \mathbf{T}_{МПО}, \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_m = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T = B_a \cdot M \cdot A_0 \cdot \mathbf{g}_q + \Delta \mathbf{g}_q + \mathbf{a}_m, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\omega}_m = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T = B_r \cdot M \cdot A \cdot \boldsymbol{\Omega}_q + \boldsymbol{\Psi} + \dot{\boldsymbol{\Theta}} + \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \Delta \boldsymbol{\omega}_{др}^m, \quad (8)$$

где $\mathbf{T}_{МПЗ}^q, \mathbf{T}_{МПП}^q, \mathbf{g}_q, \boldsymbol{\Omega}_q$ – векторы напряженности магнитного поля Земли (МПЗ), магнитного поля помех (МПП), поля тяжести Земли (ПТЗ) и угловой скорости вращения Земли, заданные в географическом трехграннике $q = NHE$; $\mathbf{T}_{МПО}, \mathbf{a}_m, \Delta \boldsymbol{\omega}_{др}^m$ – векторы напряженности магнитного поля объекта (МПО), абсолютного линейного ускорения основания и угловой скорости

дрейфа гироскопов, заданные в связанном трехграннике $m = XYZ$; $(\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma})_q$ – векторы угловых скоростей вращения ПО по рысканию, тангажу и крену относительно Земли, заданные в неподвижном трехграннике $q = NHE$; B_m, B_a, B_r – матрицы (3×3) сборки ТБМ, ТБА, ТБР; M – матрица монтажа МИМ на объекте; A – матрица ориентации ПО; S – матрица коэффициентов Пуассона; E – единичная матрица (3×3).

Из анализа выражений (1)–(8) видно, что на показания МИМ (\mathbf{u}) оказывают влияние внешние и внутренние факторы двух типов [3]:

- *полезные* воздействия, связанные с полезной информацией ($\mathbf{T}_{мпз}, \mathbf{g}, \mathbf{\Omega}, A, \gamma_0; \mathbf{k}_0; \mathbf{n}_0$);
- *дестабилизирующие* воздействия, связанные с действием внешних и внутренних возмущений ($\mathbf{T}_{мпо}, S, \Delta \mathbf{g}_q, \mathbf{a}_m, \dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma}, \Delta \boldsymbol{\omega}_{др}^m, B_m, B_a, B_r, M$ и др.).

Алгоритмы обработки многомерной информации ($\mathbf{u}, \mathbf{u}_m, \mathbf{u}_a, \mathbf{u}_r$) формируются на основе обращения метрологических характеристик модуля (5), а также уравнений Пуассона и Эйлера (6)–(8). Однако для получения рабочих алгоритмов, гарантирующих корректное решение соответствующих задач с ограниченным уровнем допустимых погрешностей, важно предварительно провести комплекс операций, входящих в содержание *методико-технологического обеспечения* (МТО) [3, 6, 7]. Следует иметь в виду, что от качества и полноты выполнения МТО модуля зависят в конечном счете показатели точности, надежности, долговечности и работоспособности МИМ в условиях эксплуатации.

В настоящей работе обосновывается необходимое содержание МТО МИМ – методик, алгоритмов и технологий проведения операций, обеспечивающих предварительную идентификацию дестабилизирующих технологических факторов и их последующий учет в алгоритмах автономной работы. МТО МИМ выполняется в четыре этапа (рис. 1):

- технологическая калибровка блоков МИМ, которая сводится к проведению метрологической ($\gamma, \mathbf{k}, \mathbf{n}, \Delta \mathbf{u}_{мо}, \Delta \mathbf{u}_{ао}, \Delta \mathbf{u}_{го}$), температурной ($\Delta \gamma(\Delta t), \Delta \mathbf{k}(\Delta t), \Delta \mathbf{n}(\Delta t), \Delta \mathbf{u}_m(\Delta t), \Delta \mathbf{u}_a(\Delta t), \Delta \mathbf{u}_r(\Delta t)$) и режимной калибровок ($\Delta \gamma(\Delta u), \Delta \mathbf{k}(\Delta u), \Delta \mathbf{n}(\Delta u), \Delta \mathbf{u}_m(\Delta u), \Delta \mathbf{u}_a(\Delta u), \Delta \mathbf{u}_r(\Delta u)$), а также аналитической юстировки (B_m, B_a, B_r);
- объектовая калибровка МИМ, предполагающая идентификацию МПО ($S, \mathbf{T}_{мпо}$) и аналитическую юстировку модуля (M);
- аттестация рабочего места и маршрута, которая заключается в позиционировании базовых и контрольных точек ($\varphi_0; \lambda_0; h_0$); ($\varphi; \lambda; h$), измерении МПЗ в базовых и контрольных точках ($\mathbf{T}_{мпз}^0, \mathbf{T}_{мпз}$), построении географической (ГГС) и геомагнитной (ГМС) сеток;
- паспортизация рабочего места и маршрута в виде измерений параметров реальных геофизических полей (ГФП): магнитного поля реального (МПР), поля тяжести реального (ПТР) – в контрольных и базовых точках, вычисления параметров нормальных ГФП: магнитного поля Земли нормального (МПЗ-Н), поля тяжести Земли нормального (ПТЗ-Н), определения магнитных и гравитационных аномалий и вариаций ($\Delta \mathbf{T}_{мпз}, \Delta \mathbf{g}, \delta \mathbf{T}_{мпз}, \delta \mathbf{g}$).

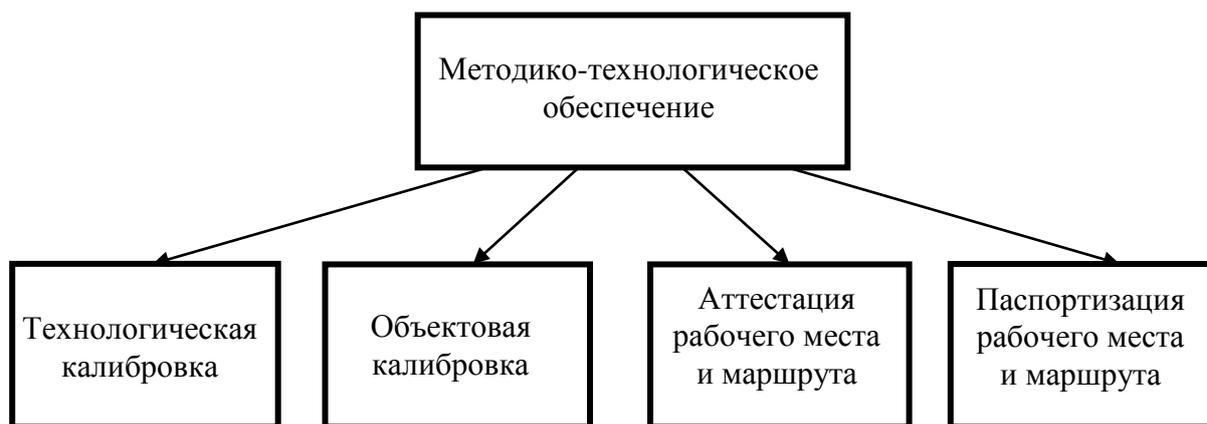


Рис. 1. Методико-технологическое обеспечение МИМ

Общая задача МТО МИМ заключается в определении численных значений параметров, входящих в уравнения (5)–(8) и характеризующих индивидуальные свойства модуля как измерителя и среды его использования (МПО, МПП). Если в результате выполнения МО, АО, ПО, ТО модуля получаем ответы на вопрос: «Что делать?», то при выполнении его МТО формулируется ответ на вопрос: «Как делать?» (чтобы реализовать соответствующие МО, АО, ПО, ТО). Из вышесказанного следует, что МТО МИМ сводится к индивидуальной аттестации и паспортизации модуля как измерителя и среды его использования. Причем аттестация и паспортизация МИМ как измерителя выполняются, как правило, в лабораторных условиях в МПЗ с известными параметрами, например в идеальном МПЗ-Н (не искаженном магнитными аномалиями и вариациями). Аттестация и паспортизация среды (рабочего места (РМ), маршрута) выполняются в результирующем магнитном поле (МПП) с учетом проявления искажений со стороны аномалий и вариаций.

Технологическая калибровка МИМ

Анализ метрологических характеристик (5) блоков МИМ показывает, что векторы масштабных коэффициентов γ_0 , \mathbf{k}_0 , \mathbf{n}_0 блоков, их вариации $\Delta\gamma$, $\Delta\mathbf{k}$, $\Delta\mathbf{n}$ и нулевые сигналы $\Delta\mathbf{u}_m$, $\Delta\mathbf{u}_a$, $\Delta\mathbf{u}_r$ являются многомерными функциями, зависящими от полезных воздействий ($T_x, T_y, T_z, n_x, n_y, n_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$) и по крайней мере от двух дестабилизирующих факторов – изменения температуры (Δt) и режима питания (ΔU). С учетом этого метрологические характеристики модуля (5) можно линеаризовать:

– для ТБМ

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_m = & \text{diag} \begin{bmatrix} \gamma_{x0} & \gamma_{y0} & \gamma_{z0} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}_m + \Delta\mathbf{u}_{m0} + \\
 & + \text{diag} \begin{bmatrix} \Delta\gamma_x(\Delta t) & \Delta\gamma_y(\Delta t) & \Delta\gamma_z(\Delta t) \end{bmatrix} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{T}_m + \\
 & + \text{diag} \begin{bmatrix} \Delta\gamma_x(\Delta U) & \Delta\gamma_y(\Delta U) & \Delta\gamma_z(\Delta U) \end{bmatrix} \cdot \Delta U \cdot \mathbf{T}_m + \\
 & + \Delta\mathbf{u}_{xm}(\Delta t) \quad \Delta\mathbf{u}_{ym}(\Delta t) \quad \Delta\mathbf{u}_{zm}(\Delta t) \cdot \bar{\mathbf{T}} + \\
 & + \Delta\mathbf{u}_{xm}(\Delta U) \quad \Delta\mathbf{u}_{ym}(\Delta U) \quad \Delta\mathbf{u}_{zm}(\Delta U) \cdot \bar{\mathbf{T}}; \quad (9)
 \end{aligned}$$

– для ТБА

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_a = & \text{diag } \mathbf{k}_{x0} \quad k_{y0} \quad k_{z0} \cdot \mathbf{n}_m + \Delta \mathbf{u}_{a0} + \\
& + \text{diag } \mathbf{k}_x(\Delta t) \quad \Delta k_y(\Delta t) \quad \Delta k_z(\Delta t) \cdot \Delta t \cdot \mathbf{n}_m + \\
& + \text{diag } \mathbf{k}_x(\Delta U) \quad \Delta k_y(\Delta U) \quad \Delta k_z(\Delta U) \cdot \Delta U \cdot \mathbf{n}_m + \\
& + \Delta u_{xa}(\Delta t) \quad \Delta u_{ya}(\Delta t) \quad \Delta u_{za}(\Delta t) \cdot \bar{\mathbf{T}} + \\
& + \Delta u_{xa}(\Delta U) \quad \Delta u_{ya}(\Delta U) \quad \Delta u_{za}(\Delta U) \cdot \bar{\mathbf{T}}; \tag{10}
\end{aligned}$$

– для ТБГ

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_r = & \text{diag } \mathbf{n}_{x0} \quad n_{y0} \quad n_{z0} \cdot \mathbf{\omega}_m + \Delta \mathbf{u}_{r0} + \\
& + \text{diag } \mathbf{n}_x(\Delta t) \quad \Delta n_y(\Delta t) \quad \Delta n_z(\Delta t) \cdot \Delta t \cdot \mathbf{\omega}_m + \\
& + \text{diag } \mathbf{n}_x(\Delta U) \quad \Delta n_y(\Delta U) \quad \Delta n_z(\Delta U) \cdot \Delta U \cdot \mathbf{\omega}_m + \\
& + \Delta u_{xr}(\Delta t) \quad \Delta u_{yr}(\Delta t) \quad \Delta u_{zr}(\Delta t) \cdot \bar{\mathbf{T}} + \\
& + \Delta u_{xr}(\Delta U) \quad \Delta u_{yr}(\Delta U) \quad \Delta u_{zr}(\Delta U) \cdot \bar{\mathbf{T}}. \tag{11}
\end{aligned}$$

Правые части линеаризованных метрологических характеристик блоков (9)–(11) содержат члены, соответствующие пяти составляющим:

- номинальным метрологическим характеристикам блоков (с нулевыми индексами);
- мультипликативным температурным погрешностям $\Delta \gamma(\Delta t)$, $\Delta \mathbf{k}(\Delta t)$, $\Delta \mathbf{n}(\Delta t)$;
- мультипликативным режимным погрешностям $\Delta \gamma(\Delta U)$, $\Delta \mathbf{k}(\Delta U)$, $\Delta \mathbf{n}(\Delta U)$;
- аддитивным температурным погрешностям $\Delta \mathbf{u}_m(\Delta t)$, $\Delta \mathbf{u}_a(\Delta t)$, $\Delta \mathbf{u}_r(\Delta t)$;
- аддитивным режимным погрешностям $\Delta \mathbf{u}_m(\Delta U)$, $\Delta \mathbf{u}_a(\Delta U)$, $\Delta \mathbf{u}_r(\Delta U)$.

Эти погрешности устанавливаются экспериментальным путем индивидуально для каждого модуля, его блоков и соответствующих каналов измерений на основе использования технологии проведения *однофакторных калибровок*: метрологических, температурных, режимных [3]. Вместе с тем на основе выражений (5) с учетом одновременного проявления в эксплуатации дестабилизирующих факторов (Δt , ΔU) могут быть проведены более точные *многофакторные* калибровки МИМ (например, двухфакторные температурно-режимные калибровки).

После выполнения метрологических, температурных и режимных калибровок проводится *аналитическая юстировка* ТБМ, ТБА, ТБГ модуля, в задачу выполнения которой входит определение геометрических и технологических погрешностей, характеризующих нарушение условий ортогональности и коллинеарности соответствующих осей чувствительности бло-

ков относительно измерительных осей ортогонального связанного трехгранника $m = XYZ$. Эти погрешности учитываются с помощью матриц сборки B_m , B_a и B_r , общая структура построения которых в линеаризованной форме отражается с помощью обобщенной матрицы B [3]:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_x & -\beta_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \beta_z & -\alpha_z & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$ – геометрические погрешности блоков (углы перекосов осей чувствительностей ТБМ, ТБА, ТБГ относительно осей базового трехгранника $m = XYZ$).

Для идентификации этих погрешностей необходимо провести серию тестовых (идентификационных) экспериментов в лабораторных условиях [3, 6, 7]. При этом соответствующая грань приборного трехгранника $m = XYZ$ (XY, XZ или YZ) поворачивается в горизонтальной плоскости ($\vartheta = \gamma = 0$) вокруг вертикальных осей (Z, Y, X) на различные углы курса ($\psi = \text{var}$, $\psi \in 0, \pm 90^\circ, \pm 180^\circ, \pm 270^\circ$), фиксируемые относительно азимутальных направлений базовых плоскостей географического меридиана NOH (для ТБА и ТБГ) и плоскости геомагнитного меридиана $S_m ON$ (для ТБМ).

Технологическая калибровка МИМ и его блоков проводится, как правило, в лабораторных условиях.

Объектовая калибровка МИМ

После установки на объект откалиброванного модуля на метрологические свойства его блоков будут оказывать дестабилизирующее влияние два дополнительных фактора:

- искажения в показаниях ТБМ, обусловленные влиянием МПО;
- геометрические погрешности монтажа модуля на объекте (M).

Для учета влияния этих факторов на втором этапе проводятся операции идентификации МПО и аналитической юстировки всего модуля.

Операция идентификации параметров МПО сводится к проведению серии (i) тестовых (идентификационных) экспериментов в эталонном магнитном поле (например, в МПЗ с априорно известными и стабильными во времени параметрами) с последующим вычислением параметров МПО ($T_{\text{МПО}}, S$) по алгоритмам магнитной идентификации. Тогда с учетом малости погрешностей монтажа ($M \approx E$) и эталонности геомагнитного поля ($T_{\text{МПО}} \approx 0$) на основании уравнения Пуассона (6), составленного для каждого i -го тестового эксперимента, можно сформировать систему алгебраических уравнений [4] относительно неизвестных параметров вектора $T_{\text{МПО}}$ и матрицы коэффициентов Пуассона S :

$$T_{\text{МПО}} = P \quad Q \quad R_{-}^T, \quad (13)$$

$$S = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & n & k \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_{mi} = T_{xi} \quad T_{yi} \quad T_{zi} \quad \bar{T} = B_M \cdot (S + E) \cdot A_i \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^q + \mathbf{T}_{МПО} \quad \bar{i} = \overline{1, n}; n \geq 4, \quad (15)$$

где P, Q, R – проекции вектора $\mathbf{T}_{МПО}$ на оси связанного трехгранника $m = XYZ$; $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ – коэффициенты Пуассона; $\mathbf{T}_{mi}, T_{xi}, T_{yi}, T_{zi}$ – векторы результирующего магнитного поля и их проекции на оси связанного трехгранника $m = XYZ$, зафиксированные в i -м тестовом эксперименте.

При этом матрица ориентации ПО в пространстве варьируется от эксперимента к эксперименту:

$$A_i = A_{\gamma i} \cdot A_{\vartheta i} \cdot A_{\psi i} \quad \bar{i} = \overline{1, n}; n \geq 4, \quad (16)$$

где A_i – матрицы ориентации A , сформированные для i -го эксперимента; $A_{\gamma i}, A_{\vartheta i}, A_{\psi i}$ – матрицы углов крена, тангажа и курса, сформированные для каждого i -го эксперимента.

При $n > 4$ система уравнений (15) содержит функционально избыточную информацию, соответствующую повышению достоверности получаемых результатов магнитной идентификации.

На основе систем уравнений (15) с учетом соотношений (13), (14), (16) сформируем линейную систему $3n$ алгебраических уравнений степени $3n = 3 \cdot 4 = 12$, которую запишем в компактной векторно-матричной форме [4]:

$$\mathbf{x} = N \cdot \mathbf{y}, \quad (17)$$

$$\mathbf{x} = T_{x1} \quad T_{x2} \quad T_{x3} \quad T_{x4} \quad T_{y1} \quad T_{y2} \quad T_{y3} \quad T_{y4} \quad T_{z1} \quad T_{z2} \quad T_{z3} \quad T_{z4} \quad \bar{T}, \quad (18)$$

$$\mathbf{y} = (a+1) \quad b \quad c \quad p \quad d \quad (e+1) \quad f \quad Q \quad g \quad h \quad (k+1) \quad R^T, \quad (19)$$

где \mathbf{x}, \mathbf{y} – векторы входной и выходной информации; N – матрица (12×12) магнитной идентификации; $T_{x1}, T_{x2}, T_{x3}, T_{x4}, T_{y1}, T_{y2}, T_{y3}, T_{y4}, T_{z1}, T_{z2}, T_{z3}, T_{z4}$ – значения проекций векторов \mathbf{T}_{mi} на оси связанного трехгранника $m = XYZ$, измеренные с помощью ТБМ в каждом i -м тестовом эксперименте ($\bar{i} = \overline{1, n}; n \geq 4$).

Алгоритм магнитной идентификации объекта в точке установки МИМ может быть получен на основе решения векторно-матричного уравнения (17):

$$\mathbf{y} = N^{-1} \cdot \mathbf{x}. \quad (20)$$

Для того чтобы решение уравнения (20) существовало и было единственным и устойчивым, необходимо чтобы матрица магнитной идентификации N была несингулярной:

$$\det N \neq 0, \quad (21)$$

$$\text{cond}N = \|N\| \cdot \|N^{-1}\| \rightarrow \min. \quad (22)$$

Задача разработки алгоритмов магнитной идентификации основания значительно упрощается с учетом того, что матрица магнитной идентификации N всегда оказывается блочной:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где N_1 – блок-матрица (4×4). Причем

$$N_1 = \begin{bmatrix} \langle T_{x1} \rangle & \langle T_{y1} \rangle & \langle T_{z1} \rangle & 1 \\ \langle T_{x2} \rangle & \langle T_{y2} \rangle & \langle T_{z2} \rangle & 1 \\ \langle T_{x3} \rangle & \langle T_{y3} \rangle & \langle T_{z3} \rangle & 1 \\ \langle T_{x4} \rangle & \langle T_{y4} \rangle & \langle T_{z4} \rangle & 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где $\langle T_{xi} \rangle$, $\langle T_{yi} \rangle$, $\langle T_{zi} \rangle$ ($i = \overline{1,4}$) – оценки вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$ на оси связанного трехгранника $m = XYZ$, вычисленные в каждом i -м эксперименте.

Элементы матрицы-блока N_1 вычисляются по формулам приведения

$$\begin{bmatrix} \langle T_{xi} \rangle & \langle T_{yi} \rangle & \langle T_{zi} \rangle \end{bmatrix}^T = A_i \cdot \begin{bmatrix} T_N & T_H & T_E \end{bmatrix}^T, \quad i = \overline{1,4}; n \geq 4, \quad (25)$$

где T_N , T_H , T_E , – северная, вертикальная и восточная проекции вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^q$ на оси географического трехгранника $q = NHE$.

С учетом соотношений (23)–(25) алгоритмы магнитной идентификации основания можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} (a+1) \quad b \quad c \quad P_-^T &= N_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} T_{x1} & T_{x2} & T_{x3} & T_{x4} \end{bmatrix}^T, \\ d \quad (e+1) \quad f \quad Q_-^T &= N_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} T_{y1} & T_{y2} & T_{y3} & T_{y4} \end{bmatrix}^T, \\ g \quad h \quad (k+1) \quad R_-^T &= N_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} T_{z1} & T_{z2} & T_{z3} & T_{z4} \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \quad (26)$$

После выполнения операций калибровок МИМ на объекте известны численные значения компонент матриц M , S и составляющих вектора $\mathbf{T}_{\text{МПО}}$.

После монтажа МИМ на объекте на показания модуля будут оказывать дестабилизирующее влияние не только МПО, но и погрешности установки модуля на объекте. Эти погрешности носят геометрический стационарный характер и могут быть учтены с помощью матрицы монтажа M , элементы которой формируются в соответствии со схемой Эйлера–Крылова [3]:

$$M = M_{\sigma} \cdot M_{\beta} \cdot M_{\alpha}. \quad (27)$$

где M_{σ} , M_{β} , M_{α} – матрицы геометрических погрешностей монтажа модуля на объекте; α , β , σ – погрешности установки модуля на объекте.

С учетом малости погрешностей монтажа модуля на объекте (α , β , σ) матрица M может быть линеаризована и приведена к диагональному кососимметричному виду [4]:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \beta & -\alpha \\ -\beta & 1 & \sigma \\ \alpha & -\sigma & 1 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Путем обращения уравнений (6) и (7) можно получить следующие оценки:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_m \rangle &= \langle \mathbf{T}_x \rangle \quad \langle T_y \rangle \quad \langle T_z \rangle \quad \bar{\mathbf{T}} = M \cdot (S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q + \mathbf{T}_{\text{МПО}} \quad \bar{\mathbf{T}} \\ \langle \mathbf{g}_m \rangle &= \langle \mathbf{g}_x \rangle \quad \langle g_y \rangle \quad \langle g_z \rangle \quad \bar{\mathbf{T}} = M \cdot A \cdot \mathbf{g}_q, \end{aligned} \quad (29)$$

где $\langle \mathbf{T}_m \rangle$, $\langle \mathbf{g}_m \rangle$ – оценки векторов напряженности результирующего магнитного поля и напряженности ПТЗ в связанном трехграннике $m = XYZ$; $\langle T_x \rangle$, $\langle T_y \rangle$, $\langle T_z \rangle$, $\langle g_x \rangle$, $\langle g_y \rangle$, $\langle g_z \rangle$ – оценки проекций векторов $\langle \mathbf{T}_m \rangle$, $\langle \mathbf{g}_m \rangle$ на оси связанного трехгранника $m = XYZ$.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{m0} &= T_{x0} \quad T_{y0} \quad T_{z0} \quad \bar{\mathbf{T}} = (S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q + \mathbf{T}_{\text{МПО}} \quad \bar{\mathbf{T}} \\ \mathbf{g}_{m0} &= g_{x0} \quad g_{y0} \quad g_{z0} \quad \bar{\mathbf{T}} = A \cdot \mathbf{g}_q. \end{aligned} \quad (30)$$

Тогда систему уравнений (29) можно привести к развернутому виду векторно-матричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} -T_{z0} & T_{y0} & 0 \\ 0 & -T_{x0} & T_{z0} \\ -T_{x0} & 0 & -T_{y0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle T_x \rangle - T_{x0} \\ \langle T_y \rangle - T_{y0} \\ \langle T_z \rangle - T_{z0} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} -g_{z0} & g_{y0} & 0 \\ 0 & -g_{x0} & g_{z0} \\ -g_{x0} & 0 & -g_{y0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle g_x \rangle - g_{x0} \\ \langle g_y \rangle - g_{y0} \\ \langle g_z \rangle - g_{z0} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

На основе использования системы уравнений (31) и (32) можно путем комбинирования разнородных по физическому виду скалярных уравнений сформировать $C_6^3 - 2 = 18$ вариантов решения задачи аналитической юстировки МИМ на объекте. Этот факт создает условия для обеспечения функциональной избыточности, что способствует повышению точности решения задачи технологической калибровки [4].

После выполнения этапов технологической и объектовой калибровок МИМ на основе решения *обратных задач бортовых измерений* становится возможным вычисление редуцированных значений компонент векторов \mathbf{T}_m , \mathbf{n}_m и $\mathbf{\omega}_m$, соответствующих таким показаниям блоков модуля, которые приведены к ортонормированному трехграннику $m = XYZ$, связанному с эквивалентным немагнитным основанием:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{T}}_m &= \hat{T}_x \quad \hat{T}_y \quad \hat{T}_z \quad \hat{\mathbf{T}}_m^T = \text{diag} \gamma_0 + \text{diag} \Delta \gamma (\Delta t) + \text{diag} \Delta \gamma (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{T}}_m^{-1} \times \\ &\times \hat{\mathbf{u}}_m - \Delta \mathbf{u}_{m0} - \Delta \mathbf{u}_m (\Delta t) - \Delta \mathbf{u}_m (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{T}}_m^{-1} \\ \hat{\mathbf{n}}_m &= \hat{n}_x \quad \hat{n}_y \quad \hat{n}_z \quad \hat{\mathbf{n}}_m^T = \text{diag} \mathbf{k}_0 + \text{diag} \Delta \mathbf{k} (\Delta t) + \text{diag} \Delta \mathbf{k} (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{n}}_m^{-1} \times \\ &\times \hat{\mathbf{u}}_a - \Delta \mathbf{u}_{a0} - \Delta \mathbf{u}_a (\Delta t) - \Delta \mathbf{u}_a (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{n}}_m^{-1} \\ \hat{\mathbf{\omega}}_m &= \hat{\omega}_x \quad \hat{\omega}_y \quad \hat{\omega}_z \quad \hat{\mathbf{\omega}}_m^T = \text{diag} \mathbf{n}_0 + \text{diag} \Delta \mathbf{n} (\Delta t) + \text{diag} \Delta \mathbf{n} (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{\omega}}_m^{-1} \times \\ &\times \hat{\mathbf{u}}_r - \Delta \mathbf{u}_{r0} - \Delta \mathbf{u}_r (\Delta t) - \Delta \mathbf{u}_r (\Delta U) \quad \hat{\mathbf{\omega}}_m^{-1} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}}_m &= \tilde{T}_x \quad \tilde{T}_y \quad \tilde{T}_z \quad \tilde{\mathbf{T}}_m^T = (S + E)^{-1} \cdot M^{-1} \cdot B_m^{-1} \cdot (\hat{\mathbf{T}}_m - \mathbf{T}_{\text{МПО}}) \quad \tilde{\mathbf{T}}_m^{-1} \\ \tilde{\mathbf{n}}_m &= \tilde{n}_x \quad \tilde{n}_y \quad \tilde{n}_z \quad \tilde{\mathbf{n}}_m^T = M^{-1} \cdot B_a^{-1} \cdot (\hat{\mathbf{n}}_m - \Delta \mathbf{g}_q), \\ \tilde{\mathbf{\omega}}_m &= \tilde{\omega}_x \quad \tilde{\omega}_y \quad \tilde{\omega}_z \quad \tilde{\mathbf{\omega}}_m^T = M^{-1} \cdot B_r^{-1} \cdot (\hat{\mathbf{\omega}}_m - \Delta \mathbf{\omega}_{\text{др}}), \end{aligned} \quad (34)$$

где $n_x, n_y, n_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора кажущегося ускорения \mathbf{n}_m и вектора абсолютной угловой скорости вращения $\mathbf{\omega}_m$ объекта на оси связанного трехгранника $m = XYZ$; $\tilde{\mathbf{T}}_m, \tilde{\mathbf{n}}_m, \tilde{\mathbf{\omega}}_m$ – приведенные (редуцированные) векторы $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \mathbf{\omega}_m$, вычисленные с учетом результатов проведения объектных (геометрических, магнитных) калибровок; $\tilde{T}_x, \tilde{T}_y, \tilde{T}_z, \tilde{n}_x, \tilde{n}_y, \tilde{n}_z, \tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z$ – проекции приведенных векторов $\tilde{\mathbf{T}}_m, \tilde{\mathbf{n}}_m, \tilde{\mathbf{\omega}}_m$ на оси связанного трехгранника $m = XYZ$; $\hat{\mathbf{T}}_m, \hat{\mathbf{n}}_m, \hat{\mathbf{\omega}}_m$ – оценки векторов $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \mathbf{\omega}_m$ с учетом результатов проведения технологических (метрологических, температурных и режимных) калибровок блоков модуля.

До проведения испытаний МИМ как магнитометрической навигационной системы (МНС) в лабораторных или полигонных условиях рабочее место (РМ) (лаборатория, полигон), на котором планируется проведение этих испытаний, должно быть аттестовано и паспортизировано.

Аттестация рабочего места и маршрута

В содержание аттестации входит:

–определение географических координат выбранных базовых и контрольных точек;

–измерение параметров магнитного поля реального в базовых и контрольных точках;

–построение геомагнитной и географической сеток.

Необходимое оборудование для проведения аттестации РМ – спутниковый навигатор и эталонный трехосный магнитометр, например магнитометр переносной феррозондовый трехосный геофизический (МПФ-3МГ). Первые два пункта аттестации выполняются с помощью спутникового навигатора (СН) и эталонного магнитометра (ЭМ) соответственно. В закрытых помещениях, где сигналы спутниковой навигационной системы (СНС) принимаются с искажениями, может быть использована технология *комбинированных измерений*, основанная на комбинации спутниковых навигационных данных и прямых геометрических построений на площади РМ с помощью *мерной рулетки* (МР).

Кроме СН, ЭМ и МР для испытаний могут потребоваться немагнитная стойка со шкалой базовых направлений и строительный уровень.

Магнитные измерения, проводимые в каждой базовой и контрольной точках с помощью ЭМ, должны обеспечивать формирование вектора напряженности МПР ($\mathbf{T}_{МПР}$) в двух системах координат – географической ($NHE = g$) и геомагнитной ($N_m HE_m = q$):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{МПР}^{NHE} &= T_N \quad T_H \quad T_E \quad \begin{matrix} T \\ - \end{matrix} = \mathbf{T}_{МПР}^g, \\ \mathbf{T}_{МПР}^{N_m HE_m} &= T_r \quad T_b \quad 0 \quad \begin{matrix} T \\ - \end{matrix} = \mathbf{T}_{МПР}^q. \end{aligned} \tag{35}$$

Построение географической (g) и геомагнитной (q) систем координат связано с воспроизведением ГМС и ГГС в каждой точке (рис. 2).

Если на площади РМ выделить точки базовую $A(\varphi_0, \lambda_0, r_0)$ и контрольную $B(\varphi, \lambda, r)$, то *линия визирования* (ЛВ) AB контрольной точки B из базовой точки A в ГГС будет ориентирована относительно географического меридиана AC с помощью угла *географического азимута* A , а в ГМС – относительно геомагнитного меридиана AD с помощью угла *геомагнитного азимута* A_m . На основании теорем сферической геометрии найдем истинный (A) и геомагнитный (A_m) азимуты:

$$\begin{aligned} \sin A &= \frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\sin l}, \\ \cos A &= \frac{\cos(\lambda - \lambda_0) - \cos(\varphi - \varphi_0) \cdot \cos l}{\sin(\varphi - \varphi_0) \cdot \sin l}, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \sin A_m &= \frac{\sin(\lambda_m - \lambda_{m0})}{\sin l}, \\ \cos A_m &= \frac{\cos(\lambda_m - \lambda_{m0}) - \cos(\varphi_m - \varphi_{m0}) \cdot \cos l}{\sin(\varphi_m - \varphi_{m0}) \cdot \sin l}, \end{aligned} \quad (37)$$

где l – длина линии визирования AB на поверхности Земли; $\lambda, \lambda_0, \varphi, \varphi_0$ – географические координаты (долгота и широта) граничных точек A и B линии визирования AB ; $\lambda_m, \lambda_{m0}, \varphi_m, \varphi_{m0}$ – геомагнитные координаты (долгота и широта) граничных точек A и B линии визирования AB .

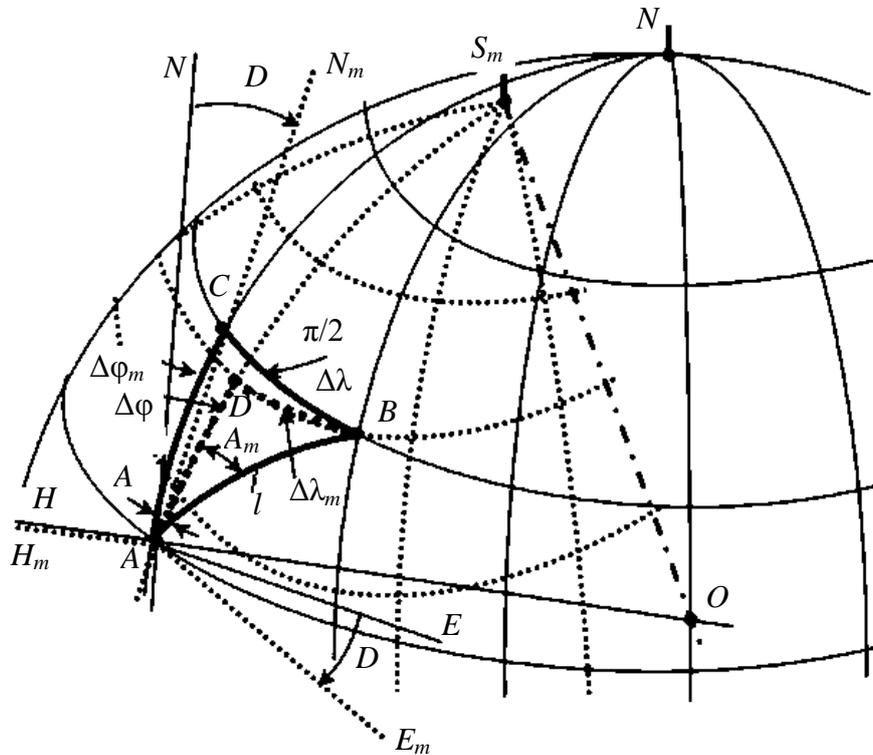


Рис. 2. Схема построения географической и геомагнитной сеток

Линия визирования ($AB = l$) воспроизводится на поверхности Земли *материально*. Относительно нее следует согласовывать показания магнитоинерциального модуля с целью отсчета в плоскости горизонта курсов географического ψ (истинного) и геомагнитного Φ . Угол магнитного склонения D в базовой точке A можно определить через углы курсов ψ и Φ (см. рис. 2):

$$D = \psi - \Phi. \quad (38)$$

На основе показаний ТБА (g_x, g_y, g_z) вычисляются углы наклона отсчетной базовой плоскости ХАЗ МИМ относительно плоскости горизонта NAE:

– для канала тангажа

$$\begin{aligned} \sin \vartheta &= a_{12} = -\frac{g_x}{g}, \\ \cos \vartheta &= \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} = \left(\frac{g_x^2 + g_z^2}{g^2} \right)^{1/2}; \end{aligned} \quad (39)$$

– для канала крена

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= -\frac{a_{32}}{\cos \vartheta} = -\frac{g_z}{g \cos \vartheta}, \\ \cos \gamma &= \frac{a_{22}}{\cos \vartheta} = \frac{g_y}{g \cos \vartheta}, \end{aligned} \quad (40)$$

где a_{i2} ($i = \overline{1,3}$) – направляющие косинусы матрицы ориентации А основания МИМ; g, g_x, g_y, g_z – модуль вектора \mathbf{g} ускорения свободного падения тела в базовой точке и его проекции на оси связанного трехгранника $m = XYZ$ (показания ТБА). Причем направляющие косинусы a_{i2} ($i = \overline{1,3}$) вычисляются по формуле

$$\begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \end{bmatrix} = -\frac{1}{g} \cdot \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}. \quad (41)$$

Формулы (39)–(41) могут быть приняты за алгоритмы *аналитического горизонтирования* (АГ) основания.

Для определения угла истинного курса ψ , характеризующего азимутальную ориентацию продольной оси X приборного трехгранника $m = XYZ$, можно использовать алгоритмы *аналитического компасирования* (АК):

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \left(\frac{\sin^2 \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0}{\lambda_1 - \lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0} \right)^{1/2}, \\ \cos \psi &= \left(\frac{\sin^2 \varphi_1 - \varphi_0}{\lambda_1 - \lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (42)$$

Алгоритм АК (8) построен на основе решения обратной задачи геодезии, в которой истинный курс ψ определяется как угол азимутальной ориентации относительно плоскости географического меридиана линии визи-

рования какого-то удаленного ориентира, находящегося на продолжении продольной оси X , имеющего координаты (φ_1, λ_1) и наблюдаемого из базовой точки A . Алгоритмы аналитического *геомагнитного компасирования* могут быть построены на основе обработки показаний трехосного блока магнитометров (ТБМ):

$$\begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \end{bmatrix} = V^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{g}_i \\ \tilde{T}_i \\ \tilde{C}_i \end{bmatrix} \quad i = \overline{1,3}, \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_m &= \mathbf{T}_m \times \mathbf{g}_m \\ \mathbf{C}_g &= \mathbf{T}_g \times \mathbf{g}_g \end{aligned} \quad (44)$$

$$V = \begin{bmatrix} g_N & g_H & 0 \\ T_N & T_H & T_E \\ -g_H T_E & 0 & g_H T_N \end{bmatrix}, \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \frac{a_{13}}{\cos \vartheta}, \\ \cos \psi &= \frac{a_{11}}{\cos \vartheta}, \end{aligned} \quad (46)$$

где $\tilde{g}_i, \tilde{T}_i, \tilde{C}_i$ ($i = \overline{1,3}$) – приведенные значения проекций векторов $\mathbf{g}_m, \mathbf{T}_m, \mathbf{C}_m$ на оси связанного трехгранника $m = XYZ$; $\mathbf{C}_m, \mathbf{C}_g$ – дополнительные векторы, отнесенные к связанному $m = XYZ$ и географическому $g = NHE$ трехгранникам; V – квадратная матрица (3×3).

Совокупность алгоритмов (35)–(46) позволяет построить ГГС и ГМС в лабораторных или полигонных условиях. Следует иметь в виду, что наряду с задачей аттестации рабочих мест для проведения испытаний бесплатформенных магнитоинерциальных блоков и модулей может быть поставлена и решена задача *аттестации алгоритмов* [8, 9].

Паспортизация рабочего места и маршрута

В содержание *паспортизации* РМ входит:

- измерение параметров МПР в контрольных и базовых точках;
- вычисление параметров МПЗ в контрольных и базовых точках РМ по модели IGRF (WMM-2015, EMM-2015; HDCM-2015);
- вычисление параметров локальных мелкоструктурных магнитных аномалий (ЛМА) и локальных мелкоструктурных магнитных вариаций (ЛМВ), оценка их значимости.

Если в пределах измерительной базы l РМ (см. рис. 2) параметры ЛМА и ЛМВ удовлетворяют условиям

$$\begin{aligned} |\mathbf{T}_{\text{ЛМА}}| &= |\mathbf{T}_{\text{МПР}} - \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}| \leq \langle \Delta T \rangle, \\ |\mathbf{T}_{\text{ЛМВ}}| &= |\mathbf{T}_{\text{МПР}}(t) - \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}(t)| \leq \langle \Delta T(t) \rangle, \end{aligned} \quad (47)$$

то МПР в зоне РМ считается слабозмущенным, регулярным, гладким и в достаточной степени приближенным (с погрешностями, не превышающими допуски $\langle \Delta T \rangle$ и $\langle \Delta T(t) \rangle$) к *нормированному* МПЗ (по моделям IGRF). В такой зоне РМ можно проводить испытания МНС. Если же условия (47) регулярности и слабой возмущенности МПР в РМ не выполняются, то проведение испытаний МНС в таком нерегулярном, сильно возмущенном, изрезанном МПР могут приводить к существенным погрешностям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М.* Гетеромагнитометрия : Алгоритмы, методики, калибровки блоков магнитометров. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 152 с.
2. *Лекарев А. А., Спиридонов Д. М., Игнатъев А. А., Солопов А. А.* Магнитоинерциальный модуль для новых применений // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 20 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–12.
3. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Спиридонов Д. М.* Однофакторные калибровки блока магнитометров (алгоритмы, методика, технологии) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–131.
4. *Проскуряков Г. М., Игнатъев А. А., Спиридонова Т. А., Спиридонов Д. М.* Алгоритмы начальной выставки автономной ориентации управляемой платформы на подвижном объекте // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 91–101.
5. *Распопов В. Я., Малютина Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. Р.* Малогабаритная система ориентации // Датчики и системы. 2014. № 8. С. 2–5.
6. Пат. 2447404 Российская Федерация, МПК G01C 21/00. Способ калибровки датчиков угловой скорости бесплатформенного инерциального измерительного модуля / заявитель М. С. Корюкин ; патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро промышленной автоматики». – № 2010124735/28 ; заявл. 16.06.2010 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 36.
7. Пат. 2477864 Российская Федерация, МПК G01P 21/00. Способ калибровки инерциального измерительного модуля по каналу акселерометров / заявитель М. С. Корюкин ; патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро промышленной автоматики». – № 2011148861/28 ; заявл. 30.11.2011 ; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8.
8. МИ 2174-91 ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения. СПб. : НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 1992. 20 с. URL : <http://files.stroyinf.ru/data2/1/4293770/4293770386.pdf> (дата обращения : 15.10.2016).
9. *Дмитриев С. П., Челпанов И. Б.* Постановка задачи аттестации алгоритмов и программ обработки сигналов в навигационных комплексах // Гироскопия и навигация. № 2(33). 2001. С. 57–63.

**ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА
АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ
ДЛЯ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Г. Н. Румянцев, А. В. Ляшенко*, А. А. Игнатьев,
Г. М. Прокuryakov*, М. В. Поздняков***

Научно-производственный центр автоматики и приборостроения
имени академика Н. А. Пилюгина
Россия, 117342, Москва, Введенского, 1
E-mail: info@nrcsar.ru

*ОАО «Институт критических технологий»
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
E-mail: kbkt@renet.ru

**Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Статья посвящена исследованию вопросов, связанных с повышением точности и надежности систем ориентации и навигации за счет комбинирования средств измерений с использованием принципа функциональной избыточности информации. Рассмотрены алгоритмы комбинированной системы ориентации и навигации, включающей в свой состав магнитоинерциальный модуль.

Ключевые слова: ориентация, навигация, отказоустойчивость, комбинированная система, магнитометрия, функциональная избыточность информации.

**Fault-tolerant Autonomous Orientation and Navigation System for Aerospace
Spacecraft Objects**

**G. N. Rumyantsev, A. V. Lyashenko, A. A. Ignatiev,
G. M. Proskuryakov, M. V. Pozdnyakov**

The article is devoted to issues related to improving accuracy, reliability of systems of orientation and navigation by combining measuring instruments with the use of the principle of functional redundancy of information. Considered the algorithms of the combined system of orientation and navigation, and including in its membership a magneto-inertial module.

Key words: orientation, navigation, fault tolerance, combined system, magnetometry, functional redundancy of information

Настоящее и будущее развития человеческой цивилизации связаны с космосом и ракетно-космической техникой (РКТ). Объекты РКТ – сложные и дорогостоящие комплексы (баллистические ракеты (БР) дальнего действия, ракеты-носители (РН) с пусковыми установками и сами космические аппараты (КА)), к системам ориентации и навигации (СОН) которых предъявляются высокие требования точности, надежности, помехоустойчивости и отказоустойчивости.

От результатов пуска ракеты зависит безопасность экономическая и экологическая, индивидуальная, корпоративная и военная, национальная, планетарная и глобальная. С учетом возможных последствий от нарушений в работе РКТ к системам ориентации и навигации (СОН) объектов РКТ предъявляются дополнительные специфические требования обеспечения встроенного контроля, самодиагностики и **отказоустойчивости**.

В настоящее время на объектах РКТ в основном применяются платформенные (ПСОН), бесплатформенные (БСОН), инерциальные, астрономические (АСОН) и гибридные (ГСОН) системы ориентации и навигации, в которых достижение высоких показателей точности и надежности работы объектов обеспечивается ценой усложнения, удорожания, а также снижения уровня технологичности и контролепригодности навигационных систем.

Одним из путей избавления от отмеченных недостатков является увеличение количества средств измерений (СИ) и их резервирование, при этом обеспечиваются условия **структурно-информационной избыточности**. Такой подход обычно решает проблему повышения точности и надежности, но, как правило, приводит к увеличению стоимости, массы и габаритов навигационных систем. Для примера в табл. 1 приведены основные характеристики некоторых бесплатформенных измерительных блоков (БИБ) [1], разработанных в Научно-производственном центре автоматики и приборостроения им. академика Н. А. Пилюгина (НПЦ АП).

Таблица 1

Основные характеристики бесплатформенных измерительных навигационных блоков

Параметр	Измерительные бесплатформенные блоки		
	БИБ-5	БИБ-4	ВД30
Количество измерителей	3 ДУС, 3 акс.*	4 ДУС, 4 акс.	6 ДУС, 6 акс.
Масса, кг	4,4	13	33
Габаритные размеры, мм	212×230	326×250	530×350
Энергопотребление, Вт	12	50	50
Время готовности, мин	30	120	120
Ресурс, ч	100000	100000	100000
Температурный диапазон, °С	-10...+40	-10...+40	-10...+40
Ориентировочная стоимость, тыс. руб	3000,0	7500,0	30000,0
Диапазон измерения угловой скорости, град/с	±180	±30	±30
Нестабильность масштабного коэффициента ДУС в запуске, %	≤ 0,1	≤ 0,005	≤ 0,01
Нестабильность нулевого сигнала ДУС в запуске, град/ч	≤ 0,1	≤ 0,01	≤ 0,01
Спектральная плотность мощности шума, град·ч ^{-1/2}	≤ 0,03	≤ 0,003	≤ 0,003
Диапазон измерения линейного ускорения, g	±15	±15	±15
Нестабильность масштабного коэффициента акселерометра в запуске, %	≤ 1,7·10 ⁻⁴	≤ 2·10 ⁻⁴	≤ 2·10 ⁻⁴
Нестабильность нулевого сигнала акселерометра в запуске, g	≤ 2,5·10 ⁻⁴	≤ 3·10 ⁻⁵	≤ 3·10 ⁻⁵

*ДУС – датчик угловой скорости; акс. – акселерометр.

Из табл. 1 видно, что блок БИБ-4 и модуль ВД30 построены по схеме комплексирования с использованием структурно избыточного числа ($n > 3$) векторных датчиков (акселерометров и гироскопов), что обеспечивает им ограниченную отказоустойчивость.

Отказоустойчивость модуля типа ВД30 существенно зависит от схемы ориентации осей чувствительностей. Возможны различные варианты построения неортогональных схем ориентации осей чувствительностей датчиков модуля. В соответствии с правилами комбинаторики число N блоков-триад, которые можно построить на основе n неортогональных датчиков, определяется числом сочетаний C_n^3 .

В условиях, когда допустимо применение источников внешней коррекции, решение проблемы возможно за счет **комбинирования СИ** с использованием принципа **функциональной избыточности информации**.

В НПЦ АП разработан ряд платформенных измерительных навигационных блоков с использованием принципа функциональной избыточности. В частности, разработаны и внедрены в производство блоки, использующие:

- твердотельные акселерометры (ТТА), волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) и аппаратуру спутниковой навигации (АСН);
 - ТТА, ВОГ, АСН и приборы астрокоррекции;
 - ТТА, лазерные ДУС и АСН
- и ряд других [2].

Приведем обоснование принципиальной возможности, практической целесообразности и эффективности реализации принципа **функциональной избыточности информации** применительно к автономным СОН объектов РКТ на основе включения в систему сравнительно простого **магнитоинерциального модуля (МИМ)** с целью повышения показателей точности и надежности всей системы, а также придания ей новых свойств адаптации к отказам, **отказоустойчивости** и встроенного контроля работоспособности всей системы.

Комбинирование системы автономной ориентации и навигации объектов РКТ с МИМ

Решение поставленной задачи по разработке отказоустойчивой комбинированной системы ориентации и навигации (КСОН) может быть достигнуто путем включения МИМ в состав существующей СОН (ПСОН, БСОН, АСОН или ГСОН), использования принципа **комбинирования СИ** (СОН+МИМ) и реализации с помощью микроконтроллера (МК) программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) обработки многомерной информации.

МИМ представляет собой малогабаритную (или миниатюрную) измерительно-вычислительную систему, построенную на основе включения в состав СОН дополнительного блока – **трехосного блока магнитомет-**

ров (ТБМ). За счет этого приобретается свойство трехвекторного измерителя, способного измерять компоненты трех векторов (напряженности магнитного поля \mathbf{T}_m , кажущегося ускорения \mathbf{n}_m и абсолютной угловой скорости вращения $\boldsymbol{\omega}_m$) в проекциях на оси связанного трехгранника ($m = XYZ$):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_m &= T_x \quad T_y \quad T_z \begin{matrix} \bar{T} \\ - \\ - \end{matrix}, \\ \mathbf{n}_m &= n_x \quad n_y \quad n_z \begin{matrix} \bar{T} \\ - \\ - \end{matrix}, \\ \boldsymbol{\omega}_m &= \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z \begin{matrix} \bar{T} \\ - \\ - \end{matrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $T_x, T_y, T_z, n_x, n_y, n_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты векторов $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \boldsymbol{\omega}_m$.

Конструктивно МИМ выполнен в виде малогабаритного моноблока с фланцевым креплением к корпусу приборного отсека объекта РКТ.

Схема взаимодействия МИМ со штатной СОН сводится к получению многомерной информации и переработке ее в микроконтроллере (МК) в соответствии с заданным ПАО, обеспечивающим выполнение следующих функций:

- **самодиагностика** с помощью МИМ и алгоритмов встроенного контроля;
- **коррекция** (приведение к эквивалентному основанию показаний штатной СОН);
- **повышение достоверности** решения задач автономной ориентации и навигации;
- обеспечение **резервно-аварийных режимов** работы штатной СОН путем идентификации отказов, адаптации системы к отказам и обеспечения за счет этого ее **отказоустойчивости**.

Сменное ПАО обеспечивает многофункциональность и многорежимность работы комбинированной СОН.

По аналогии с прямой и обратной задачами баллистики в настоящей работе поставлены и корректно решены **две задачи бортовых измерений** (прямая и обратная [3, 4]). Для решения прямой и обратной задач бортовых измерений введены соответствующие отсчетные системы координат – базисы и трехгранники (табл. 2).

Таблица 2

Системы координат

Система координат	Обозначение		Трехгранник	Ориентация в пространстве
	оси	базиса		
Инерциальная	$X_i Y_i Z_i$	i	Декарта	Оси Y_i, Z_i лежат в плоскости эклиптики, ось Y_i направлена в точку весеннего равноденствия

Система координат	Обозначение		Трехгранник	Ориентация в пространстве
	оси	базиса		
Геоцентрическая	$X_G Y_G Z_G$	g	Декарта	Оси Y_G, Z_G лежат в плоскости экватора, ось X_G направлена по оси собственного вращения Земли, ось Y_G находится в плоскости меридиана Гринвича
Географическая	NHE	q		Ось N касательна к меридиану и направлена на север, ось H – вертикаль места, ось E направлена на восток
Стартовая (ортодромическая)	$X_0 Y_0 Z_0$	s		Ось X_0 – касательная к ортодромии – трассе траектории объекта, ось Y_0 – вертикаль места в точке старта S
Пусковая	$X_P Y_P Z_P$	p		Оси X_P, Y_P лежат в плоскости стрельбы (орбиты), ось X_P направлена на цель горизонтально, ось Y_P – вертикаль места в точке пуска P
Траекторная (естественная)	τnb	t		Ось τ касательна к траектории, ось n – нормаль к траектории
Связанная	XYZ	m	Резаля	Оси: X – продольная, Y – нормальная, Z – поперечная

Показания трехвекторного модуля могут быть описаны с помощью уравнений и метрологических характеристик [5]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}_m &= B_m \cdot M \cdot (S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^q + \mathbf{T}_{МПП}^q + \mathbf{T}_{МПО}^q \\
 \mathbf{n}_m &= B_a \cdot M \cdot \mathbf{g}_q + \mathbf{a}_q + \Delta \mathbf{g}_q \\
 \boldsymbol{\omega}_m &= B_r \cdot M \cdot \boldsymbol{\Omega}_{0q} + \boldsymbol{\psi} + \dot{\boldsymbol{\psi}} + \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \Delta \boldsymbol{\omega}_{др}^q \\
 \mathbf{u}_m &= \text{diag} \begin{pmatrix} \gamma_x & \gamma_y & \gamma_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{T}_m + \Delta \mathbf{u}_m, \\
 \mathbf{u}_a &= \text{diag} \begin{pmatrix} k_x & k_y & k_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{n}_m + \Delta \mathbf{u}_a, \\
 \mathbf{u}_r &= \text{diag} \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega}_m + \Delta \mathbf{u}_r,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_m &= \text{diag} \begin{pmatrix} \gamma_x & \gamma_y & \gamma_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{T}_m + \Delta \mathbf{u}_m, \\
 \mathbf{u}_a &= \text{diag} \begin{pmatrix} k_x & k_y & k_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{n}_m + \Delta \mathbf{u}_a, \\
 \mathbf{u}_r &= \text{diag} \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega}_m + \Delta \mathbf{u}_r,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $\mathbf{T}_{МПЗ}^q$, $\mathbf{T}_{МПП}^q$, \mathbf{g}_q , $\boldsymbol{\Omega}_{0q}$ – векторы напряженности магнитного поля Земли (МПЗ), магнитного поля помех (МПП), поля тяжести Земли (ПТЗ) и угловой скорости вращения Земли, заданные в географическом трехграннике $q = NHE$; $\mathbf{T}_{МПО}^q$, \mathbf{a}_m , $\Delta \boldsymbol{\omega}_{др}^m$ – векторы напряженности магнитного поля объекта (МПО), абсолютного линейного ускорения основания и угловой скорости дрейфа гироскопов, заданные в связанном трехграннике $m = XYZ$; $(\boldsymbol{\psi}, \dot{\boldsymbol{\psi}}, \dot{\boldsymbol{\gamma}})_q$ – векторы угловых скоростей вращения ПО по рысканию, тангажу и крену относительно Земли, заданные в неподвижном трехграннике

$q = NHE$; B_m, B_a, B_Γ – матрицы (3×3) сборки ТБМ, трехосных блоков акселерометров (ТБА) и гироскопов (ТБГ); M – матрица монтажа МИМ на объекте; A – матрица ориентации ПО; S – матрица коэффициентов Пуассона; E – единичная матрица (3×3); $\text{diag}(\dots)$ – обозначение диагональных матриц (3×3) масштабных коэффициентов блоков; $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$; $k_x, k_y, k_z, n_x, n_y, n_z$ – масштабные коэффициенты соответствующих датчиков (магнитометров, акселерометров и гироскопов); $\Delta \mathbf{u}_m, \Delta \mathbf{u}_a, \Delta \mathbf{u}_\Gamma$ – векторы смещений нулевых сигналов блоков (ТБМ, ТБА, ТБГ).

С целью решения задач автономной ориентации и навигации БР и КА для обеспечения возможности корректного использования девятимерных показаний модуля в виде вектора \mathbf{u}

$$\mathbf{u} = \begin{matrix} u_{xm} & u_{ym} & u_{zm} & u_{xa} & u_{ya} & u_{za} & u_{x\Gamma} & u_{y\Gamma} & u_{z\Gamma} \end{matrix} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \\ \bar{4} \\ \bar{5} \\ \bar{6} \\ \bar{7} \\ \bar{8} \\ \bar{9} \end{matrix} \quad (4)$$

предварительно паспортизируют все блоки МИМ, т. е. определяют коэффициенты векторов и матриц: $\mathbf{T}_{\text{МПО}}, \Delta \mathbf{g}_q, \Delta \boldsymbol{\omega}_{\text{др}}^m$; S, B_m, B_a, B_Γ, M ; $\boldsymbol{\gamma}; \mathbf{k}; \mathbf{n}; \Delta \mathbf{u}_m; \Delta \mathbf{u}_a; \Delta \mathbf{u}_\Gamma$, входящих в систему уравнений (2) и (3).

Компоненты векторов напряженности магнитного поля (МПЗ) $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q$ и поля тяжести Земли (ПТЗ) \mathbf{g}_q в географическом трехграннике $q = NHE$ определяют в соответствии с моделями нормальных геофизических полей (IGRF, WMM-2015; WGS-84 и др.) [6], а вектор угловой скорости вращения Земли $\boldsymbol{\Omega}_0$ в географическом базисе q для каждой широты φ вычисляют по формуле

$$\boldsymbol{\Omega}_0 = \Omega_0 \begin{matrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \end{matrix} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \end{matrix}, \quad (5)$$

где $\Omega_0 = 7,2921158553 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли в инерциальной системе отсчета; φ – широта места положения наблюдателя.

С учетом вышеприведенной параметрической паспортизации блоков МИМ путем обращения уравнений (2) и (3) получают выражения для показаний блоков, приведенных к немагнитному ортонормированному основанию:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_m &= \text{diag} \begin{matrix} \mathbf{k}_x & \gamma_y & \gamma_z \end{matrix} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \mathbf{u}_m \\ \bar{4} \\ \bar{5} \\ \bar{6} \end{matrix} - \Delta \mathbf{u}_m \begin{matrix} \bar{7} \\ \bar{8} \\ \bar{9} \end{matrix} \\ \mathbf{n}_m &= \text{diag} \begin{matrix} \mathbf{k}_x & k_y & k_z \end{matrix} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \mathbf{u}_a \\ \bar{4} \\ \bar{5} \\ \bar{6} \end{matrix} - \Delta \mathbf{u}_a \begin{matrix} \bar{7} \\ \bar{8} \\ \bar{9} \end{matrix} \\ \boldsymbol{\omega}_m &= \text{diag} \begin{matrix} \mathbf{k}_x & n_y & n_z \end{matrix} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \mathbf{u}_\Gamma \\ \bar{4} \\ \bar{5} \\ \bar{6} \end{matrix} - \Delta \mathbf{u}_\Gamma \begin{matrix} \bar{7} \\ \bar{8} \\ \bar{9} \end{matrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}}_m &= (S + E)^{-1} \cdot M^{-1} \cdot B_m^{-1} \cdot \mathbf{T}_m - \mathbf{T}_{\text{МПО}} \begin{matrix} \bar{1} \\ \bar{2} \\ \bar{3} \end{matrix} \\ \tilde{\mathbf{n}}_m &= M^{-1} \cdot B_a^{-1} \cdot \mathbf{n}_m - \Delta \mathbf{g}_q \begin{matrix} \bar{4} \\ \bar{5} \\ \bar{6} \end{matrix} \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}}_m &= M^{-1} \cdot B_\Gamma^{-1} \cdot \boldsymbol{\omega}_m - \Delta \boldsymbol{\omega}_{\text{др}}^q \begin{matrix} \bar{7} \\ \bar{8} \\ \bar{9} \end{matrix} \end{aligned} \quad (7)$$

На основе использования приведенных показаний блоков МИМ $(\tilde{\mathbf{T}}_m, \tilde{\mathbf{n}}_m, \tilde{\boldsymbol{\omega}}_m)$ могут быть решены обратные задачи бортовых измерений.

*Двухвекторные и трехвекторные алгоритмы
автономной начальной выставки систем ориентации и навигации*

В настоящее время на объектах РКТ для решения задачи начальной выставки основания (НВО) и автономного прицеливания (АП) БР на старте используется **двухвекторный алгоритм аналитического горизонт-компасирования (АГК)**, который разработан в соответствии с принципом комплексирования. Однако алгоритм АГК не обладает свойством отказоустойчивости.

Для повышения точности и надежности решения задачи начальной выставки основания (НВО) и азимутального прицеливания (АП) БР или РН на старте, а также придания системе свойства **отказоустойчивости** вместо алгоритма АГК предлагается более совершенный **трехвекторный алгоритм аналитического пространственного ориентирования (АПО)**, построенный в соответствии с принципом комбинирования и основанный на обработке расширенной функционально избыточной информации о трех векторах: \mathbf{g} , $\mathbf{\Omega}$, \mathbf{T} [3, 4, 7, 8].

Приведенные показания блоков МИМ связаны с соответствующими векторами, задаваемыми в географическом базисе $q = NHE$, с помощью простых векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{T}}_m &= A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^q, \\ \tilde{\mathbf{n}}_m &= A \cdot \mathbf{g}_q, \\ \tilde{\mathbf{\omega}}_m &= A \cdot \mathbf{\Omega}_q,\end{aligned}\tag{8}$$

где $A = a_{ij} \begin{smallmatrix} \bar{3} \\ \bar{3} \end{smallmatrix}$ – матрица ориентации, подлежащая определению.

Система векторно-матричных уравнений (8) может быть приведена к выражениям для направляющих косинусов $a_{ij}(i, j = \overline{1,3})$:

$$\begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \end{bmatrix} = N^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{n}_i \\ \tilde{\omega}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_N & T_H & T_E \\ g_N & g_H & 0 \\ \Omega_N & \Omega_H & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{n}_i \\ \tilde{\omega}_i \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1,3}).\tag{9}$$

Детерминант матрицы N равен

$$\det N = \begin{vmatrix} T_N & T_H & T_E \\ g_N & g_H & 0 \\ \Omega_N & \Omega_H & 0 \end{vmatrix} = \Omega \cdot g_N \sin \varphi_0 - g_H \cos \varphi_0 \cdot T_E \neq 0.\tag{10}$$

По вычисленным направляющим косинусам $a_{ij}(i, j = \overline{1,3})$ в условиях функциональной избыточности информации однозначно определяют начальные значения эйлеровых углов, например, углов курса (ψ_0), тангажа (ϑ_0) и вращения (γ_0).

Начальная ошибка АП БР на старте определяется разностью

$$\Delta A = \psi_0 - A_0, \quad (11)$$

где A_0 – расчетное (программное) значение заданного азимута прицеливания БР. Значение A_0 можно вычислить по формулам сферической тригонометрии:

$$\begin{aligned} \cos A_0 &= \frac{\sin \varphi_C - \sin \Phi_C \cdot \cos \varphi_0}{\cos \Phi_C \cdot \sin \varphi_0}, \\ \sin A_0 &= \sin(\lambda_C - \lambda_0) \cdot \frac{\cos \varphi_C}{\sin \Phi_C}, \end{aligned} \quad (12)$$

где (φ_0, λ_0) и (φ_C, λ_C) – широта и долгота точки старта S и точки цели C ; Φ_C – угловая дальность цели от точки старта. Причем

$$\cos \Phi_C = \cos(\lambda_C - \lambda_0) \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \varphi_C + \sin \varphi_0 \cdot \sin \varphi_C. \quad (13)$$

Помимо трехвекторного алгоритма автономной НВО и АП БР (АПО- $g\Omega T$) могут быть использованы три двухвекторных алгоритма (АПО- $g\Omega$; АПО- gT ; АПО- ΩT), обеспечивающих, как и трехвекторный алгоритм, условия функциональной избыточной информации. Для разработки двухвекторных алгоритмов НВО и АП БР на старте могут быть сформированы программно-алгоритмическим путем дополнительные векторы, ортогональные к парам векторов ($\mathbf{g}-\Omega$; $\mathbf{g}-T$; $\Omega-T$).

Одновременная реализация трехвекторного алгоритма (АПО- $g\Omega T$) и двухвекторных алгоритмов (АПО- $g\Omega$, АПО- gT , АПО- ΩT) решения задачи НВО и АП БР на старте обеспечивает условия для повышения показателей точности и надежности работы системы, а также формирования свойства ее **отказоустойчивости** в данном режиме.

Двухвекторные и трехвекторные алгоритмы автономной ориентации баллистических ракет и космических аппаратов

После старта в точке S БР или РН с КА и пуска их головных частей (ГЧ) с начальными условиями $(r_0; v_0; \theta_0)$ последние начинают самостоятельный полет по баллистическим траекториям и орбитам. В этих условиях для решения задачи автономной ориентации объектов РКТ могут быть использованы уравнения Пуассона (3) и уравнения поступательного и вращательного движения тела:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \mathbf{a} - \mathbf{g}, \\ \boldsymbol{\omega} &= \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{u}, \end{aligned} \quad (14)$$

где \mathbf{n} , \mathbf{a} , \mathbf{g} – векторы ускорений кажущегося, абсолютного и свободного падения тела; $\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\Omega}$, \mathbf{u} – векторы абсолютной, переносной и относительной угловых скоростей вращения тела.

Для случаев баллистического и космического полетов выполняются условие невесомости ($\mathbf{n} = 0$) и требование использования в качестве вектора $\boldsymbol{\Omega}$ вектора угловой скорости искривления траектории.

Оскулирующие параметры орбиты КА могут быть найдены по координатам точки старта $S(\lambda_0; \varphi_0)$ и азимутальному углу АП БР на старте A_0 :

$$\begin{aligned} i &= \arccos \left(\sin A_0 \cdot \cos \varphi_0 \right)^{1/2}, \\ \Theta &= \lambda_0 - \arcsin \left(\frac{\sin A_0 \cdot \sin \varphi_0}{\sin i} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где Θ – географическая долгота восходящего узла орбиты; i – угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора.

Для любой текущей точки на баллистической траектории, радиус-вектор \mathbf{r} которой удален от начального радиуса-вектора \mathbf{r}_0 на угловую дальность Φ , могут быть вычислены сферические координаты (φ, λ, r) .

Для каждой точки на баллистической траектории может быть вычислен вектор $\mathbf{T}'_{\text{МПЗ}}$:

$$\mathbf{T}'_{\text{МПЗ}} = T_\tau \quad T_n \quad T_b \quad T_-^T = B_\Theta \cdot B_i \cdot B_\Theta \cdot \mathbf{T}^q_{\text{МПЗ}}(\varphi, \lambda, r), \quad (16)$$

где T_τ, T_n, T_b – компоненты вектора $\mathbf{T}'_{\text{МПЗ}}$; B_Θ, B_i, B_Θ – матрицы (3×3) соответствующих углов. Причем вектор $\mathbf{T}^q_{\text{МПЗ}}$ вычисляется по формулам нормального МПЗ [6].

На основе кинематических уравнений вращательного движения тела относительно траекторного базиса $t = \tau n b$ можно путем численного дифференцирования вычислить вектор \mathbf{u} в связанном (\mathbf{u}_m) и траекторном (\mathbf{u}_t) базисах:

$$\mathbf{u}_m = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \psi & 0 & 1 \\ \cos \psi \cdot \sin \rho & \cos \rho & 0 \\ \cos \psi \cdot \cos \rho & -\sin \rho & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_t = \begin{bmatrix} u_\tau \\ u_n \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \sigma & \cos \psi \cdot \cos \sigma \\ 0 & \cos \sigma & \cos \psi \cdot \sin \sigma \\ 1 & 0 & -\sin \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где σ, ψ, ρ – углы тангажа, рыскания и вращения КА; $\dot{\sigma}, \dot{\psi}, \dot{\rho}$ – производные по времени от соответствующих углов.

На основе уравнений (14) можно получить

$$\begin{aligned}
\mathbf{g}_t &= \begin{bmatrix} g_\tau & g_n & 0 \end{bmatrix}^T = \dot{\nu} \cdot \sin \theta \quad \nu \cdot \Omega \cdot \cos \theta \quad 0 \end{bmatrix}^T, \\
\tilde{\mathbf{g}}_m &= \begin{bmatrix} \tilde{g}_x & \tilde{g}_y & \tilde{g}_z \end{bmatrix}^T, \\
\Omega_m &= \omega_m - \mathbf{u}_m = \begin{bmatrix} \omega_x - u_x & \omega_y - u_y & \omega_z - u_z \end{bmatrix}^T, \\
\Omega_t &= \begin{bmatrix} \dot{\Phi} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = 0 \quad 0 \quad \dot{\Phi} \end{bmatrix}^T,
\end{aligned} \tag{19}$$

где $g_\tau, g_n, \tilde{g}_x, \tilde{g}_y, \tilde{g}_z$ – соответствующие проекции векторов \mathbf{g}_t и $\tilde{\mathbf{g}}_m$ на оси трехгранников $t = \tau nb$ и $m = XYZ$; $\nu, \dot{\nu}$ – скорость КА и ее производная по времени; θ – угол наклона траектории КА к линии местного горизонта; Ω_m, Ω_t – векторы угловой скорости искривления траектории КА, отнесенные к базисам m и t .

Угловая скорость искривления траектории может быть вычислена по формулам

$$\Omega = \dot{\Phi} = \frac{v_\tau}{r} = \frac{v \cdot \sin \theta}{r} = \frac{v_{\tau_0} \cdot r_0}{r^2}, \tag{20}$$

где $\dot{\Phi}$ – производная по времени от угловой дальности Φ ; v_τ, v_{τ_0} – текущее и начальное значения трансверсальной составляющей вектора скорости \mathbf{v} ; r, r_0 – текущее и начальное значение модуля радиуса-вектора \mathbf{r} .

На основе магнитоинерциальных измерений, производимых с помощью МИМ на баллистической траектории ГЧ БР или орбите КА, можно по аналогии с выражениями (8) написать систему векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{T}}_m &= D \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^t, \\
\tilde{\mathbf{g}}_m &= D \cdot \mathbf{g}_t, \\
\tilde{\Omega}_m &= D \cdot \Omega_t,
\end{aligned} \tag{21}$$

где D – матрица ориентации осей связанного базиса (m) относительно осей траекторного трехгранника (t). Причем

$$D = D_\rho \cdot D_\psi \cdot D_\sigma = d_{ij}^{\bar{3}}, \tag{22}$$

где D_ρ, D_ψ, D_σ – матрицы углов вращения (ρ), рыскания (ψ) и тангажа (σ), объекта относительно трехгранника $t = \tau nb$; $d_{ij}^{\bar{3}} (i, j = \overline{1,3})$ – направляющие косинусы углов ориентации.

С учетом матричного соотношения (22) на основании системы векторно-матричных уравнений (21) можно получить преобразованную относительно направляющих косинусов $d_{ij}^{\bar{3}} (i, j = \overline{1,3})$ систему уравнений

$$\begin{bmatrix} d_{i1} \\ d_{i2} \\ d_{i3} \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{g}_i \\ \tilde{\Omega}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\tau & T_n & T_b \\ g_\tau & g_n & 0 \\ 0 & 0 & \Omega \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{g}_i \\ \tilde{\Omega}_i \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1,3}), \quad (23)$$

где M – квадратная матрица (3×3); T_τ, T_n, T_b – проекции вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$ на оси трехгранника $t = \tau nb$.

Детерминант матрицы M равен

$$\det M = \begin{vmatrix} T_\tau & T_n & T_b \\ g_\tau & g_n & 0 \\ 0 & 0 & \Omega \end{vmatrix} = \Omega T_\tau g_n - g_\tau T_n \neq 0. \quad (24)$$

На основе матричного уравнения (22) можно получить формулы для вычисления значений эйлеровых углов σ, ψ, ρ (тангажа, рыскания и вращения):

$$\begin{aligned} \sin \sigma &= \frac{d_{12}}{\cos \psi}, \\ \cos \sigma &= \frac{d_{11}}{\cos \psi}, \\ \sin \psi &= -d_{13}, \\ \cos \psi &= \sqrt{d_{11}^2 + d_{12}^2} = \sqrt{d_{23}^2 + d_{33}^2}, \\ \sin \rho &= \frac{d_{23}}{\cos \psi}, \\ \cos \rho &= \frac{d_{33}}{\cos \psi}. \end{aligned} \quad (25)$$

Полученные формулы (14)–(25) могут быть использованы как в алгоритмах НВО и АП БР на старте, так и в алгоритмах автономной ориентации ГЧ БР на траекториях и КА на орбитах. На основании исходных векторно-матричных уравнений (21) могут быть сформированы алгоритмы автономной ориентации подвижных объектов в условиях функциональной избыточности информации.

Алгоритмы автономной дифференциальной геомагнитной навигации объектов РКТ

Одной из **обратных задач магнитометрии** является задача автономной дифференциальной геомагнитной навигации (ДГМН) ГЧ БР на баллистических траекториях и КА на орбитах. Зная начальные условия пуска

ГЧ БР и последней ступени РН (r_0, v_0, θ_0) , можно однозначно определить программную (расчетную) траекторию (орбиту) и ее след на поверхности Земли (трассу). Если в окрестности программной баллистической траектории для дискретно заданных базовых точек $A, B, C, D \dots$ вычислить по формулам МПЗ-Н координатно привязанные значения компонент вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^q$ и элементы тензора второго порядка

$$G_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_N}{\partial \varphi} & \frac{\partial T_N}{\partial \lambda} & \frac{\partial T_N}{\partial r} \\ \frac{\partial T_H}{\partial \varphi} & \frac{\partial T_H}{\partial \lambda} & \frac{\partial T_H}{\partial r} \\ \frac{\partial T_E}{\partial \varphi} & \frac{\partial T_E}{\partial \lambda} & \frac{\partial T_E}{\partial r} \end{bmatrix} = G_{ij}^{\bar{3}}, \quad (26)$$

где $(G_{ij}^{\bar{3}} \ (i, j = \overline{1,3})$ – градиенты МПЗ по координатам φ, λ, r), то совокупность всех базовых точек с численными значениями параметров МПЗ в этих точках образует дискретную **геомагнитную сетку** (ГМС), как сетку ориентиров (реперов). Данные о ГМС формируются в предстартовых условиях при разработке полетного задания [9].

В контрольной точке K , лежащей на реальной баллистической траектории и удаленной от ближайших базовых точек A, B, C, D на расстояния $\Delta \mathbf{r}_A, \Delta \mathbf{r}_B, \Delta \mathbf{r}_C, \Delta \mathbf{r}_D$ соответственно, с помощью ТБМ, входящего в состав МИМ, производятся измерения текущих значений вектора результирующего магнитного поля \mathbf{T}_m , заданного в связанном с объектом трехграннике $m = XYZ$.

С учетом паспортизированных при предварительно проведенных магнито-геометрических и метрологических калибровках МИМ параметров вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^П = P \ Q \ R^T$ и матриц S, B_m, M показания ТБМ приводят к немагнитному ортонормированному основанию и находят приведенный вектор:

$$\tilde{\mathbf{T}}_m = \tilde{T}_x \ \tilde{T}_y \ \tilde{T}_z^T. \quad (27)$$

Из геометрических соображений находят радиус-вектор \mathbf{r} текущей контрольной точки K [9]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}, \quad (28)$$

где \mathbf{r}_0 – радиус-вектор ближайшей базовой точки; $\Delta \mathbf{r}$ – радиус-вектор, характеризующий положение объекта в контрольной точке K относительно базовой точки.

В каждой контрольной точке K вычисляют разностный вектор:

$$\Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q = \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^0 - \tilde{\mathbf{T}}_m = \begin{bmatrix} T_N - \tilde{T}_x & T_H - \tilde{T}_y & T_E - \tilde{T}_z \end{bmatrix} = G_{ij} \cdot \Delta \mathbf{r} = G_q \cdot \Delta \mathbf{r}, \quad (29)$$

$$\Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = \begin{bmatrix} \Delta T_N & \Delta T_H & \Delta T_E \end{bmatrix},$$

где G_q – тензор второго порядка (тензор градиентов от компонент МПЗ); $\Delta T_N, \Delta T_H, \Delta T_E$ – компоненты разностного вектора.

Обращением векторно-матричного уравнения (29) получаем

$$\Delta \mathbf{r} = G_q^{-1} \cdot \Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q = F \cdot \Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q, \quad (30)$$

где $F = f_{ij}^{-1}$ – матрица функций чувствительностей.

Тогда алгоритм ДГМН можно записать в компактном виде:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + F \cdot \Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q, \quad (31)$$

или

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \lambda_0 \\ r_0 \end{bmatrix} + F \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_N \\ \Delta T_H \\ \Delta T_E \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где φ, λ, r – сферические координаты контрольной точки; $\varphi_0, \lambda_0, r_0$ – сферические координаты базовой точки.

Свойство **отказоустойчивости** КСОН при решении задачи автономной ДГМН обеспечивается за счет многократного использования алгоритма ДГМН для определения позиционирования одной и той же точки K относительно нескольких базовых точек A, B, C, D .

Следует отметить, что алгоритм ДГМН позволяет решить не только задачу автономной навигации БР или КА, но и задачу **автономного геомагнитного приведения** ГЧ БР к цели, если в программу полета на последних этапах баллистической траектории в качестве конечной базовой точки включить точку F цели с координатно привязанными значениями параметров МПЗ. Алгоритм приведения ГЧ

$$\Delta \mathbf{r} = F_{\text{цели}} \cdot \Delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^q \rightarrow 0 \quad (33)$$

соответствует условию косвенного наведения ГЧ БР на цель с помощью магнитометрического канала измерений.

Следует отметить, что работоспособность алгоритма автономной ДГМН объектов была проверена и подтверждена путем математического моделирования реального режима полета аппарата по замкнутому маршруту. Расхождений между программной (заданной в прямой задаче магнитометрии) и расчетной (полученной при решении обратной задачи магнитометрии) в математическом эксперименте не обнаружено.

Таким образом, показана принципиальная возможность и практическая целесообразность решения задач автономной начальной выставки СОН и БР, азимутального алгоритмического прицеливания ракеты на старте, автономной ориентации, навигации и наведения ГЧ БР на баллистических траекториях и КА на орбитах на основе принципа **комбинирования СИ и решения обратных задач бортовых измерений** с использованием, в частности, **магнитоинерциальной информации**.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бородовский В. Н., Межирицкий Е. Л., Никифоров В. М., Трунов Ю.В.* Системы управления текущими и конечными параметрами. Сравнительный анализ и их место в теории и практике систем управления летательными аппаратами // Тр. / ФГУП НППАП. Системы и приборы управления. 2007. Т. 1, № 1. С. 48–60.
2. *Дишель В. Д., Немкевич В. А.* Методология построения, облик и особенности летной отработки интегрированной инерциально-спутниковой системы навигации и ориентации космических средств выведения // Тр. / ФГУП НППАП. Системы и приборы управления. 2008. Т. 3, № 1. С. 2–26.
3. *Плотников П. К., Проскураков Г. М., Мусатов В. Ю.* Алгоритмический способ решения обратных задач бортовой магнитометрии // Приборы и приборные системы : тез. докл. Тула : ТГТУ, 1994. С. 95,96.
4. *Плотников П. К., Проскураков Г. М.,* Алгоритмическое обеспечение многомерных измерений с учетом технологических и эксплуатационных факторов // Состояние и проблемы технических измерений : тез. докл. М : Изд-во МГТУ, 1994. С. 97–98.
5. *Игнатьев А. А., Проскураков Г. М., Спиридонов Д. М.* Однофакторные калибровки блока магнитометров (алгоритмы, методика, технологии) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–131.
6. *Горбулин В. И., Радионов Н. В., Немиров А. В., Комаров П. А., Астахов Н. Н.* Математические модели неоднородного магнитного поля Земли в околоземном пространстве // Тр. / Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. 2014. № 644. С. 147–152.
7. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 280 с.
8. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под общ. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. М. : Физматлит, 2006. 424 с.
9. *Проскураков Г. М., Игнатьев А. А., Поздняков М. В., Ляшенко А. В.* Дифференциальная геомагнитная навигация подвижных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования Экономика в промышленности. С. 13–22.

ВОЗМОЖНОСТЬ МИНИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВЛИЯНИЯ НА ДРЕЙФ ЧАСТОТЫ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

В. С. Малышев, С. В. Овчинников*, А. А. Игнатьев*

ОАО «Институт критических технологий»
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
E-mail: kbkt@renet.ru

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

В статье рассмотрена возможность уменьшения температурного влияния на дрейф частоты генерации гетеромагнитного автогенератора за счет оптимальной ориентации поля анизотропии ЖИГ-сферы, используемой в цепи обратной связи, в поле постоянного магнита магнитной системы генератора. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие такую возможность.

Ключевые слова: гетеромагнитный автогенератор, ЖИГ-сфера, поле анизотропии, температурная зависимость частоты генерации.

Minimizing Temperature Influence on the Frequency Drift of Heteromagnetic Oscillator

V. S. Malyshev, S. V. Ovchinnikov, A. A. Ignatiev

The possibility of reducing the temperature influence on the generation frequency drift of heteromagnetic oscillator due to optimal orientation of anisotropy fields ferrite scope relative to the direction field of a permanent magnet of oscillator magnetic system. Experimental results is presented.

Key words: heteromagnetic oscillator, ferrite scope, field anisotropy, temperature dependence of oscillation frequency.

Гетеромагнитный автогенератор (далее – генератор) представляет собой полупроводниковый автогенератор, в цепь обратной связи которого включен ферритовый микрорезонатор, изготавливаемый обычно из железиттриевого граната (ЖИГ – $Y_3Fe_5O_{12}$) [1].

Принцип действия генератора основан на явлении ферромагнитного резонанса (ФМР), наблюдаемом в данном случае в ферритовых структурах под действием внешнего магнитного поля. В качестве резонатора могут быть использованы эпитаксиальные пленки феррита или ферритовые сферы (диаметр 0,4 мм и более), закрепленные на керамическом держателе.

Для задания требуемой рабочей частоты ЖИГ-резонатора используется специальная магнитная система, которая должна создавать постоянное и однородное магнитное поле такой индукции, чтобы обеспечить необходимую частоту ФМР.

В конечном счете магнитное поле в области ЖИГ-резонатора является суперпозицией всех магнитных полей: поля магнитной системы, внешнего магнитного поля и помех. Именно результирующее магнитное поле и определяет частоту генерации. По данной причине генератор может служить первичным преобразователем датчика слабых магнитных полей [2, 3].

Следует заметить, что частота ФМР и частота генерации не обязательно точно совпадают (это связано с выполнением фазовых условий генерации).

Рассмотрим генератор со сферическим ЖИГ-резонатором (ЖИГ-сфера типа КГ30). Индукцию результирующего магнитного поля, воздействующего на ЖИГ-резонатор, представим в виде

$$\mathbf{B}_{\text{рез}} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_i,$$

где \mathbf{B}_0 – индукция магнитного поля постоянного магнита; \mathbf{B}_i – индукция совокупного поля других внешних воздействий.

Величина результирующей индукции магнитного поля рассчитывается по формуле

$$B_{\text{рез}} = \sqrt{B_0^2 + B_i^2 + 2\mathbf{B}_0\mathbf{B}_i \cos\varphi}, \quad (1)$$

где φ – угол между векторами \mathbf{B}_0 и \mathbf{B}_i , обеспечивающий соответствующее значение частоты ферромагнитного резонанса. При совпадении направлений векторов \mathbf{B}_0 и \mathbf{B}_i наблюдается максимальная частота генерации:

$$f_{\text{max}} = \gamma \cdot (B_0 + B_i), \quad (2)$$

где $\gamma \approx 28$ Гц/нТл – гиромагнитное отношение для электрона.

При противоположных направлениях векторов \mathbf{B}_0 и \mathbf{B}_i наблюдается минимальная частота:

$$f_{\text{min}} = \gamma \cdot (B_0 - B_i). \quad (3)$$

Из (2) и (3) можно определить величину индукции внешнего магнитного поля:

$$B_i = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{2\gamma}. \quad (4)$$

Соотношения (2)–(4) справедливы, когда пренебрегают кристаллографической анизотропией ферритового элемента. Для учета влияния анизотропии ЖИГ-резонатора следует провести корректировку коэффициента γ , связывающего частоту ФМР и магнитную индукцию. По экспериментально определенной зависимости частоты генерации от индукции результирующего магнитного поля можно определить величину этого коэффициента.

Параметры полупроводниковой структуры, ЖИГ-резонатора и магнита магнитной системы генератора зависят от температуры. Следствием этого является зависимость от температуры частоты генерации. Во многих случаях, в частности если генератор является первичным преобразователем датчика магнитного поля, такую зависимость необходимо строго учитывать и соответствующим образом корректировать показания датчика.

Некоторые результаты исследований зависимости от температуры частоты генерации гетеромагнитных систем на основе полевого GaAs-транзистора, проведенных сотрудниками конструкторского бюро критических технологий ОАО «Институт критических технологий» (г. Саратов), показаны на рис. 1.

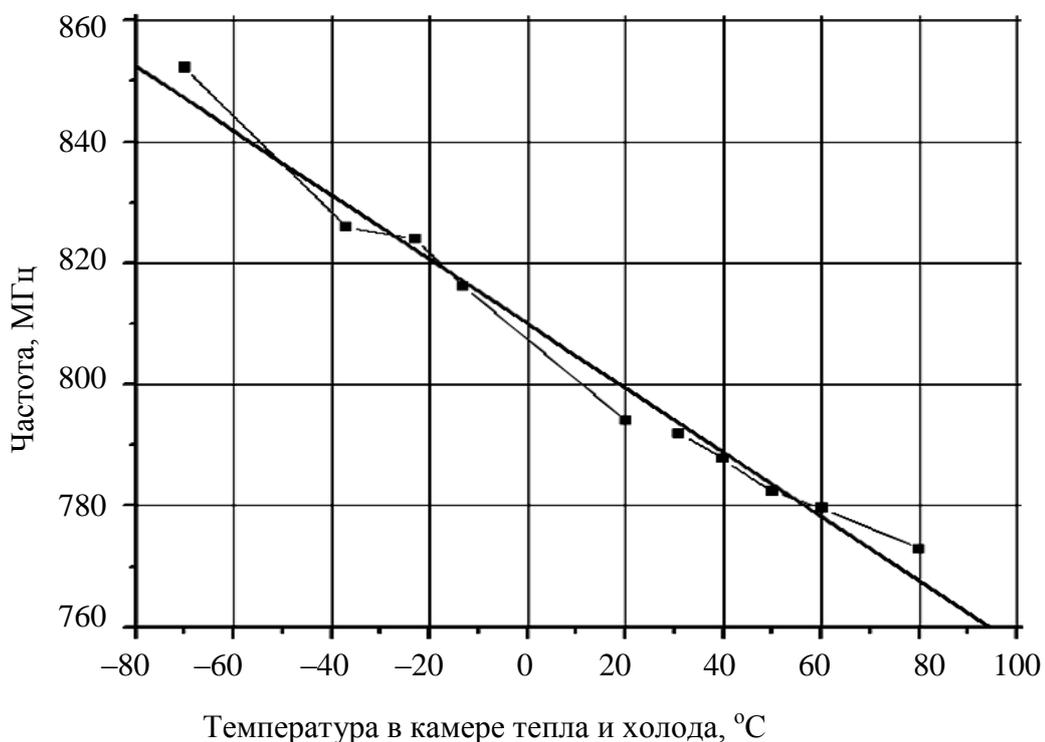


Рис. 1. Зависимость частоты генерации GaAs-генератора от температуры

Видно, что экспериментальные результаты, отмеченные точками, хорошо ложатся на аппроксимирующую прямую:

$$f(t) = 810,03 - 0,53t \text{ (МГц)},$$

где f – частота генерации, а температура t отсчитывается по стоградусной шкале. Погрешность аппроксимации не превышает $\pm 1,21$ МГц. Похожие температурные зависимости частоты генерации наблюдаются для всех гетеромагнитных систем независимо от типа используемых полупроводниковых структур и типа магнитной системы.

Для минимизации температурного дрейфа частоты генерации устройства можно использовать метод, приведенный в патенте [4]. Метод заклю-

чается в ориентировке ЖИГ-сферы относительно направления поля \mathbf{B}_0 магнитной системы таким образом, чтобы при дрейфе температуры изменение собственного поля анизотропии ЖИГ-резонатора компенсировало уход частоты генерации.

Действительно, индукция результирующего магнитного поля $\mathbf{B}_{рез}$ в области ЖИГ-сферы есть суперпозиция известного поля подмагничивания \mathbf{B}_0 , известного поля магнитной анизотропии \mathbf{B}_A самого ЖИГ-резонатора и внешнего магнитного поля $\mathbf{B}_{ВН}$, включая и геомагнитное поле:

$$\mathbf{B}_{рез} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_A + \mathbf{B}_{ВН}. \quad (5)$$

Таким образом, рассматриваемый автогенератор имеет центральную частоту генерации, определяемую выражением

$$f = \gamma / |\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_A + \mathbf{B}_{ВН}| + \Delta f_{\text{Э}}, \quad (6)$$

где $\Delta f_{\text{Э}}$ – электронная отстройка центральной частоты генерации от частоты ферромагнитного резонанса, связанная с наличием реактивных элементов в конкретной схеме генератора.

В соответствии с (2) и (3) при настройке положения оси ЖИГ-сферы на максимальную частоту получим

$$f_{max} = \gamma (B_0 + B_A + B_{ВН Z}) + \Delta f_{\text{Э}}, \quad (7)$$

где $B_{ВН Z}$ – проекция внешнего поля на направление поля подмагничивания \mathbf{B}_0 .

Аналогично при настройке сферы на минимальную частоту имеем

$$f_{min} = \gamma (B_0 - B_A + B_{ВН Z}) + \Delta f_{\text{Э}}. \quad (8)$$

Если настройка генератора на максимальную и минимальную частоты производится при двух разных температурах T_1 и T_2 (для определенности $T_2 > T_1$) при условии, что $B_{ВН Z} = \text{const}$, из (7) и (8) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} f_{max}(T_2) &= \gamma [B_0(T_2) + B_A(T_2) + B_{ВН Z}] + \Delta f_{\text{Э}}(T_2), \\ f_{max}(T_1) &= \gamma [B_0(T_1) + B_A(T_1) + B_{ВН Z}] + \Delta f_{\text{Э}}(T_1), \\ f_{min}(T_2) &= \gamma [B_0(T_2) - B_A(T_2) + B_{ВН Z}] + \Delta f_{\text{Э}}(T_2), \\ f_{min}(T_1) &= \gamma [B_0(T_1) - B_A(T_1) + B_{ВН Z}] + \Delta f_{\text{Э}}(T_1), \end{aligned} \quad (9)$$

где $f_{max}(T_1)$, $f_{min}(T_1)$ – значения максимальной и минимальной частот генерации при температуре T_1 ; $f_{max}(T_2)$, $f_{min}(T_2)$ – значения максимальной и минимальной частот генерации при температуре T_2 ; $B_0(T_1)$ и $B_0(T_2)$, $B_A(T_1)$ и $B_A(T_2)$, $\Delta f_{\text{Э}}(T_1)$ и $\Delta f_{\text{Э}}(T_2)$ – значения индукций поля подмагничивания, поля анизотропии и электронной отстройки частоты генерации при температурах T_1 и T_2 соответственно.

Введем величины, определяющие изменение максимальной и минимальной частот генерации рассматриваемого устройства с изменением температуры:

$$\begin{aligned}\Delta f_{max} &= f_{max}(T_2) - f_{max}(T_1), \\ \Delta f_{min} &= f_{min}(T_2) - f_{min}(T_1).\end{aligned}$$

Тогда из (9) следует, что

$$\begin{aligned}B_A(T_2) &= [f_{max}(T_2) - f_{min}(T_2)]/(2\gamma), \\ B_A(T_1) &= [f_{max}(T_1) - f_{min}(T_1)]/(2\gamma), \\ B_0(T_2) &= \frac{f_{max}(T_2) + f_{min}(T_2)}{2\gamma} - \frac{\Delta f_{\Xi}(T_2)}{\gamma} - B_{ВНЗ}, \\ B_0(T_1) &= \frac{f_{max}(T_1) + f_{min}(T_1)}{2\gamma} - \frac{\Delta f_{\Xi}(T_1)}{\gamma} - B_{ВНЗ}.\end{aligned}$$

Определим температурные изменения значений индукций поля анизотропии ЖИГ-сферы и поля подмагничивания как

$$\begin{aligned}\Delta B_A &= B_A(T_2) - B_A(T_1), \\ \Delta B_0 &= B_0(T_2) - B_0(T_1).\end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}\frac{\Delta B_A}{\Delta T} &= [(\Delta f_{max}) - (\Delta f_{min})]/(2\gamma\Delta T), \\ \frac{\Delta B_0}{\Delta T} &= \frac{\Delta f_{max} + \Delta f_{min}}{2\gamma \cdot \Delta T} - \frac{\Delta f_{\Xi}(T_2) - \Delta f_{\Xi}(T_1)}{\gamma \cdot \Delta T},\end{aligned}\tag{10}$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$.

Типичная характеристика СВЧ-сигнала генератора при ориентации поля анизотропии ЖИГ-сферы на максимальную (кривая 1) и минимальную (кривая 2) частоты генерации для разных температур приведена на рис. 2.

Проанализируем выражения (10), опираясь на экспериментальные данные, приведенные на рис. 2. Из них следует, что для $\Delta T = 40$ К

$$\begin{aligned}\Delta f_{max} &= -44 \text{ МГц}, \\ \Delta f_{min} &= 17 \text{ МГц},\end{aligned}$$

поэтому

$$\begin{aligned}\frac{\Delta f_{max} + \Delta f_{min}}{2\gamma \cdot \Delta T} &\approx -12000 \text{ нТл/К}, \\ \Delta B_A/\Delta T &\approx -27200 \text{ нТл/К}.\end{aligned}\tag{11}$$

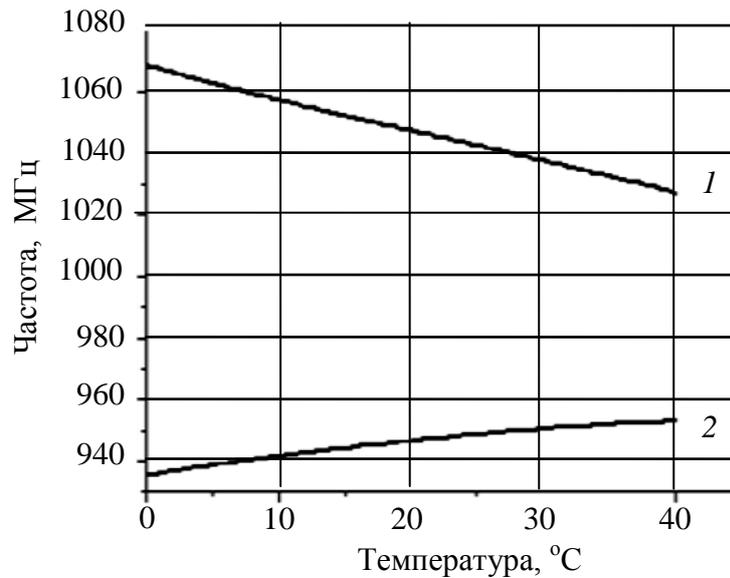


Рис. 2. Температурная зависимость основной частоты СВЧ-сигнала ГГ для двух типов ориентации поля анизотропии ЖИГ-сферы

Однако из (10) видно, что по результатам температурных измерений частоты, представленных на рис. 2, нельзя явно определить величины $\Delta B_0/\Delta T$ и $\Delta f_{\text{Э}}(T_2) - \Delta f_{\text{Э}}(T_1) / \Delta T$. Но если генератор изготовлен из комплекствующих, соответствующих категории *military*, то величина $\Delta f_{\text{Э}}$ слабо зависит от температуры, и тогда

$$\frac{\Delta B_0}{\Delta T} \approx \frac{\Delta f_{\text{max}} + \Delta f_{\text{min}}}{2\gamma \cdot \Delta T} = -12000 \text{ нТл/К.} \quad (12)$$

В то же время обратимые изменения магнитных свойств стабилизированного магнитотвердого материала при вариации температуры известны и оцениваются с помощью температурного коэффициента магнитной индукции α_B [5]:

$$\alpha_B = \frac{B_K - B_T}{B_K \cdot 293 - T}$$

где B_K – индукция при 293 K; B_T – индукция при температуре T .

Для постоянных магнитов (SmCo), используемых в рассматриваемой конструкции генератора, $\alpha_B = -0,03 \frac{\%}{\text{°C}}$ [5]. Значение индукции магнитного поля на торцевой поверхности таблеточного магнита системы подмагничивания ЖИГ-сферы составляет 0,67 Тл при комнатной температуре, что обеспечивает значение индукции поля подмагничивания в области ЖИГ-сферы $B_0 = 0,03 \dots 0,035$ Тл. Тогда

$$\frac{\Delta B_0}{\Delta T} = \alpha_B B_0 = -0,00105 \cdot 10^{-6} \text{ Тл/К.}$$

Этот результат неплохо согласуется с (12) и дает возможность оценить для конкретного исполнения генератора величину разности $\Delta f_{\Sigma}(T_2) - \Delta f_{\Sigma}(T_1)$:

$$\Delta f_{\Sigma}(T_2) - \Delta f_{\Sigma}(T_1) = \frac{\Delta f_{max} + \Delta f_{min}}{2} - \gamma \Delta B_0 \approx - 1,7...3,5 \text{ МГц.}$$

Как видно из представленных данных, величины $\Delta f_{max}/\Delta T$ и $\Delta f_{min}/\Delta T$ имеют разные знаки. Следовательно, есть возможность такой ориентации ЖИГ-сферы, когда зависимость резонансной частоты генератора от температуры в некотором диапазоне температур будет существенно уменьшена или компенсирована.

Экспериментальная проверка проводилась в конструкторском бюро критических технологий ОАО «Институт критических технологий» (г. Саратов). Была создана установка позиционирования ЖИГ-сферы в цепи обратной связи автогенератора. Установка имеет компьютерное управление и высокоточный шаговый двигатель поворота держателя сферы. Эксперименты проводились с использованием камеры тепла и холода «Techno 7006». В ходе эксперимента в память компьютера записывались температура в камере, частота генерации и угол поворота ЖИГ-сферы относительно метки оси легкого намагничивания. Данные обрабатывались специально разработанной компьютерной программой.

Экспериментально полученные зависимости основной частоты генерации автогенератора на базе кремниевых биполярных транзисторов от температуры в камере тепла и холода при выдержке не менее 30 мин приведены на рис. 3, где кривая 1 соответствует ориентации оси ЖИГ-сферы на максимальную частоту генерации, а кривая 2 – на минимальную частоту. Такой вид температурных кривых является типичным для всех полупроводниковых автогенераторов с гетеромагнитным взаимодействием.

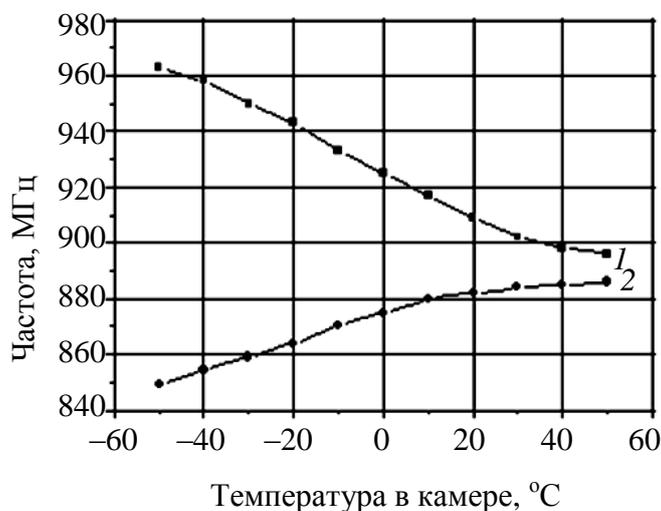


Рис. 3. Типичная температурная характеристика СВЧ-сигнала генератора при двух ориентациях поля анизотропии ЖИГ-сферы

Зависимость частоты генерации от угла поворота ЖИГ-сферы (КГ30) одного и того же генератора для трех температур в камере (-50°C , 0°C и $+50^{\circ}\text{C}$) показана на рис.4, где отмечены кружками три значения угла поворота сферы (12 , 92 и 116°), при которых частота генерации остается независимой от температуры в камере.

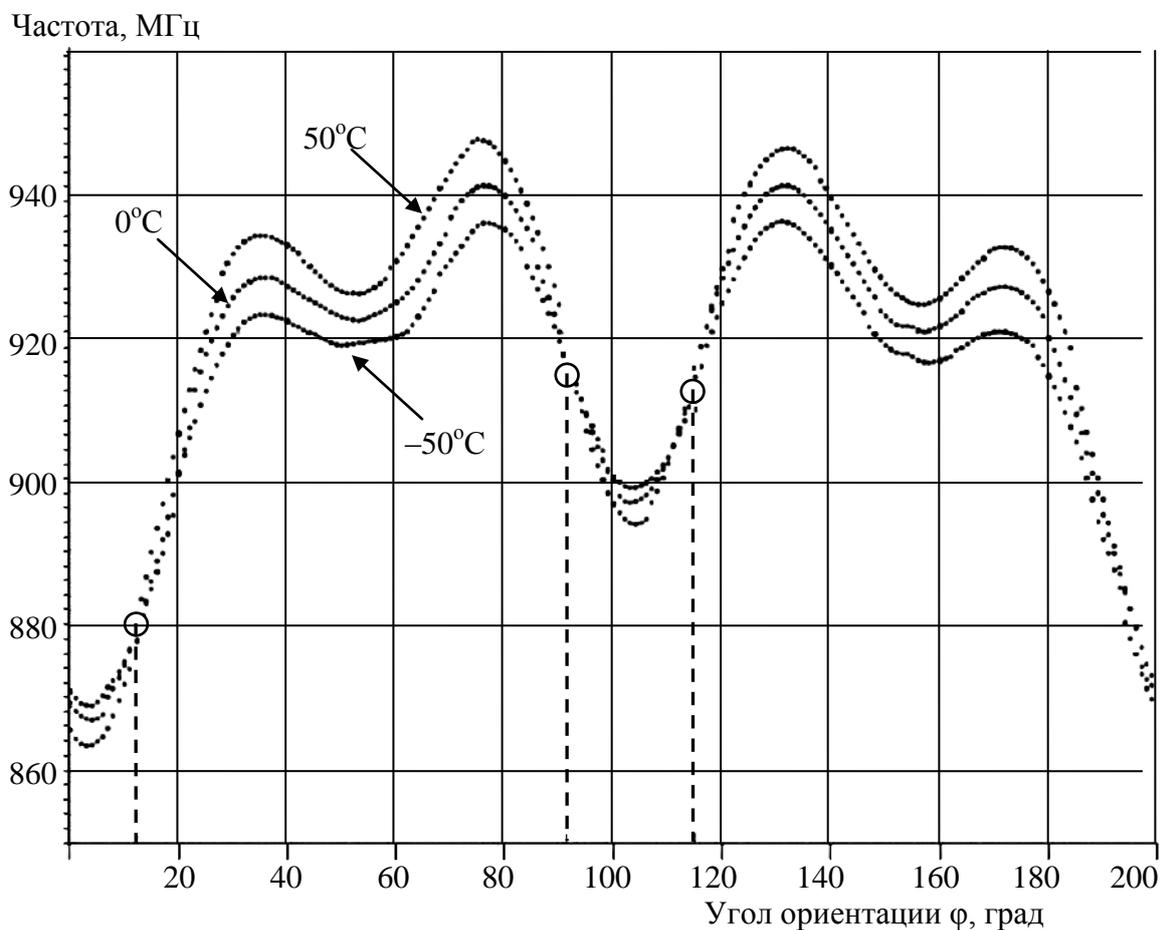


Рис. 4. Зависимость частоты генерации от угла φ ориентации ЖИГ-сферы для температур -50°C , 0°C и $+50^{\circ}\text{C}$

Следовательно, генератор с ЖИГ-сферой, установленной в цепь обратной связи под одним из найденных углов относительно оси поля подмагничивания, должен слабо откликаться на изменение окружающей температуры.

Таким образом, для минимизации температурного дрейфа частоты генерации возможно использование следующих методов:

- оптимальная ориентация ЖИГ-сферы в поле подмагничивания;
- размещение корпуса генератора внутри теплоизолирующей оболочки. Это позволит значительно растянуть во времени тепловые процессы, связанные как с собственным разогревом генератора, так и с изменением внешних условий. Поскольку собственный корпус генератора изготовлен из немагнитного металла с высокой теплопроводностью (медь, латунь), а собственное тепловыделение генератора не велико, то вся конструкция, включая постоянные магниты магнитной системы, будет разогрета практически равномерно [6];

– использование компьютерной компенсации теплового дрейфа частоты генерации, т. е. применение автоматической корректировки частоты генерации в зависимости от изменения температуры с помощью специальной компьютерной программы. Для этого необходимы датчики температуры в конструкции устройства и наличие высокоточной проверенной карты зависимости частоты генерации от температуры. Кроме того, наличие нескольких разнесенных по корпусу генератора датчиков температуры позволит контролировать температурные перепады по корпусу устройства и направление тепловых потоков, что, особенно с учетом растянутости во времени тепловых процессов (использование теплоизолирующей оболочки), существенно упростит алгоритм динамической компенсации теплового дрейфа частоты;

– использование модулей Пельтье для локальной термостабилизации термочувствительных элементов устройства [7].

Но последнее потребует значительных энергозатрат (по сравнению с необходимыми для генератора) и включения в конструкцию тепловых труб для переноса тепловых потоков на периферию электронной системы, содержащей гетеромагнитный автогенератор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатьев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника : микро-системы активного типа. М. : Наука, 2007. 612 с.

2. *Гурзо В. В., Игнатьев А. А., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Маринин А. В., Плешков В. А.* Векторный магнитометр малых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 50–52.

3. *Игнатьев А. А., Куликов М. Н., Норов Ю. В., Сотов Л. С., Тугушов Д. В.* Экспериментальное исследование векторного магнитоэлектронного магнитометра // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. II и III науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2 : Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 97–109.

4. Пат. 6313711 В1 США, МКП H03B5/18, H01P1/215. Alignment method and system for YIG oscillator / заявители Korber M. L. (США), K. J. Mueller K. J. (США) ; патентообладатель Steelex Broadband Wireless, Inc. – № US 09/652,868 ; заявл. 31.08.2000 ; опубл. 6.11.2001.

5. *Куневич А. В., Подольский А. В., Сидоров И. Н.* Ферриты : энцикл. справочник : в 5 т. СПб. : ЛИК, 2004. Т. 1 : Магниты и магнитные системы. 358 с.

6. *Игнатьев А. А., Васильев А. В., Овчинников С. В., Ретунский А. С., Спиридонов Д. М.* Анализ теплового режима гетеромагнитного электронного модуля // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 110–116.

7. *Овчинников С. В., Ретунский А. С.* Возможность использования термоэлектрических модулей для термостабилизации гетеромагнитного датчика магнитного поля в условиях повышенной температуры среды // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–11.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА 2Т937

А. Л. Хвалин, Л. Л. Страхова

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: Strakhovall@mail.ru

В статье изложена методика моделирования статических входных и выходных характеристик на примере кристалла биполярного транзистора 2Т937 на основе распространенной базовой модели Гуммеля–Пуна биполярного транзистора. Найдены оптимальные значения параметров эквивалентной схемы Гуммеля–Пуна, представлены результаты расчетов входных и выходных статических характеристик транзистора. Результаты моделирования статических характеристик могут использоваться в качестве первого приближения для последующего решения задачи оптимизации частотных характеристик (S -параметров) транзистора по модели Гуммеля–Пуна.

Ключевые слова: статические входные и выходные характеристики, модель Гуммеля–Пуна биполярного транзистора, система автоматизированного проектирования.

Computer Modeling of Static Characteristics of Bipolar Transistor 2Т937

A. L. Khvalin, L. L. Strakhova

The article sets out the methodology of modeling static input and output characteristics in the case of a crystal 2Т937 bipolar transistor based on a common base model Gummel–Pune bipolar transistor. The article presents optimal values of the parameters of the equivalent circuit Gummel–Pune, the results of calculation of input and output static characteristics of the transistor. The results of the static characteristics of the simulation can be used as a first approximation for further solving the problem of optimizing the frequency characteristic (S -parameter) transistor model Gummel–Pune.

Key words: static input and output characteristics, model Gummel–Pune bipolar transistor, computer-aided design.

В настоящее время при проектировании СВЧ-устройств [1–5] широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Известные САПР имеют встроенные библиотеки используемых в устройствах активных и пассивных СВЧ-компонент, что значительно облегчает процесс проектирования [6–12]. Однако производимые российской электронной промышленностью транзисторы, как правило, не имеют компьютерных моделей, совместимых со средствами САПР [13]. Это обстоятельство практически исключает возможность использования отечественной элементной базы при проектировании конкретных устройств.

Моделирование статических входных и выходных характеристик бескорпусного кристалла биполярного транзистора 2Т937 выполнено на основе модели Гуммеля–Пуна. Модель позволяет учесть такие эффекты при работе реальных транзисторов в режиме передачи большого сигнала,

как зависимость ширины базы, коэффициента усиления по току и сопротивления базы от тока коллектора, а также зависимость барьерных емкостей переходов от приложенных напряжений. Благодаря этим особенностям модель Гуммеля–Пуна обеспечивает хорошее приближение моделируемых характеристик транзисторов к реальным.

В статье приведены результаты компьютерного моделирования кристалла транзистора 2Т937 на основе его экспериментальных статических характеристик. Эквивалентная схема модели Гуммеля–Пуна, ее математическое описание не приводятся, поскольку модель известна и хорошо представлена в ряде работ [2, 5, 6, 13]. Базовая модель транзистора имеет 60 параметров, что существенно осложняет решение задачи оптимизации по определению эквивалентных параметров транзистора 2Т937.

Включение кристалла транзистора в измерительные схемы проводилось специалистами ЗАО «НПП «Алмаз» (г. Саратов). Поскольку при моделировании желательно максимально точно воспроизвести условия эксперимента, в компьютерной модели было учтено влияние тестовой платы в микрополосковом исполнении [14–15]. Плата выполнена на поликоровом основании толщиной 1 мм, толщина микрополосковых проводников 7,5 мкм.

Центральная часть тестовой платы с установленным кристаллом транзистора и монтажными разварочными проволоками показана на рис. 1: Б, К, Э – контактные площадки базы, коллектора, эмиттера соответственно; 1 – кристалл транзистора; 2 – разварочные проволоки эмиттера; 3 – разварочные проволоки базы; 4 – разварочные проволоки коллектора.

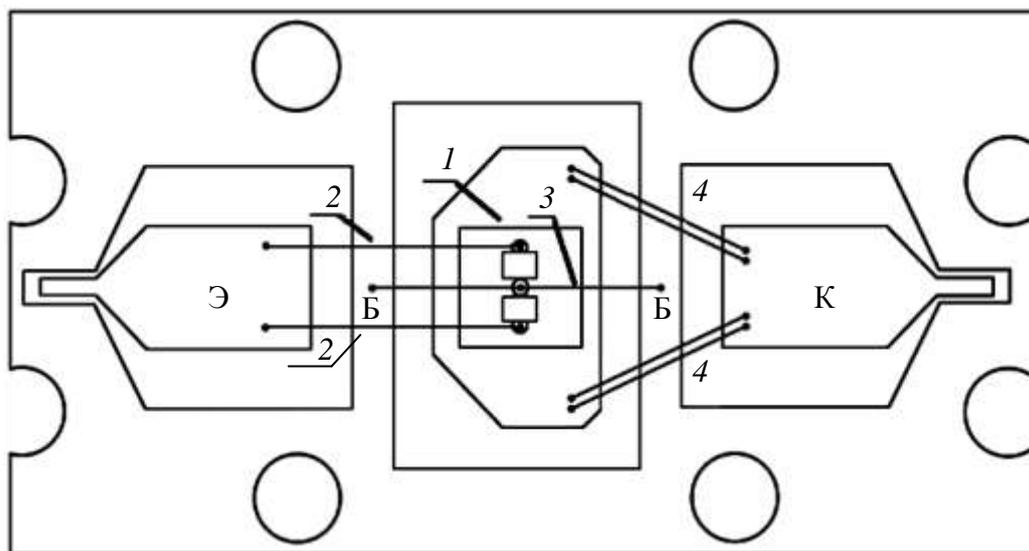


Рис. 1. Тестовая плата с установленным кристаллом транзистора 2Т937

Оптимизация параметров транзистора 2Т937 заключается в определении параметров модели Гуммеля–Пуна, при которых расчетные статические характеристики транзистора максимально приближены к измеренным [13].

Были измерены статические входные (ток базы и эмиттера) и выходная (ток коллектора) характеристики. Схема измерений статических входных характеристик по току базы показана на рис. 2.

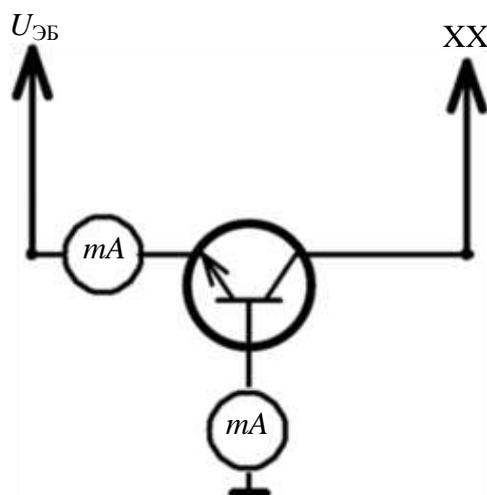


Рис. 2. Схема измерения статических входных характеристик по току базы

Зависимость тока базы от напряжения база–эмиттер ($U_{ЭБ}$) снималась без резистора в эмиттерной цепи. Ограничение тока базы (5 мА) задавалось в измерителе полупроводниковых приборов (ИППП). Коллектор при этом находился в режиме холостого хода (XX).

Зависимость тока эмиттера от напряжения база–эмиттер ($U_{ЭБ}$) получена для двух значений напряжения коллектор–база ($U_{КБ} = 5 \text{ В}$, $U_{КБ} = 10 \text{ В}$). При измерениях в ИППП использовался режим ограничения тока эмиттера (200 мА). Схема измерений показана на рис. 3.

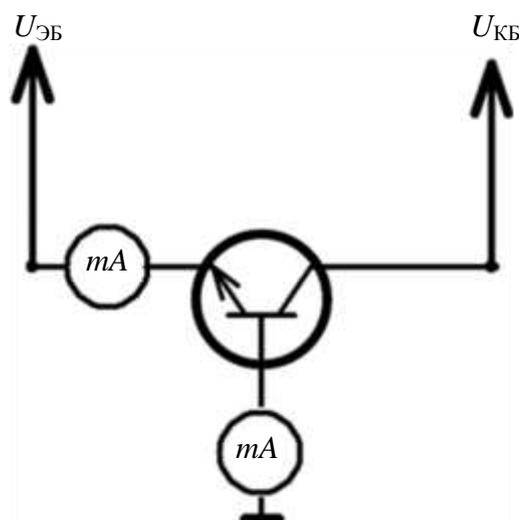


Рис. 3. Схема измерения статических входных характеристик по току эмиттера

Схема для измерения зависимости тока коллектора от напряжения коллектор–база ($U_{КБ}$) показана на рис. 4. Установленный в эмиттерной цепи резистор необходим для задания тока базы. В ИППП устанавливалось ограничение тока коллектора 50 мА, который достигался при напряжении источника питания $-2,79$ В. Поскольку ток базы не превышал 1 мА, ток коллектора примерно равнялся по величине току эмиттера.

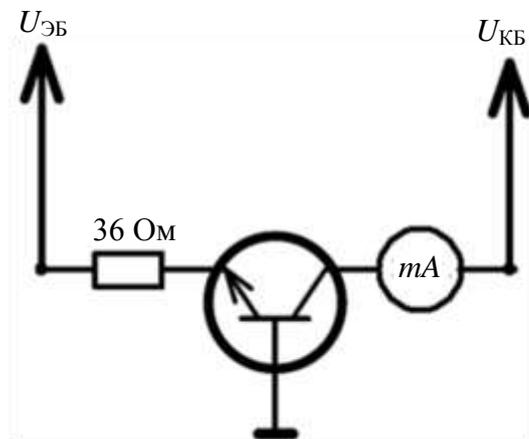


Рис. 4. Схема измерения выходных характеристик

Две задачи оптимизации параметров модели Гуммеля–Пуна решались отдельно для двух групп входных характеристик (по току базы и току эмиттера).

Результаты решения первой задачи моделирования статических характеристик (по току базы и току коллектора) показаны на рис. 5, 6. Экспериментальные характеристики даны пунктирными линиями, расчетные (по модели Гуммеля–Пуна) – сплошными. Поскольку режим насыщения тока базы (пунктирная линия, см. рис. 5) достигался аппаратным способом, в модели такой режим не воспроизводился.

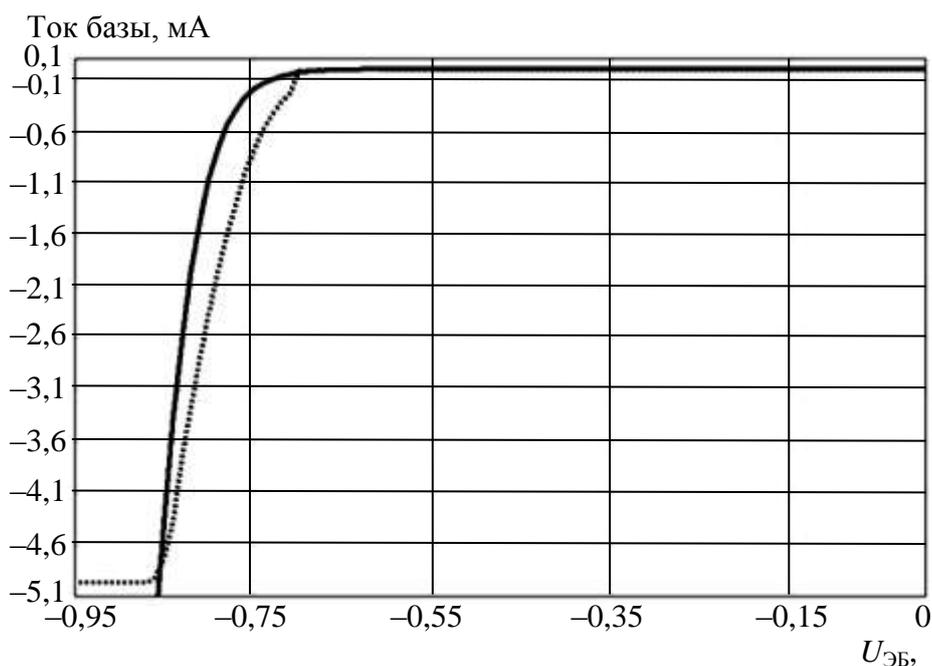


Рис. 5. Зависимость тока базы от $U_{ЭБ}$ (входная характеристика)

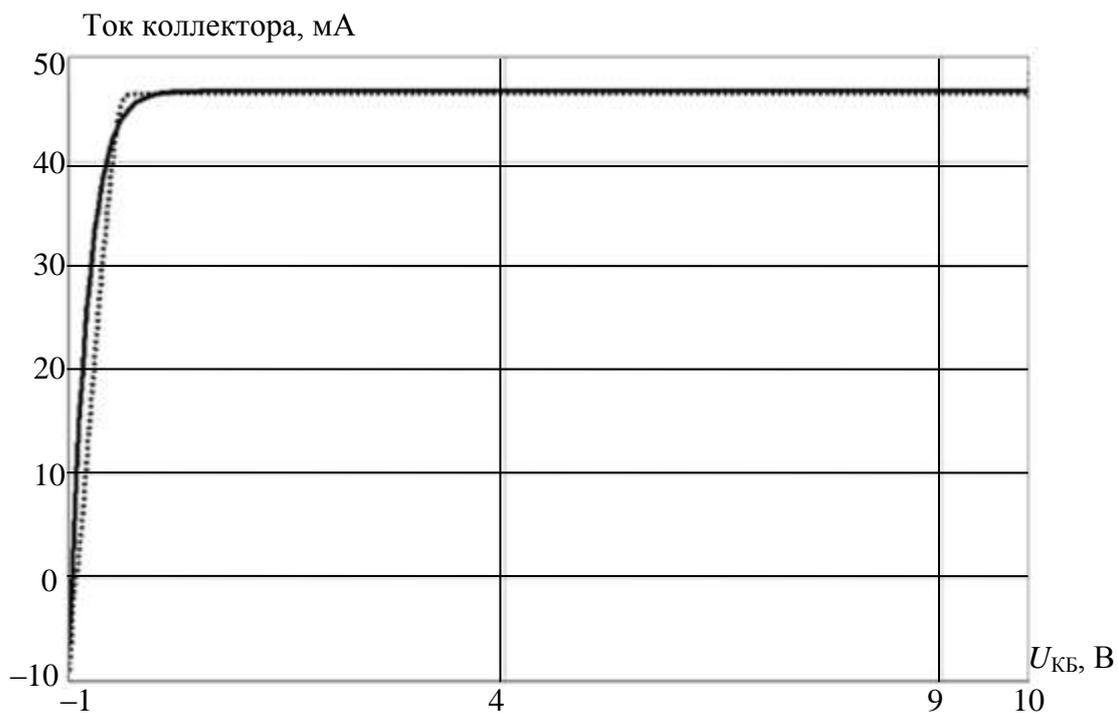


Рис. 6. Результаты моделирования статических характеристик (по току базы и току коллектора). Напряжение эмиттер–база $-2,79$ В

Результаты второй задачи моделирования входных (по току эмиттера) и выходных (по току коллектора) статических характеристик показаны на рис. 7, 8. Экспериментальные характеристики поданы пунктирными линиями, расчетные (по модели Гуммеля–Пуна) – сплошными.

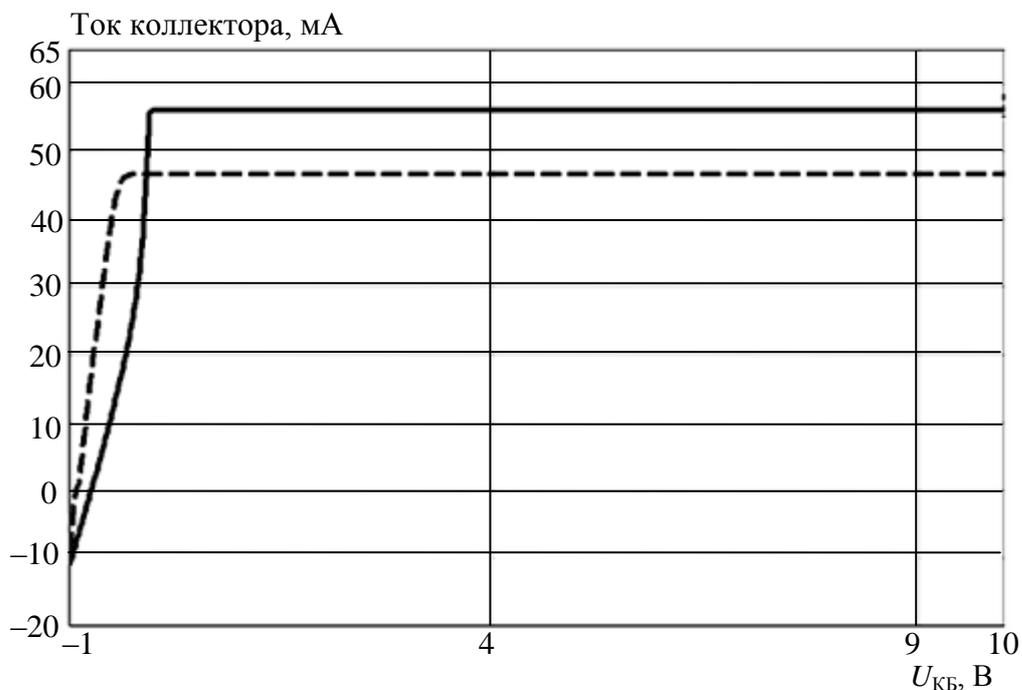


Рис. 7. Зависимость тока коллектора от напряжения коллектор–база (выходная характеристика). Напряжение эмиттер–база $-2,79$ В

Поскольку режим насыщения тока эмиттера (пунктирная линия, рис. 8, 9) достигался аппаратным способом, в модели такой режим не воспроизводился.

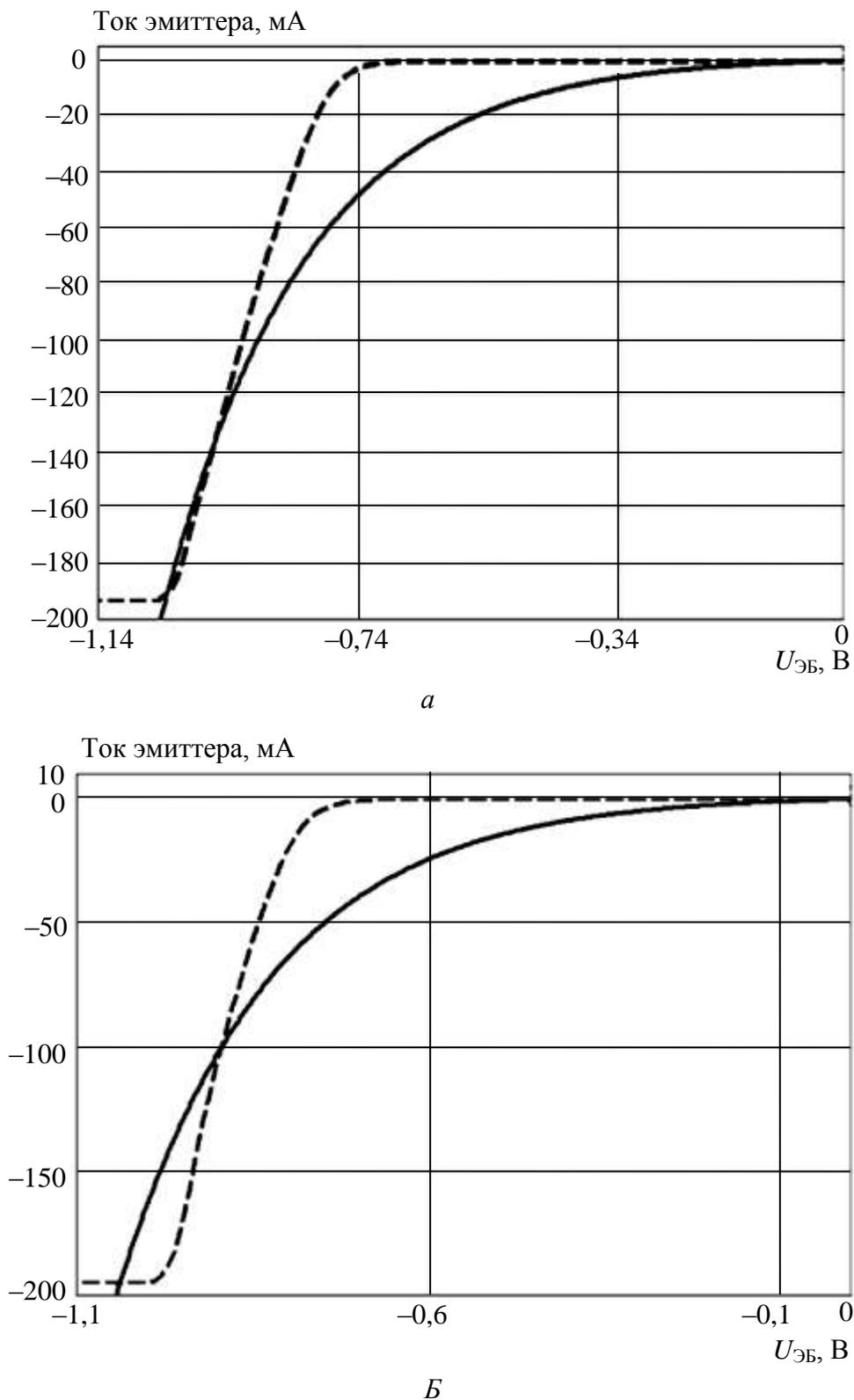


Рис. 8. Зависимость тока эмиттера от напряжения эмиттер–база (входная характеристика): а – напряжение коллектор–база +5 В; б – напряжение коллектор–база +10 В

Поскольку достигнутые результаты моделирования статических характеристик по току базы (см. рис. 5, 6) показали лучшее совпадение с экспериментальными данными, они могут использоваться в качестве первого приближения для последующего решения задачи оптимизации частотных характеристик (S -параметров) транзистора по модели Гуммеля–Пуна [13–15].

В результате проведенной работы создана модель Гуммеля–Пуна кристалла отечественного биполярного транзистора 2Т937 [13]. Представлены результаты расчетов его оптимальных входных и выходных статических характеристик. Модель транзистора 2Т937 совместима с распространенными системами САПР и может использоваться при проектировании ряда устройств [16, 17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Страхова Л. Л., Куликов М. Н., Кудрявцева С. П., Сложеникин К. А.* ЖИГ-генераторы с микрорезонаторами на эпитаксиальных пленочных структурах ферритов (анализ патентной документации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 74–84.

2. *Хвалин А. Л., Страхова Л. Л., Воробьев А. В.* Оптимизация параметров модели биполярного транзистора по его экспериментальным характеристикам // Радиотехника. 2015. № 7. С. 35–40.

3. *Игнатъев А. А., Страхова Л. Л., Кудрявцева С. П., Хвалин А. Л.* Патентные исследования по разработке высокочастотных транзисторов, магнитотранзисторов и устройств на их основе // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Прикладные аспекты. С. 85–104.

4. *Самолданов В. Н., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А., Хвалин А. Л., Маринин А. В., Коваленко М. Л.* Компьютерное моделирование ферритовых резонаторов во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 110–118.

5. *Хвалин А. Л., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Васильев А. В., Самолданов В. Н.* Электродинамическое моделирование СВЧ-усилителей с гетеромагнитным управлением // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 99–105.

6. *Хвалин А. Л., Васильев А. В.* Оптимальный синтез характеристик транзисторного усилителя УВЧ-диапазона в интегральном исполнении // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 10. С. 29–33.

7. *Хвалин А. Л.* Векторный магнитометр слабых магнитных полей // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 45–48.

8. *Хвалин А. Л.* Физические принципы моделирования полевых транзисторов в УВЧ-диапазоне // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 59–67.

9. *Хвалин А. Л., Овчинников С. В., Сотов Л. С., Самолданов В. Н.* Первичный преобразователь на основе ЖИГ-генератора для измерения сильных магнитных полей // Датчики и системы. 2009. № 10. С. 57–58.

10. *Хвалин А. Л.* Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2009. № 4. С. 25–30.
11. *Хвалин А. Л.* Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2010. № 1. С. 73–80.
12. *Хвалин А. Л., Солопов А. А., Ляшенко А. В.* Исследование СВЧ-резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учетом доменной структуры // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2012. Вып. 12 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–11.
13. *Хвалин А. Л.* Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2014. 32 с.
14. *Хвалин А. Л., Сотов Л. С., Овчинников С. В., Кобякин В. П.* Экспериментальные исследования гибридного интегрального магнитоуправляемого генератора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 11. С. 42–44.
15. *Хвалин А. Л., Сотов Л. С., Васильев А. В.* Расчет характеристик интегрального магнитоуправляемого генератора в диапазоне частот 26,0–37,5 ГГц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 11. С. 47–49.
16. *Kats B. M., Meschanov V. P., Khvalin A. L.* Synthesis of superwide-band matching adapters in round coaxial lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, № 3. С. 575–579.
17. *Khvalin A. L.* A vector magnetometer for measuring weak fields // Measurement Techniques. 2015. Vol. 57, № 10. С. 1184–1188.

УДК 50.41.00

ДЕКОДЕР БИТОВ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВА МАНИПУЛЯЦИИ БИТАМИ ДАННЫХ

В. С. Чесаков, Л. С. Сотов

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Рассмотрено устройство для высокопроизводительного выполнения операций размещения и группировки битов машинного слова в микропроцессорах. Исследована возможность использования в декодере битов управления структур параллельных префиксных сумматоров Ладнера–Фишера, Когге–Стоуна, Брента–Кунга, Хана–Карлсона. Показано, что с точки зрения быстродействия и аппаратурной сложности наилучшим техническим решением является устройство расчета количества битов с высоким логическим уровнем на базе структуры префиксного сумматора Хана–Карлсона.

Ключевые слова: многоуровневая коммутационная схема, префиксный сумматор, манипуляция битами, микропроцессор, инструкция группировки битов, инструкция размещения битов.

Control Bits Decoder of Bit Manipulation Device

V. S. Chesakov, L. S. Sotov

The device for high-performance execution of group and deposit instructions is considered. The structures of parallel prefix adders of Ladner–Fischer, Cogg–Stone, Brent–Kung, Khan–Carlson is proposed for control bits decoder. It is shown that high performance and low hardware complexity can be achieved on the basis of Khan–Carlson prefix adder structure.

Key words: multistage interconnection network, prefix adder, bit manipulation, microprocessor, instruction group, instruction deposit.

В практических задачах обработки информации с использованием вычислительной техники часто возникают задачи, связанные с перестановками битов и частей машинных слов [1] или преобразованием форматов представления данных [2, 3]. Подобные задачи возникают в системах управления хранилищами и базами данных [4, 5], защиты информации [6, 7], генерации шумов [8, 9], кодирования [10, 11], автоматизированного проектирования [12], комбинаторных автоматах [13, 14] и системах связи [15]. Перестановки используются в качестве примитивов в криптографических шифрах.

Обычные микропроцессоры имеют низкую производительность при выполнении операций перестановки битов машинного слова. Для ускорения операции перестановки обычно используют аппаратные средства [16, 17].

Известны *RISC*-процессоры, осуществляющие перестановку n битов за несколько операций [18, 19]. В микропроцессорах с ускоренной манипуляцией битами данных перестановки, извлечение и размещение битов машинного слова выполняются специальными модулями на базе многоуровневых коммутационных схем [20]. Управлять этими схемами можно с использованием кодов Лемера [21]. Аппаратурная сложность таких модулей определяется комбинаторной моделью, положенной в основу формирователя перестановки, при этом с уменьшением времени преобразования увеличивается аппаратная сложность преобразователя [22, 23]. В то же время упрощение конструкции преобразователя формата приводит к необходимости многоуровневой обработки и сокращает скорость выполнения операции преобразования формата представления данных [24, 25].

В работе [26] предложен универсальный модуль для манипуляции битами данных, построенный на базе многоуровневой коммутационной схемы. Для управления схемой используется декодер битов управления, осуществляющий вычисление порядковых номеров следования битов с высоким или низким логическим уровнем и формирующий биты управления переключателями коммутационной схемы [27]. Параметры аппаратурной сложности и быстродействия этого декодера определяют параметры универсального модуля для манипуляции битами данных в целом.

Цель исследования – поиск наилучшего с точки зрения простоты и обеспечения высокого быстродействия технического решения для расчета порядковых номеров следования битов данных с высоким логическим уровнем.

Структурные схемы устройств расчета
порядковых номеров следования битов данных

Для быстрого выполнения операций группировки и размещения битов машинного слова используется многоуровневая коммутационная схема, предложенная в [26]. На базе этой схемы было разработано устройство, осуществляющее две новые инструкции: $bsn\ r_1 = r_2$, $ar.b_1$, $ar.b_2$, $ar.b_3$ и $grpm\ r_1 = r_2, r_3$, где r_1 – регистр выходных данных, r_2 – регистр входных данных, $ar.b_1$, $ar.b_2$, $ar.b_3$, r_3 – регистры, хранящие код управления перестановкой.

Диаграмма, приведенная на рис. 1, иллюстрирует преобразования, осуществляемые с использованием инструкций bsn , grp , $grpm$ для случая $n = 8$. В верхней части рис. 1, a – $в$ расположены регистр управляющих кодов r_3 и регистр входных данных r_2 , а в нижней части – регистр выходных данных r_1 . Отличие инструкции $grpm$ от grp заключается в том, что при использовании инструкции grp сгруппированные данные сохраняют свой первичный порядок, а при использовании инструкции $grpm$ порядок данных, выбранных с применением битов управления с низким логическим уровнем, меняется на обратный. Инструкция bsn предназначена для статического преобразования форматов данных, а инструкция $grpm$ – для динамического, так как настройка коммутационной матрицы при использовании этой инструкции выполняется значительно быстрее с применением разработанных средств аппаратной поддержки. Известно, что произвольное преобразование форматов данных формируется с использованием последовательно $\log_2 n$ инструкций $grpm$ или двух инструкций bsn .

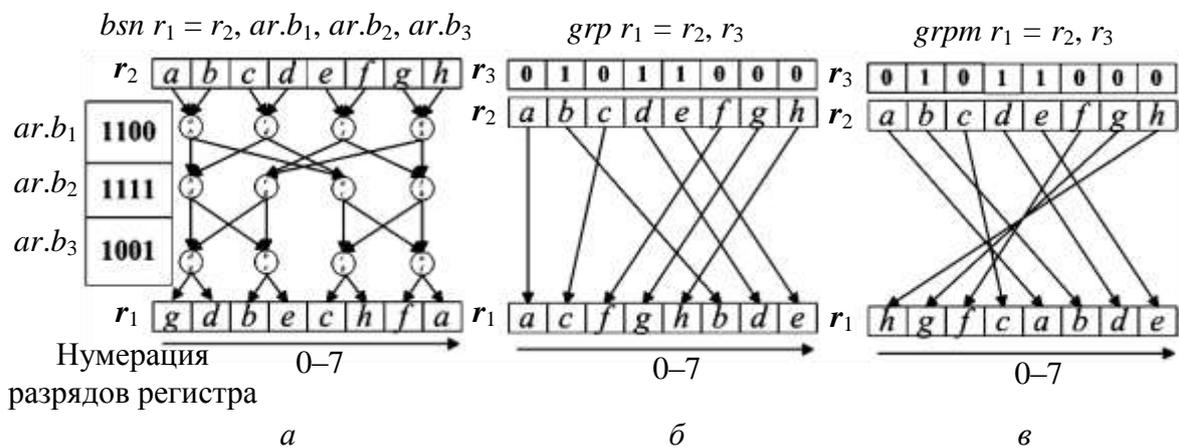


Рис. 1. Диаграмма преобразований, осуществляемых с использованием инструкций: a – bsn ; $б$ – $grpm$; $в$ – grp

Структурно-функциональная схема устройства $GRPM-64$ [26, 27], выполняющего преобразования данных длиной $n = 64$ бит с использованием инструкций $grpm$ и bsn , представлена на рис. 2. Коммутационная матрица устройства включает шесть уровней преобразования bsn_1 – bsn_6 . В зависимости от выполняемой инструкции bsn или $grpm$ блок FP осуществляет одну из двух фиксированных перестановок.

Декодер битов управления, помещаемых в регистр r_3 процессора, включает сумматоры, осуществляющие вычисление порядковых номеров следования битов с высоким или низким логическим уровнем и формирующие биты управления переключателями коммутационной матрицы устройства.

В работе [27] показано, что структура устройств расчета порядковых номеров следования битов данных может быть аналогична структуре префиксных сумматоров, используемых в вычислительной технике. Диаграмма орграфа матрицы сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем для случая $n = 16$ представлена на рис. 3. На входы D_1-D_8 подаются входные биты данных. В вершинах находятся сумматоры. Это могут быть сумматоры по модулю 2 для управления одним уровнем коммутационной схемы, сумматоры по модулю 4 для управления двумя уровнями коммутационной схемы и т. д. Для управления всей коммутационной схемой необходимо использовать сумматоры по модулю $\log_2(n)$, где n – длина входной бинарной строки.

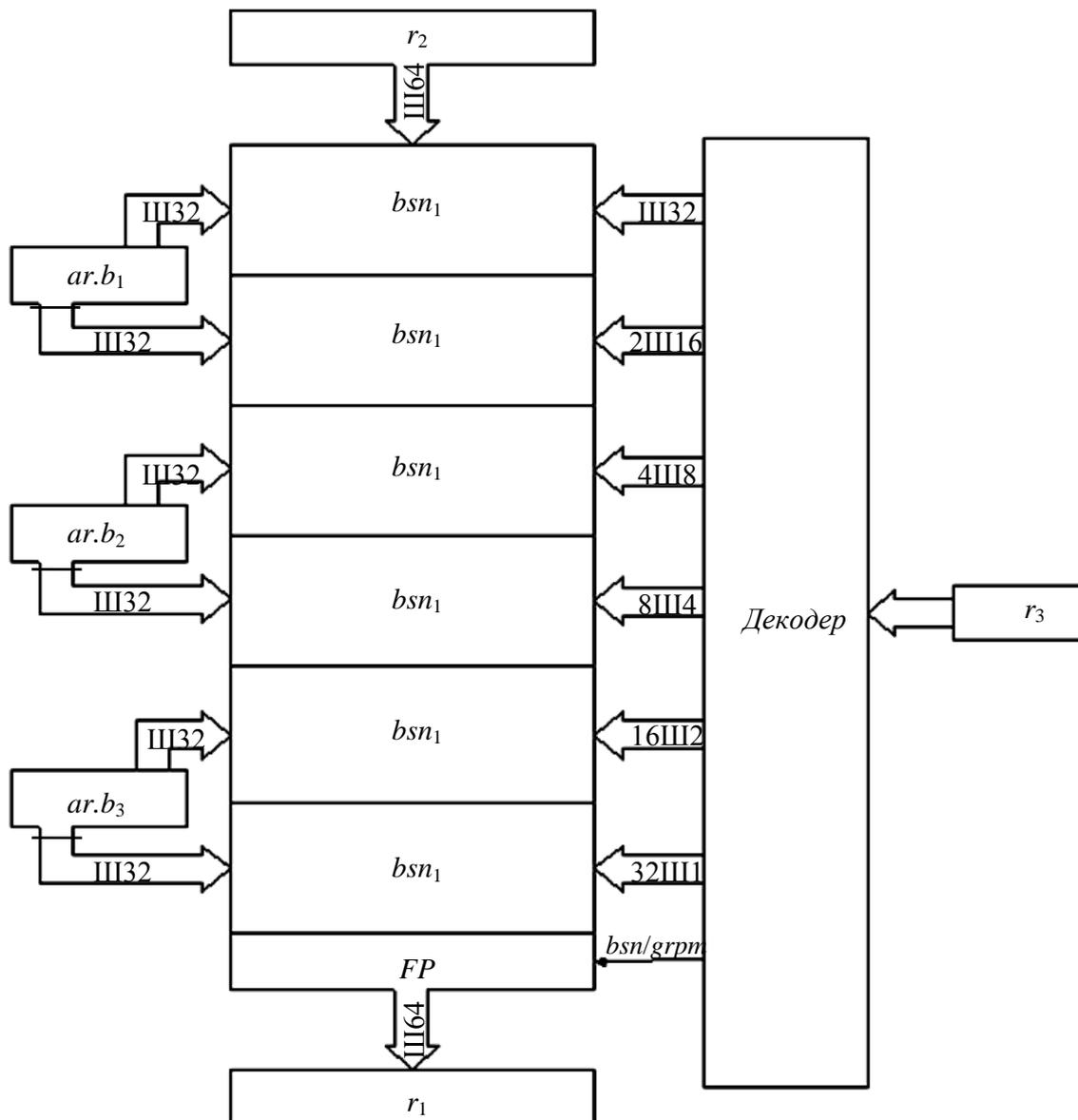


Рис. 2. Структурно-функциональная организация устройства формирования преобразований форматов данных, осуществляющего инструкции bsn и $grpm$

На выходе S_2 формируются суммы битов с высоким логическим уровнем, подаваемых на входы D_1, D_2 . На выходе S_3 формируются суммы битов с высоким логическим уровнем, подаваемые на входы D_1-D_4 , и т. д. На выходе S_{16} формируются суммы битов с высоким логическим уровнем, подаваемые на входы D_1-D_{16} .

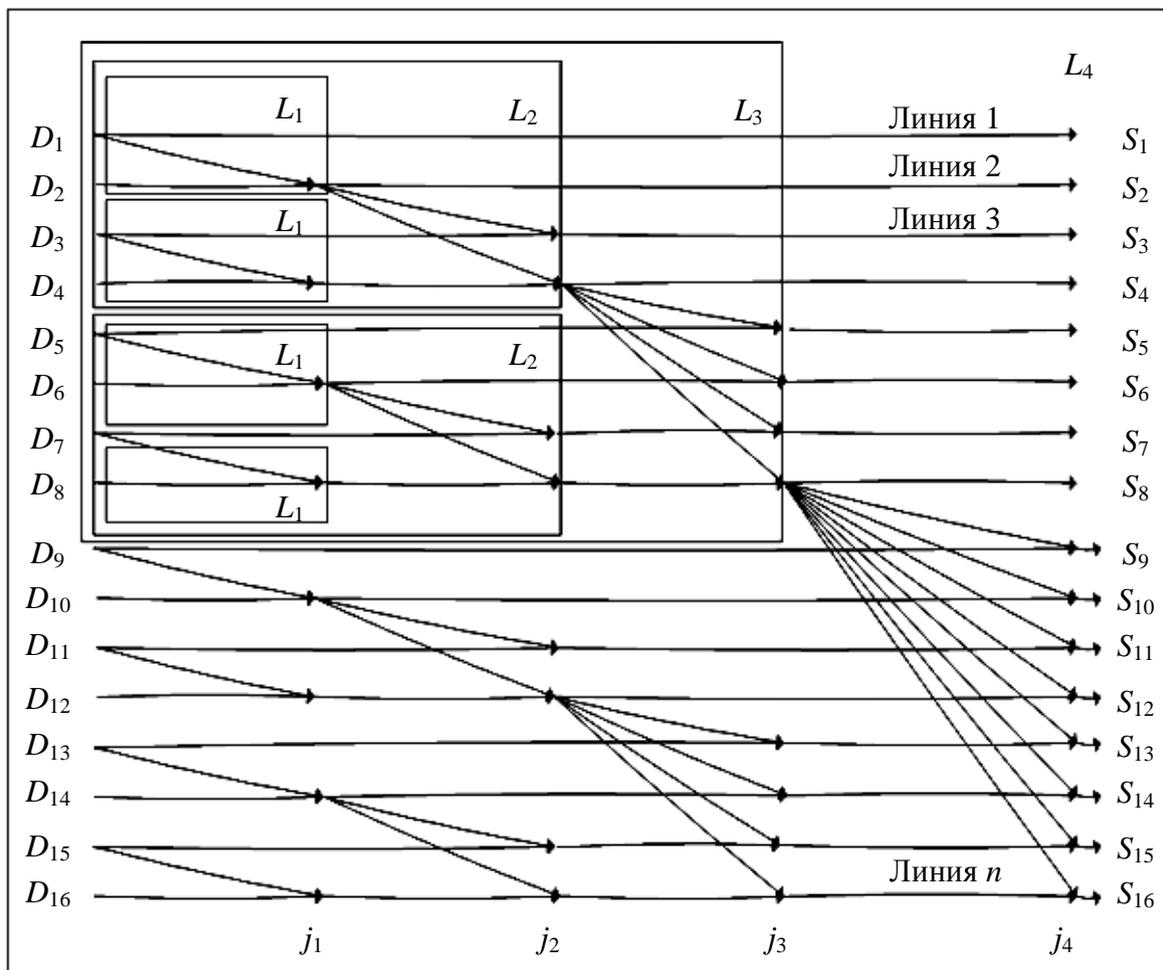


Рис. 3. Диаграмма орграфа матрицы сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем для случая $n = 16$

Из анализа диаграммы (см. рис. 3) следует, что орграф матрицы сумматоров аналогичен орграфу префиксного сумматора Ладнера–Фишера (*Ladner–Fischer*), недостатком которого является большой коэффициент разветвления в вершинах (S_4, L_2) , (S_8, L_3) и т. д.

Диаграмма орграфа матрицы сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем с использованием структуры префиксного сумматора Когге–Стоуна (*Kogge–Stone*) для случая $n = 16$ представлена на рис. 4.

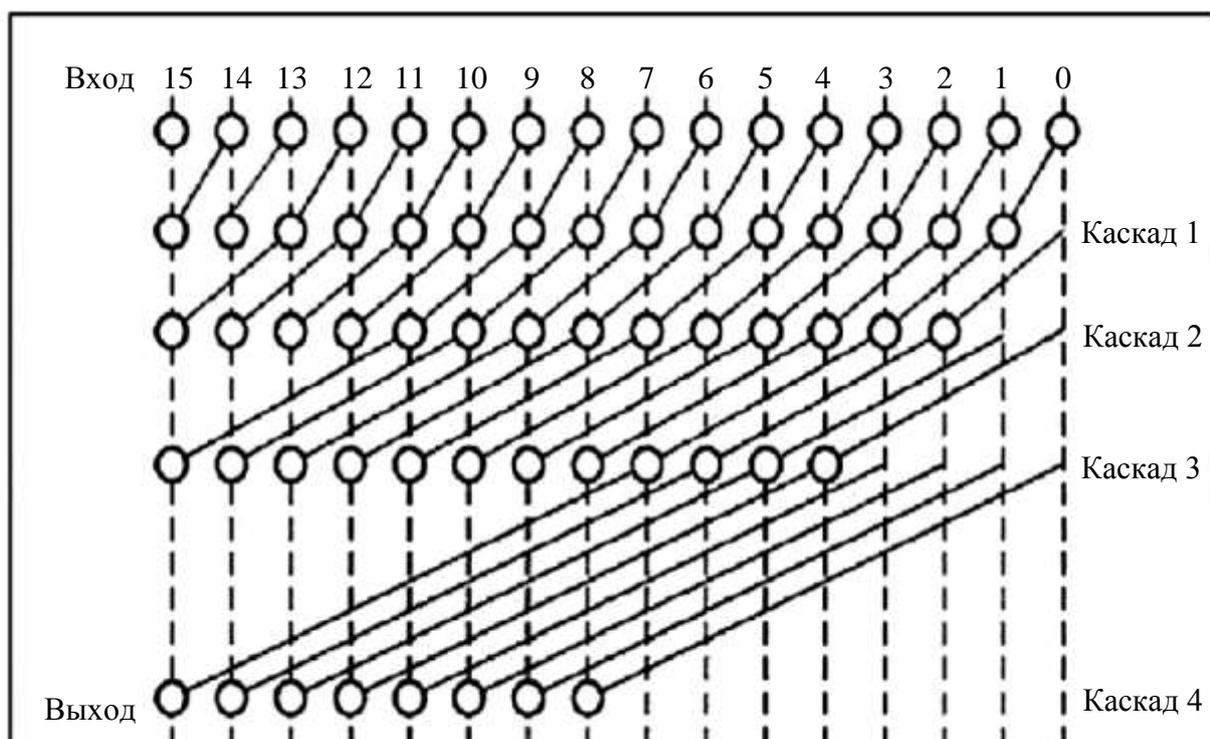


Рис. 4. Диаграмма орграфа матрицы Когге–Стоуна (*Kogge–Stone*) сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем для случая $n = 16$

Диаграмма орграфа матрицы сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем с использованием структуры префиксного сумматора Брента–Кунга (*Brent–Kung*) для случая $n = 16$ представлена на рис. 5.

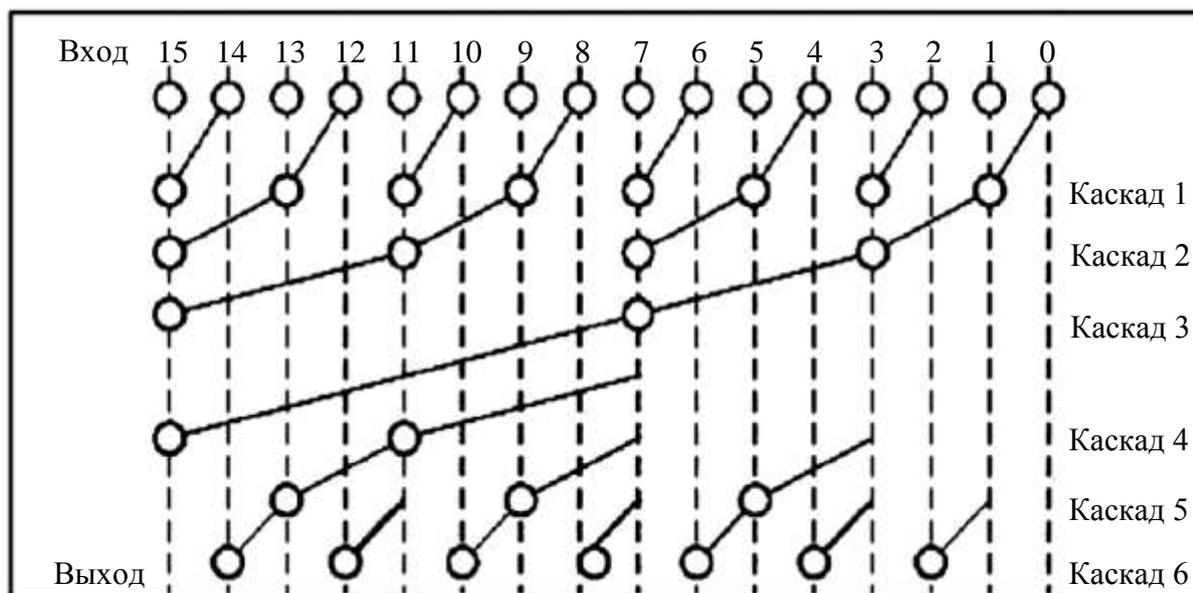


Рис. 5. Диаграмма орграфа матрицы Брента–Кунга (*Brent–Kung*) сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем для случая $n = 16$

Диаграмма орграфа матрицы сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем с использованием структуры префиксного сумматора Хана–Карлсона (*Han–Carlson*) для случая $n = 16$ представлена на рис. 6.

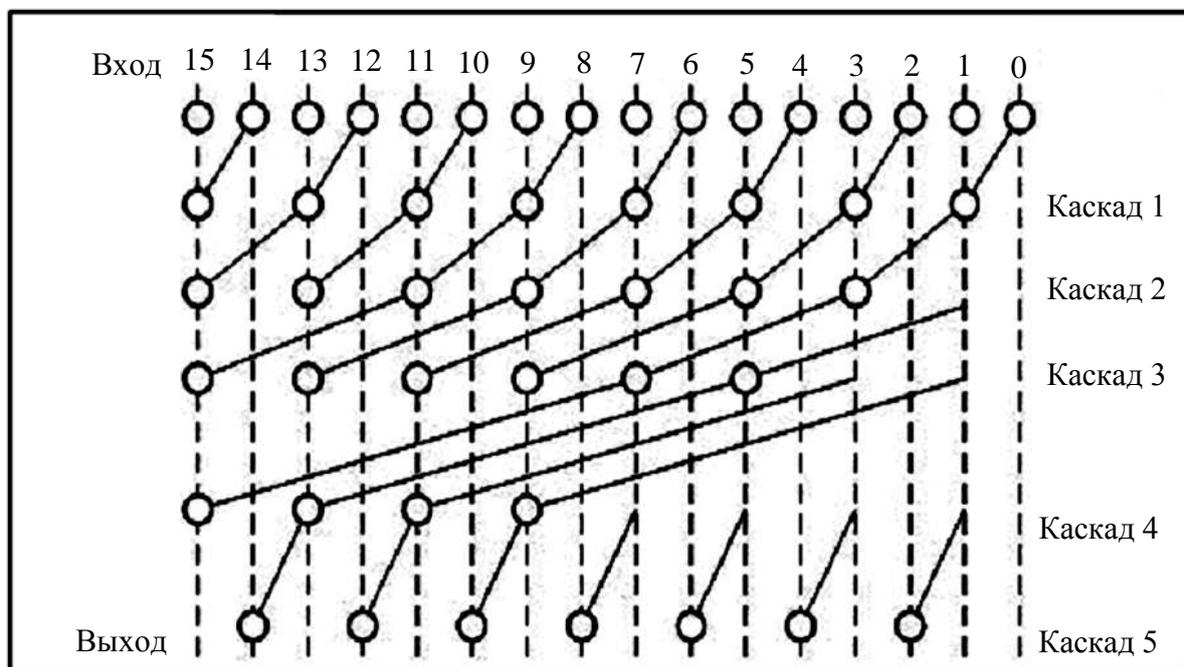


Рис. 6. Диаграмма орграфа матрицы Хана–Карлсона (*Han–Carlson*) сумматоров устройства для расчета порядковых номеров битов с высоким логическим уровнем для случая $n = 16$

В вершинах орграфа располагаются двоичные сумматоры. На первом уровне проводится суммирование по модулю два, на втором – по модулю четыре и т. д.

Устройство расчета количества битов с высоким логическим уровнем на базе структуры Ладнера–Фишера имеет минимальную логическую глубину $Ld = \log_2(n)$ по сравнению с устройствами на базе структур Брента–Кунга (*Brent–Kung*), Хана–Карлсона (*Han–Carlson*), однако высокий коэффициент разветвления снижает быстродействие используемой схемы. Количество сумматоров схемы Ладнера–Фишера составляет

$$Ns = n/2 \cdot \log_2(n).$$

Устройство расчета количества битов с высоким логическим уровнем на базе структуры Когге–Стоуна имеет минимальную логическую глубину аналогично устройству Ладнера–Фишера и бинарное дерево с минимальным коэффициентом разветвления. Недостатком данного технического решения является относительно высокое количество сумматоров в структуре

$$Ns = (n - \log_2(n)) \cdot \log_2(n) + 1.$$

Устройство на базе структуры Brenta–Kunga имеет минимальное количество сумматоров. Однако глубина логики устройства Brenta–Kunga составляет $Ld = \log_2(n)+2$.

Устройство с использованием структуры Хана–Карлсона имеет гибридную структуру, состоящую из уровней преобразования Когге–Стоуна и Brenta–Kunga. Этим достигается компромисс между аппаратурной сложностью и быстродействием.

Следует отметить, что каждый бит на выходах S_1 – S_{16} используется для управления переключателем с двумя выходами и двумя входами. Поэтому на практике используются либо нечетные выходы $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{15}$, либо четные $S_2, S_4, S_6, \dots, S_{16}$, что позволяет исключить часть сумматоров на последнем уровне. Поэтому в устройствах на базе структур Brenta–Kunga и Хана–Карлсона последний уровень можно исключить. Соответственно глубина логики устройства Хана–Карлсона становится равной глубине логики устройства Ладнера–Фишера и Когге–Стоуна $Ld = \log_2(n)$ при значительно меньшем числе используемых сумматоров. Поэтому с точки зрения быстродействия и аппаратурной сложности наилучшим решением является устройство расчета количества битов с высоким логическим уровнем на базе структуры префиксного сумматора Хана–Карлсона.

Таким образом, предложены новые алгоритмы синтеза сумматоров декодера устройства манипуляции битами данных, осуществляющие их произвольную группировку и размещение. Минимальная задержка преобразования составляет $t_s \log_2(n)$, где t_s – задержка, создаваемая сумматором, нагруженным на два входа. Исследована возможность использования в декодере структур параллельных префиксных сумматоров Ладнера–Фишера, Когге–Стоуна, Brenta–Kunga, Хана–Карлсона. Показано, что наилучшим решением из рассмотренных является устройство на базе структуры Хана–Карлсона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сотов Л. С.* Об эффективности использования специальных команд преобразования форматов данных в вычислительной технике // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 61–80.
2. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Операции преобразования форматов представления и манипуляции битами данных в вычислительной технике // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 19 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 43–59.
3. *Молодченко Ж. А., Харин В. Н., Сотов Л. С.* Динамическое форматирование представлений объектов реляционных СУБД на основе кластерных транспозиций // Естественные и технические науки. 2007. № 6 (32). С. 226–228.
4. *Сотов Л. С., Харин В. Н.* Концепция ТСВ-платформы для распределенных информационно-вычислительных систем специального назначения // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 66–72.
5. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* О формировании доверенной среды серверных систем управления базами данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2008. № 3. С. 23–27.

6. *Анищенко А. Н., Ляшенко А. В., Солопов П. А., Сотов Л. С.* Минимизация рисков утечки информации из-за побочных электромагнитных излучений персонального компьютера // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 66–77.

7. *Воронков О. В., Мещанов В. П., Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Генератор истинно случайных чисел на основе двумерного кусочно-линейного отображения с хаотической динамикой // Нелинейный мир. 2014. Т. 12, № 12. С. 64–65.

8. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Стохастические генераторы упорядоченных разбиений конечных множеств с быстрым ростом энтропии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 57–72.

9. *Хвалин А. Л., Сотов Л. С., Россошанский А. В.* Цифровой формирователь случайных сигналов на базе сдвиговых регистров // Радиотехника. 2014. № 10. С. 68–73.

10. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Аппаратный акселератор сервера форматирования данных // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума : в 2 т. Пенза, 2007. Т. 1. С. 134–136.

11. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Математические модели стохастического формирования изоморфных представлений структурных элементов данных в ЭВМ // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 29–41.

12. *Сотов Л. С.* Аппаратные устройства формирования прямых и обратных перестановок данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 9 : Магнитоэлектроника. Микро- и наноструктуры. Прикладные аспекты. Проблемы физического образования. С. 61–77.

13. *Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Алгоритм работы и модель функционального генератора перестановок // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 41–46.

14. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Простой матричный формирователь г-выборок // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 47–56.

15. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л., Чесаков В. С.* Микропроцессор с ускоренной манипуляцией битами данных для обработки сигналов в системах связи // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2015. № 18. С. 72–81.

16. *Сотов Л. С.* Аппаратные устройства формирования прямых и обратных перестановок данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 9 : Магнитоэлектроника. Микро- и наноструктуры. Прикладные аспекты. Проблемы физического образования. С. 61–77.

17. *Сотов Л. С.* Комбинаторная модель функционального формирователя разбиений бинарного множества // Информационные технологии. 2010. № 10. С. 46–52.

18. *Молдовян Н. А., Молдовян А. А., Алексеев Л. Е.* Перспективы разработки скоростных шифров на основе управляемых перестановок // Вопр. защиты информации. 1999. № 1. С. 41–47.

19. *Назаров С. И., Сотов Л. С., Ляшенко А. В.* Процессор с улучшенной манипуляцией битами данных для средств навигации, обработки сигналов и изображений, криптографии, мобильных диагностических устройств // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 51–63.

20. *Назаров С. И., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Проектирование микропроцессора с расширенным набором команд манипуляции битами данных на базе архитектуры OPENRISC1200 // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 50–65.

21. *Сотов Л. С., Чесаков В. С.* Биективное отображение кода Лемера на элементы модифицированной многоуровневой коммутационной схемы Бенеша // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 46–55.

22. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Модели аппаратных функциональных формирователей перестановок // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 10. С. 78–84.

23. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Моделирование архитектуры акселератора битовых перестановок с использованием САПР SYSTEM STUDIO фирмы SYNOPSIS // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 60–66.

24. *Молодченко Ж. А., Харин В. Н., Сотов Л. С.* Алгоритм создания диверсификационного метода битовых преобразований // Естественные и технические науки. 2007. № 6. С. 222–225.

25. *Молодченко Ж. А., Харин В. Н., Овчинников С. В., Сотов Л. С.* Модели аппаратных акселераторов перестановок бинарных множеств // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 11–23.

26. *Сотов Л. С., Ачкасов В. Н.* Универсальный модуль манипуляции битами данных в микропроцессорах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 11 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 57–73.

27. *Сотов Л. С.* Методы синтеза устройств, выполняющих инструкции перестановки битов данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 25–50.

УДК 531.38

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. В. Ляшенко, А. А. Игнатьев*, Г. М. Проскуряков, М. В. Поздняков

ОАО «Институт критических технологий»,
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
E-mail: kbkt@renet.ru

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Показано, что для авиационных систем ориентации и навигации с целью повышения показателей точности и надежности их работы, а также для придания этим системам свойств автономности и адаптируемости к отказам, отказоустойчивости и живучести в реальных условиях применения возможно использование способа комбинирования

имеющихся на борту штатных систем ориентации и навигации с высоконадежным магнитоинерциальным модулем. Приведены алгоритмы обработки многомерной магнитоинерциальной информации и схема построения магнитоинерциального модуля.

Ключевые слова: автономность, отказоустойчивость, комбинирование информации, магнито-инерциальный модуль, обратная задача бортовых измерений, надежность.

Fail-Operational Piloting-Navigational Assemblies of Piloted and Unmanned Aerial Vehicles

A. V. Lyashenko, A. A. Ignatiev, G. M. Proskuryakov, M. V. Pozdnyakov

It was shown that for the avionic orientation and navigation systems it is possible to use the method of combination of existing at the board flight orientation and navigation systems with high-reliable magnetic-inertial module for the purposes of accuracy and operational reliability degree increase and also in order to attain to these systems the properties of crew endurance, adaptability to the failure occurrences, fail-operational capability and combat survivability. The algorithms of multidimensional magnetic-inertial information processing and architecture of magnetic-inertial module are shown.

Key words: crew endurance, fail-operational capability, information combination, magnetic-inertial module, inverse problem of board measurement, reliability.

С учетом действия возмущающих факторов, проявляемых на практике в реальных условиях, для авиационных систем ориентации и навигации (СОН), применяемых на летательных аппаратах (ЛА) – пилотируемых (ПЛА) и беспилотных (БЛА), – наряду с требованиями высокой точности, надежности и долговечности важно обеспечить **автономность, отказоустойчивость и живучесть** систем [1–9].

Для выполнения этих требований в КБ критических технологий (КБ КТ) ОАО «Институт критических технологий» (г. Саратов) предложен способ **комбинирования** средств измерений и разработано его программно-алгоритмическое, техническое и технологическое обеспечение с помощью **магнитоинерциального модуля** (МИМ). Для обеспечения работоспособности СОН в условиях появления отказов в настоящее время в авиации и ракетно-космической технике (РКТ) в соответствии с принципом комплексирования используются резервные приборы или резервные каналы [7–9].

В настоящей работе как альтернатива принципу комплексирования (резервирования) предлагается способ комбинирования средств измерения (СИ), обеспечивающий не структурную, а функциональную избыточность информации [7, 8].

Алгоритмы решения обратных задач измерений строятся на основе преобразования и обращения уравнений, описывающих формирование показаний МИМ (рис. 1).

Десятимерные показания МИМ формируются на основе объединения трехмерных показаний входящих в его состав трехосных блоков магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА) и гироскопов (ТБГ) [3–6]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_M^T \mathbf{u}_a^T \mathbf{u}_G^T \bar{T} = u_{xM} \quad u_{yM} \quad u_{zM} \quad u_{xa} \quad u_{ya} \quad u_{za} \quad u_{xG} \quad u_{yG} \quad u_{zG} \quad \bar{T}. \quad (1)$$

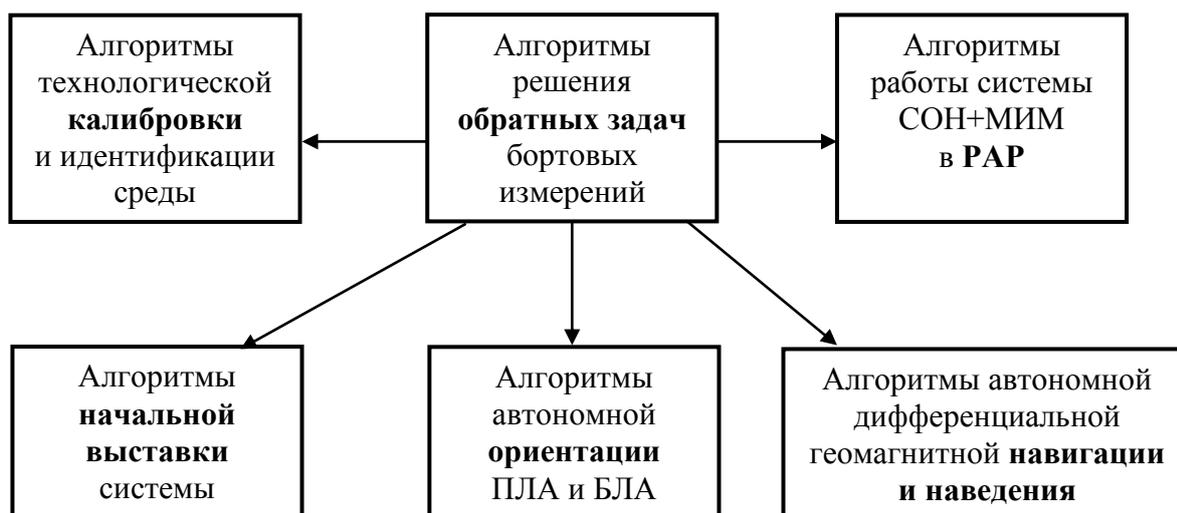


Рис. 1. Алгоритмы решения обратных задач

В свою очередь, показания блоков (ТБМ, ТБА, ТБГ) соответствуют трем векторам ($\mathbf{u}_m, \mathbf{u}_a, \mathbf{u}_\Gamma$), формирование которых стоит на основе девяти метрологических характеристик соответствующих измерений:

$$\mathbf{u}_m = \begin{matrix} u_{xm} & u_{ym} & u_{zm} \end{matrix} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix} = \text{diag } \begin{matrix} \gamma_x & \gamma_y & \gamma_z \end{matrix} \cdot \begin{matrix} - \\ \mathbf{T}_m \end{matrix} + \Delta \mathbf{u}_m, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_a = \begin{matrix} u_{xa} & u_{ya} & u_{za} \end{matrix} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix} = \text{diag } \begin{matrix} k_x & k_y & k_z \end{matrix} \cdot \begin{matrix} - \\ \mathbf{n}_m \end{matrix} + \Delta \mathbf{u}_a, \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_\Gamma = \begin{matrix} u_{x\Gamma} & u_{y\Gamma} & u_{z\Gamma} \end{matrix} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix} = \text{diag } \begin{matrix} n_x & n_y & n_z \end{matrix} \cdot \begin{matrix} - \\ \boldsymbol{\omega}_m \end{matrix} + \Delta \mathbf{u}_\Gamma, \quad (4)$$

где $\text{diag}[\dots]$ – диагональные матрицы значений масштабных коэффициентов ($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, k_x, k_y, k_z, n_x, n_y, n_z$) контуров измерений ТБМ, ТБА, ТБГ; $\Delta \mathbf{u}_m, \Delta \mathbf{u}_a, \Delta \mathbf{u}_\Gamma$ – векторы смещений (нулевых сигналов) соответствующих блоков); $[\dots]^T$ – знак транспонирования матриц и векторов; $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \boldsymbol{\omega}_m$ – векторы напряженности результирующего магнитного поля, кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости вращения ЛА, заданные в связанном трехграннике $m = XYZ$.

Формирование векторов $\mathbf{T}_m, \mathbf{n}_m, \boldsymbol{\omega}_m$ описывается соответствующими уравнениями Пуассона и Эйлера [3–6].

С учетом предварительно проводимых операций технологических калибровок, аналитических юстировок и полуаналитической идентификации параметров магнитного поля объекта (МПО) и самих измерителей [3–6] на основании приведения (редуцирования) показаний МИМ к эквивалентному немагнитному основанию с ортонормированным трехгранником уравнения Пуассона и Эйлера можно представить в следующем виде:

$$\tilde{\mathbf{T}}_m = \begin{matrix} \tilde{T}_x & \tilde{T}_y & \tilde{T}_z \end{matrix} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix} = A \cdot \begin{matrix} \dagger \\ \mathbf{T}_N \end{matrix} \begin{matrix} T_H & T_E \end{matrix} \begin{matrix} T \\ - \end{matrix}, \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{n}}_m = \tilde{n}_x \quad \tilde{n}_y \quad \tilde{n}_z \quad \tilde{\tau} = A \cdot \begin{bmatrix} g_N & g_H & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{a}_m, \quad (6)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_m = \tilde{\omega}_x \quad \tilde{\omega}_y \quad \tilde{\omega}_z \quad \tilde{\tau} = A \cdot \boldsymbol{\Omega} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\Psi} + \boldsymbol{\dot{\vartheta}} + \boldsymbol{\dot{\gamma}}, \quad (7)$$

где A – матрица ориентации ЛА; $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли; «~» – знак приведения; T_N, T_H, T_E, g_N, g_H – северные, вертикальные и восточные компоненты векторов напряженностей магнитного поля Земли (МПЗ) и поля тяжести Земли (ПТЗ); φ – географическая широта; \mathbf{a}_m – вектор абсолютного ускорения ЛА, отнесенный к географическому трехграннику $m = XYZ$; $\boldsymbol{\Psi}, \boldsymbol{\dot{\vartheta}}, \boldsymbol{\dot{\gamma}}$ – векторы угловых скоростей относительного вращения ЛА по каналам курса (ψ), тангажа (ϑ) и крена (γ).

Матрица ориентации A в авиации определяется в соответствии со схемой Эйлера–Крылова [10]:

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_m = \tilde{\omega}_x \quad \tilde{\omega}_y \quad \tilde{\omega}_z \quad \tilde{\tau} = A \cdot \boldsymbol{\Omega} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\Psi} + \boldsymbol{\dot{\vartheta}} + \boldsymbol{\dot{\gamma}}, \quad (7)$$

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi, \quad (8)$$

где $A_\gamma, A_\vartheta, A_\psi$ – матрицы углов крена, тангажа и курса.

Компоненты векторов МПЗ и ПТЗ однозначно определяются для каждой точки околоземного пространства в зависимости от значений сферических географических координат – широты (φ), долготы (λ) и высоты (h). С учетом этого факта из выражений (5)–(7) видно, что в показаниях МИМ содержится как пилотажная ($\psi, \vartheta, \gamma, h$), так и навигационная (φ, λ) информация. Следовательно, МИМ может выполнять функции многомерного много-связанного измерителя **пилотажно-навигационной информации** [7–11].

Алгоритмы решения задач автономной ориентации, навигации, наведения формируются на основе преобразования и обращения уравнений (5)–(8) [3–6]. Схема комбинированной системы ориентации и навигации (КСОН), т. е. отказоустойчивого пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) на основе комбинирования СОН с МИМ, представлена на рис. 2.

Микроконтроллер получает комбинированную информацию от основных частей комплекса: системы ориентации (СО), навигационной системы (НС) и МИМ – и реализует алгоритмы обработки многомерной информации в штатном и трех резервно-аварийных режимах (РАР). В штатном режиме МИМ выполняет функции системы встроенного контроля (СВК) для наблюдения за состоянием штатных СО, НС, а также функции их алгоритмической коррекции (АК).

В РАР-1,2,3 МИМ с МК обеспечивает резервно-аварийное поддержание работоспособности всего комплекса с учетом наступивших отказов в

СО или НС за счет реализации алгоритмов аналитического гироскопа направления (АГН), аналитической гировертикали (АГВ) или аналитической системы навигации (АСН).

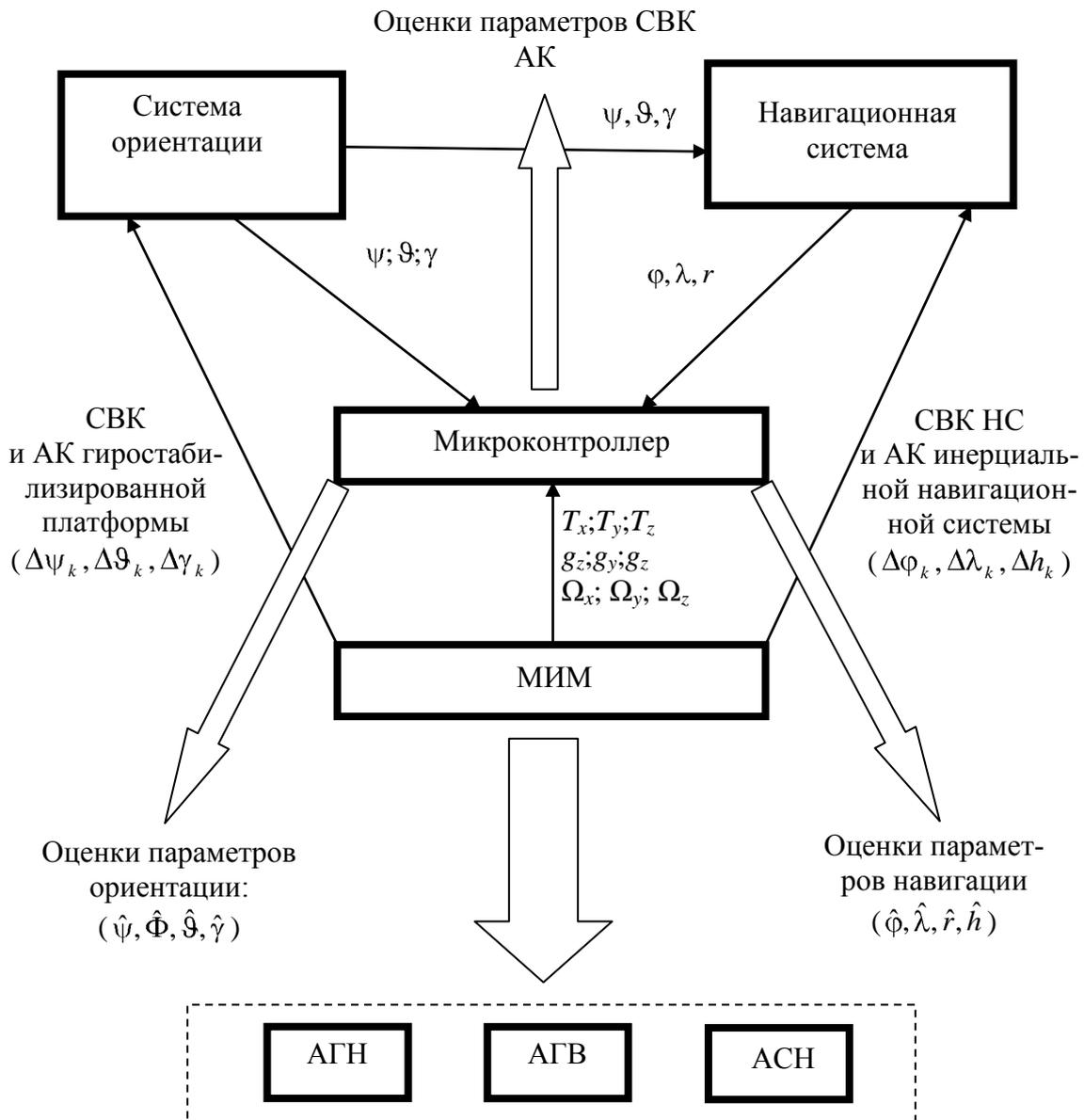


Рис. 2. Схема построения КСОН

Конструктивно МИМ выполнен в виде малогабаритного моноблока ($m \approx 200$ г) и построен по схеме измерительно-вычислительной системы (рис. 3). Функции, выполняемые МИМ (ориентация, навигация, коррекция, резервно-аварийные режимы (РАР), самодиагностика и др.), определяются сменным программно-алгоритмическим обеспечением (ПАО), реализуемым в микроконтроллере (МК) модуля при неизменной аппаратной части.

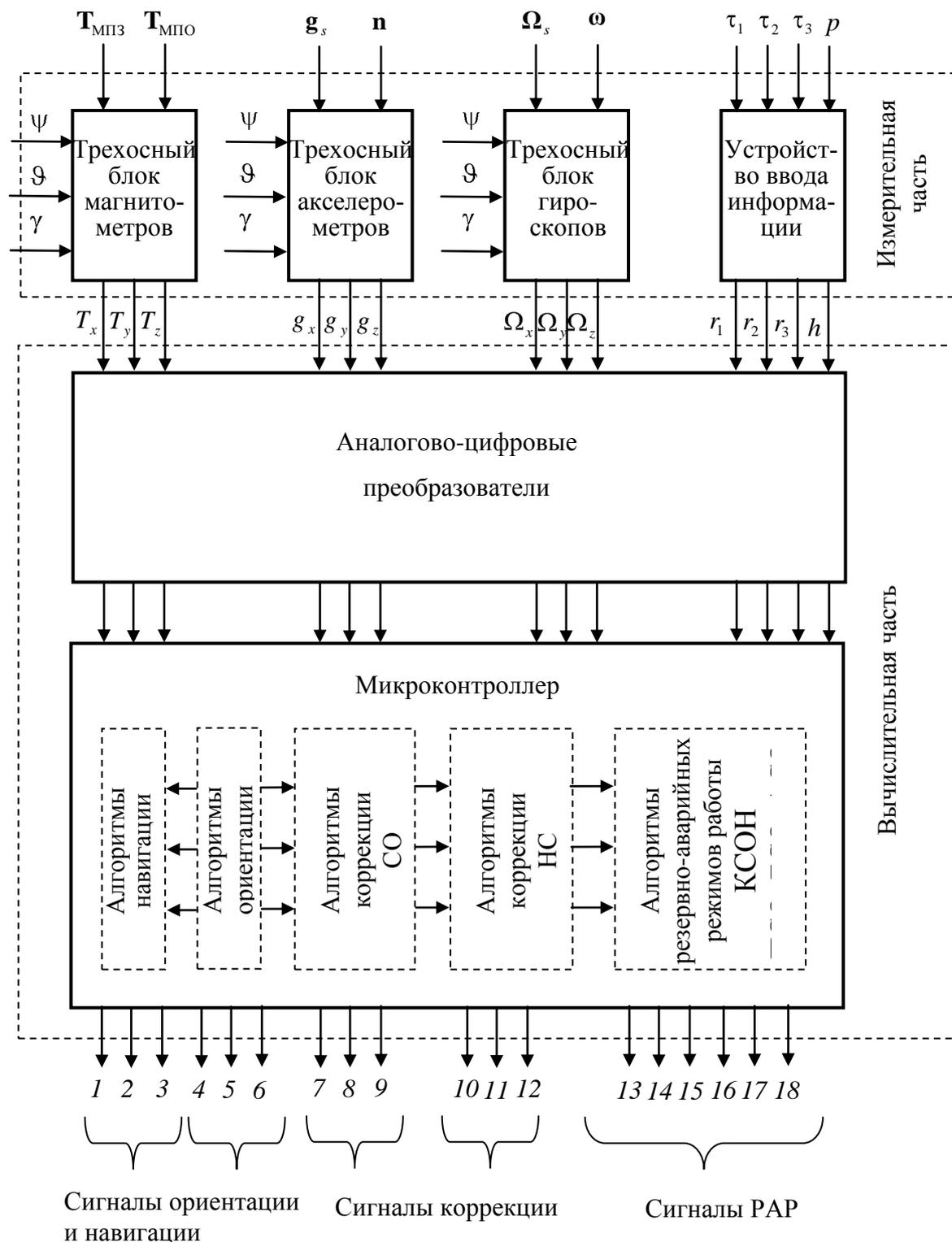


Рис. 3. Магнитоинерциальный модуль (схема структурная): 1 – $\hat{\phi}(\phi_1)$; 2 – $\hat{\lambda}(\lambda_1)$; 3 – $\hat{h}(h_1)$; 4 – $\hat{\psi}(\psi_1)$; 5 – $\hat{\theta}(\theta_1)$; 6 – $\hat{\gamma}(\gamma_1)$; 7 – $\Delta\psi_k$; 8 – $\Delta\theta_k$; 9 – $\Delta\gamma_k$; 10 – $\Delta\phi_k$; 11 – $\Delta\lambda_k$; 12 – Δh_k ; 13 – $\tilde{\phi}$; 14 – $\tilde{\lambda}$; 15 – \tilde{h} ; 16 – $\tilde{\psi}$; 17 – $\tilde{\theta}$; 18 – $\tilde{\gamma}$

Численные значения оценок надежности комбинированной СОИ в штатном и резервно-аварийных режимах, полученные расчетным путем, приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Надежность подсистем КСОН

Показатель	Обозначения	Подсистемы КСОН		
		СО	НС	МИМ
Надежность в течение $t = 5000$ ч (ARING-704)	$P(t) = e^{-\Lambda t}$	0,95	0,95	0,995
Интенсивность (частота) отказов	$\Lambda, \text{ч}^{-1}$	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
Время наработки на отказ	$T = \Lambda^{-1}, \text{ч}$	10^5	10^5	10^5
Степень риска (вероятность наступления отказа)	$Q(t) = 1 - P(t)$	0,05	0,05	0,005

Таблица 2

Надежность КСОН

Показатели и характеристики	Обозначения	Режимы работы КСОН			
		штатный	резервно-аварийные		
			РАР-1	РАР-2	РАР-3
Отказ подсистемы КСОН	–	–	СО (событие \bar{A})	НС (событие \bar{B})	МИМ (событие \bar{C})
Рабочая конфигурация КСОН	–	СО+НС+ +МИМ	НС+МИМ	СО+МИМ	СО+НС
Событие отказа	D_i	$D_1 \subset$ $A \wedge B \wedge C$	$D_2 \subset$ $\bar{A} \wedge B \wedge C$	$D_3 \subset$ $A \wedge \bar{B} \wedge C$	$D_4 \subset$ $A \wedge B \wedge \bar{C}$
Соединения подсистем (для расчета надежности):					
основное	–	$A+B$ (последовательное) $(A+B)+C$	$B+C$ (последовательное)	$A+C$ (последовательное)	$A+B$ (последовательное)
резервное	–	(параллельное)	–	–	–
Интенсивность (опасность, частота) отказов, ч^{-1}	Λ_i	$\Lambda_1 = 5 \cdot 10^{-7}$	$\Lambda_2 = \Lambda_3 = 1,1 \cdot 10^{-5}$		$\Lambda_4 = 2 \cdot 10^{-5}$
Время наработки на отказ, ч	$T_i = \Lambda_i^{-1}$	$T_1 = 2 \cdot 10^6$	$T_2 = T_3 = 9,1 \cdot 10^4$		$T_4 = 5 \cdot 10^4$
Надежность в течение $t = 5000$ ч (ARING-704)	$P_i(t) = e^{-\Lambda_i t}$	$P_1 = 0,9975$	$P_2 = P_3 = 0,9452$		$P_4 = 0,9025$
Степень риска (вероятность отказа)	$Q_i(t) = 1 - P_i(t)$	$Q_1 = 0,0025$	$Q_2 = Q_3 = 0,0548$		$Q_4 = 0,0975$

Комбинирование средств измерений в СОН обеспечивает условия для формирования функционально избыточной информации как на уровне блоков (МИМ), так и на уровне всего комплекса (СО, НС, МИМ) [7, 8]. Адаптируемая к отказам КСОН может иметь четыре конфигурации: одну штатную и три резервно-аварийных, что соответствует ее работе в четырех режимах (см. табл. 2)

Использование МИМ, построенного по схеме ортогонального или неортогонального бесплатформенного измерительного модуля, совместно со штатной СОН ПЛА и БЛА в соответствии с принципом **комбинирования СИ** позволяет существенно повысить показатели точности и надежности, а также обеспечить для КСОН реализацию самопроверяемости, отказоустойчивости и ее живучести в условиях решения задач автономной начальной выставки, ориентации, навигации и наведения ПЛА и БЛА с погрешностями позиционирования $\Delta r \leq 100$ м и ориентации $\Delta \alpha \leq 0,1^\circ$, надежностью работы с вероятностью $P \geq 0,9975$ (0,9452) в штатном (РАР) режиме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жидкова Н. В., Волков В. Л. Алгоритм самоорганизующегося процесса идентификации и компенсации отказов измерительных систем // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электронприбор», 2005. С. 89–90.
2. Кофман М. М., Парамонов П. П., Сабо Ю.К., Есин Ю.Ф. Отказоустойчивость как основа интеграции бортового оборудования. Принципы, системные решения, технологии // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электронприбор», 2005. С. 91–94.
3. Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М. Гетеромагнитометрия : Алгоритмы, методики калибровки блоков магнитометров. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 152 с.
4. Гетеромагнитометрия : микро- и наноэлектроника, геоинформационные технологии / А. А. Игнатъев, А. В. Ляшенко, М. Н. Куликов [и др.]. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. 180 с.
5. Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Каюшкина Е. А. Проблемы и перспективы развития прецизионной магнитометрии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013 Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 93–103.
6. Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Спиридонов Д. М. Однофакторные калибровки блока магнитометров (алгоритмы, методика, технологии) // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–131.
7. Епифанов А. Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами. М. : Машиностроение, 1978. 144 с.
8. Епифанов А. Д. Надежность систем управления. М. : Машиностроение, 1975. 180 с.
9. Пат 2236697 Российская Федерация, МПК 7G05D 1/08, G01C 21/20. Резервная система для индикации курса и пространственного положения на самолете / заявители Адебьерк П., Нордлунд Пер-Йохан, Карлссон Карл-Олоф ; патентообладатель SAAB AB (SE). – № 2001123235/09 ; заявл. 12.01.2000 ; опубл. 20.09.2004.

10. Анучин О. Н., Комарова И. Э., Порфирьев Л. Ф. Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников Земли. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 362 с.

11. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере : Термины, определения и обозначения. М. : Изд-во стандартов, 1981. 51 с.

УДК 50.41.00

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЕСКРИПТОРОВ ФОРМАТА

В. А. Малярчук

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Проведен сравнительный анализ способов представления дескрипторов для устройств преобразования форматов данных. Результаты исследований позволяют выбрать наиболее эффективные решения данной задачи.

Ключевые слова: многоуровневая коммутационная схема, разбиение множества, перестановка, кластер, криптографический шифр, псевдослучайная перестановка.

Comparative Analysis of Format Descriptors Representation

V. A. Malyarchuk

The comparative analysis of methods of representation of descriptors for devices of transformation of formats of data presentation is carried out. Results of researches allow to choose the most effective solutions of this task.

Key words: multistage interconnection network, partition of a set, permutation, cluster, cryptography cipher, pseudo-random shuffling.

Преобразования форматов представления бинарного множества часто встречаются в практических задачах при обработке информации с использованием ЭВМ [1], системах связи [2], защиты информации [3], управления хранилищами [4] и базами данных [5], генерации шумов [6]. Перестановки битов и связанные с ними преобразования форматов представления данных широко используются в криптографических шифрах. Различными авторами предлагаются алгоритмы скоростного шифрования, в которых используются операции управляемой перестановки. Наибольшей производительностью обладают аппаратные устройства [7]. Преобразования форматов представления данных сложны для программной реализации, поэтому для их ускорения операции обычно осуществляются с использованием аппаратных средств [8]. Известны RISC-процессоры, осуществляющие перестановку n битов за несколько операций [9, 10].

Особый интерес представляют алгоритмы синтеза формирователей перестановок [11] и устройств генерации дескрипторов формата, которые в

общем случае представляют собой бинарную строку. Компактное представление дескриптора формата является ключевым требованием при разработке устройств преобразования форматов данных в вычислительной технике.

В данной статье проведен краткий обзор существующих подходов и решений к построению аппаратных генераторов дескрипторов форматов представления данных, а также расчет и сравнительный анализ их аппаратной сложности.

При сравнении существующих решений необходимо учитывать следующие критерии:

- минимальное время формирования дескриптора формата;
- аппаратная сложность;
- количество и быстродействие источников случайных сигналов;
- необходимость формирования уникальных множеств и подмножеств дескрипторов формата.

В статье анализируются следующие модели генераторов перестановок:

- матричный комбинаторный генератор перестановок и упорядоченных разбиений числовых множеств *PG* [12];
- формирователи рабочих множеств дескрипторов со стохастическим рассеянием и комбинаторной генерацией, модель *RPG* [13];
- псевдослучайный генератор перестановок и упорядоченных разбиений бинарных множеств, модель *PRPG* [14];
- устройство последовательного стохастического формирования дескрипторов формата *SPRG* [15];
- синхронный стохастический формирователь перестановок, модель *SSPRG* [16];
- стохастические генераторы *r*-выборки упорядоченных разбиений конечных множеств с быстрым ростом энтропии *MRPG* [17, 18].

Для удобства сравнения моделей их характеристики сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики формирователей дескрипторов формата

Модель	Время формирования тактов	Аппаратурная сложность	Число источников случайных сигналов	Тип преобразования	Уникальность
<i>PG</i>	1	$O(n \log_2^2 n)$	–	П	+
<i>RPG</i>	1–5	$n!$	1	П, С	+-
<i>PRPG</i>	1	$O(n \log_2 n)$	–	П	+
<i>SPRG</i>	n	$O(n)$	1	С	–
<i>SSPRG</i>	$4n$	$O(n)$	1	С	–
<i>MRPG</i>	4	$O(n \log_2 n)$	$\frac{n(k-2)+2+n(k-u)}{2}$	С	–

Примечание. С – случайное, П – псевдослучайное.

Из анализа табл. 1 следует, что для систем с невысокой производительностью подходят модели *SPRG*, *SSPRG*. Высокопроизводительные формирователи дескрипторов формата следует проектировать с использованием моделей семейства *MRPG*. Модель *RPG* является не эффективной с аппаратной точки зрения, так как перечисленное множество дескрипторов формата необходимо размещать в памяти ЭВМ. Модели *PRPG*, *PG* можно использовать только для псевдослучайного формирования множества дескрипторов формата. При этом в системе появляется уязвимость, связанная с возможностью предсказания генератора псевдослучайной последовательности. Учитывая, что дескрипторы формата хранятся в памяти подсистемы, алгоритмы их случайного формирования являются предпочтительными.

При исследовании эффективных методов представления дескрипторов формата необходимо учитывать два критерия – компактность представления и высокую скорость преобразования в коды управления соответствующим аппаратным устройством динамического форматирования. При попытках оптимизации по обоим критериям возникает противоречие, поэтому в данной статье предлагается компромиссное решение.

Оценим минимальный размер памяти в ЭВМ, необходимый для размещения дескриптора формата. Для определенности будем считать, что формирователь реализует произвольное упорядоченное разбиение $n=2^k$ элементного множества на 2^{k-u} подмножеств. Мощность множества упорядоченных разбиений строки длиной n на подмножества C_1, C_2, \dots, C_m , $M_m = \frac{n!}{|C_1|!|C_2|!\dots|C_m|!}$. Таким образом, управляющий код минимального размера имеет длину

$$C(n,u) = \sum_{i=1}^n \log_2 i - 2^{u-k} \sum_{i=1}^{2^u} \log_2 i. \quad (1)$$

При $n \gg 1$ для расчета C_n можно использовать формулу Стирлинга

$$C(n,u) = n \log_2 \left(\frac{n}{e} \right) - 2^{u-k} \sum_{i=1}^{2^u} \log_2 i, \quad (2)$$

где $e = 2,71828$.

Применяя формулу Стирлинга дважды для случая $n \gg 1$, $u \gg 1$, получим

$$C(n,u) \approx n \log_2 \left(\frac{n}{e} \right) - n \log_2 \left(\frac{2^u}{e} \right) = n(k - u). \quad (3)$$

Заметим, что при значениях $n, u \geq 32$ погрешность расчета по формуле Стирлинга не превышает 3%. Таким образом, выражения (1)–(3) определяют минимальный размер дескриптора формата, определяющего упорядоченное разбиение n -элементного множества. При $u = 0$ реализуются произвольные перестановки исходных данных.

Для сравнения в табл. 2 приведены результаты расчетов минимального размера памяти ЭВМ для размещения дескрипторов формата с использованием формул (1)–(3) и кодов управления модели ВСТАМ [19, 20].

Таблица 2

Размер памяти в ЭВМ, необходимый для размещения дескриптора формата

Параметр	Значение параметра для различных n					
	8	16	32	64	128	256
$C(n,0)$	15,3	44,3	117,7	296,0	716,2	1684
L_n	17,0	50,0	134,0	337,0	811,0	1892,0
$\frac{ L_n - C_n }{C_n} 100\%$	11,1	13,0	13,9	13,9	13,2	12,4

Из анализа представленных результатов следует, что избыточность размера кодов не превышает 14%. Это позволяет использовать коды управления модели ВСТАМ без предварительной упаковки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сотов Л. С.* Об эффективности использования специальных команд преобразования форматов данных в вычислительной технике // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 61–80.
2. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л., Чесаков В. С.* Микропроцессор с ускоренной манипуляцией битами данных для обработки сигналов в системах связи // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 72–81.
3. *Анищенко А. Н., Ляшенко А. В., Солопов П. А., Сотов Л. С.* Минимизация рисков утечки информации из-за побочных электромагнитных излучений персонального компьютера // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 66–77.
4. *Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Динамическое форматирование структурных объектов хранилищ данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2008. № 4. С. 28–33.
5. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* О формировании доверенной среды серверных систем у правления базами данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2008. № 3. С. 23–27.

6. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Математические модели стохастического формирования изоморфных представлений структурных элементов данных в ЭВМ // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 29–41.

7. *Сотов Л. С., Соболев С. С., Харин В. Н.* Кросс-кластерная коммутационная матрица для аппаратной поддержки управляемой перестановки данных в криптографических системах // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2009. № 4. С. 56–63.

8. *Сотов Л. С., Ачкасов В. Н.* Универсальный модуль манипуляции битами данных в микропроцессорах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 11 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 57–73.

9. *Назаров С. И., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Проектирование микропроцессора с расширенным набором команд манипуляции битами данных на базе архитектуры *OPENRISC1200* // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности С. 50–65.

10. *Назаров С. И., Сотов Л. С., Ляшенко А. В.* Процессор с улучшенной манипуляцией битами данных для средств навигации, обработки сигналов и изображений, криптографии, мобильных диагностических устройств // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 51–63.

11. *Сотов Л. С.* Методы синтеза устройств, выполняющих инструкции перестановки битов данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 25–50.

12. *Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Алгоритм работы и модель функционального генератора перестановок // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 41–46.

13. *Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Устройство функционального генератора перестановок // Моделирование систем и процессов. 2011. № 1–2. С. 59–64.

14. *Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Средства разработки и исследования архитектурных моделей в сапр System Studio : в 2 ч. Ч. 1 : Использование инструментов system studio при моделировании матричного генератора перестановок // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 5 : Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники. С. 121–145.

15. Пат. 2395834 Российская Федерация, МПК G 06 F 7/58. Генератор случайных перестановок / заявители Сотов Л. С., Харин В. Н., Хвалин А. Л. ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2009104555/09 ; заявл. 12.02.2009 ; опубл. 27.07.2010.

16. Пат. 2340931 С1 Российская Федерация, МПК G 06 F 7/58, H 03 K 3/84. Генератор случайных чисел / заявители Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2007111405/09 ; заявл. 28.03.2007 ; опубл. 10.12.2008.

17. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Стохастические генераторы упорядоченных разбиений конечных множеств с быстрым ростом энтропии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 57–72.

18. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Простой матричный формирователь r -выборок // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Экономика. Методические аспекты физического образования. С. 47–56.

19. *Сотов Л. С.* Комбинаторная модель функционального формирователя разбиений бинарного множества // Информационные технологии. 2010. № 10. С. 46–52.

20. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Модели аппаратных функциональных формирователей перестановок // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 10. С. 78–84.

УДК 621.382.3

МОЩНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ (анализ патентной документации)

Л. Л. Страхова, А. Л. Хвалин, Л. С. Сотов

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: Strakhovall@mail.ru

В статье приведены результаты патентных исследований в области разработки, использования и улучшения характеристик высокочастотных усилителей мощности.

Ключевые слова: усилитель мощности, делитель/сумматор мощности, микрополосковая линия передачи, температурная стабилизация усиления.

Powerful high-frequency Transistor Amplifiers (Analysis of patent documentation)

L. L. Strakhova, A. L. Khvalin, L. S. Sotov

The results of patent research in the development, use and improvement of the characteristics of high-frequency power amplifiers are given in the article.

Key words: power amplifier, divider/combiner power, microstrip transmission line, temperature strengthening stabilizatsya.

Для ряда радиотехнических систем актуальной является задача получения больших значений мощности в широкой полосе частот. Используемые с этой целью усилители мощности определяют важнейшие тактико-технические параметры радиотехнической системы: излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надежность и стоимость.

Для получения большой выходной мощности, как правило, используется несколько идентичных усилителей с последующим суммированием мощности при помощи суммирующих схем с малыми потерями. Сложность построения усилителей мощности в едином корпусе обусловлена большим числом каналов суммирования, температурными изменениями основных характеристик усилителей и трудностями их настройки.

Предметом патентных исследований являются разработка и улучшение характеристик мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов и усилителей на их основе [1–9], способы осуществления температурной компенсации в схемах транзисторных усилителей.

Для анализа по данному направлению отобран 31 патент [10–40]. Распределение патентов по странам-заявителям представлено в табл. 1, а по годам опубликования – в табл. 2.

Таблица 1

Распределение патентов по странам-заявителям

Страна	Россия	США	Китай	Тайвань	Япония	Корея	Аргентина	ЕПВ	ПСТ
Количество патентов	17	1	2	1	4	2	1	1	2

Таблица 2

Распределение патентов по годам опубликования

Год	2015	2014	2011	2010	2009	2008
Количество патентов	1	3	5	4	3	2
Год	2007	2005	2004	2002	2001	1999
Количество патентов	1	2	4	2	2	2

Проведенные патентные исследования показали, что по разработке и улучшению характеристик мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов и усилителей на их основе, по способам осуществления температурной компенсации в схемах транзисторных усилителей наиболее интенсивно ведется работа в России (17 патентов) и в Японии (4 патента). Наибольшее количество патентов (29 из 31) по этой тематике опубликовано в период 2000–2015 гг.

Ведущими фирмами за рубежом по разработке и улучшению характеристик мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов и усилителей на их основе, по способам осуществления температурной компенсации в схемах транзисторных усилителей являются: HITACHI LTD [JP], NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE [JP], PHYCHIPS INC [KR], TOSHIBA CORP [KR], EADS DEUTSCHLAND GMBH [DE], ZYW MICROELECTRONICS INC YU ZHENGMING [CN], SHENZHEN BOHAI COMM TECHNOLOGY CO LTD [CN], SKYWORKS SOLUTIONS INC [US], RDA MICROELECTRONICS SHANGHAI [CN], САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО, ЛТД (KR), MITSUBISHI ELECTRIC CORP [JP], QUALCOMM INC [US].

Наиболее активные исследования ведутся в фирмах TOSHIBA CORP [KR] (3 патента) и SKYWORKS SOLUTIONS INC [US] (2 патента).

В России разработки по этой тематике ведутся в ООО «Научно-производственная фирма "Радиокомпоненты"», научно-производственном предприятии «Пульсар», Воронежском государственном университете, Новосибирском государственном техническом университете, Военной академии связи.

Наиболее интенсивные исследования ведутся в Воронежском государственном университете (11 патентов из 31).

Изобретения, предложенные в патентах [10–26], касаются разработки и усовершенствования мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов и мощных усилителей на их основе.

В патенте RU 2173932 [11] предложен мощный n -канальный усилитель СВЧ, в котором наряду с увеличением выходной мощности путем сложения выходных мощностей n усилителей мощности в общей нагрузке достигается увеличение коэффициента усиления за счет неоднократной (более двух раз) передачи сигнала через усилители мощности. При этом сохраняется устойчивость СВЧ-усилителя при его работе с несогласованной нагрузкой и (или) источником входного сигнала.

Схема СВЧ-усилителя при $n = 2^k = 8$, где $k = 3$ (количество рядов) и $p = 4$ (количество передач сигнала через активные элементы усилителей мощности), представлена на рис. 1. Усилитель СВЧ содержит $n = 8$ идентичных усилителей мощности 1, делитель мощности 2, сумматор мощности 3 и балластные резисторы 4. Делитель и сумматор образованы квадратурными мостами 5, выполненными в виде 3-децибельных направленных ответвителей на связанных линиях. Мосты 5 в делителе и сумматоре расположены в $k = 3$ рядах по 4 моста в ряду. Выходы 6 мостов третьего ряда делителя 2 и входы 7 мостов первого ряда сумматора 3 образуют соответственно выходы делителя и входы сумматора, между которыми включены усилители мощности 1. Входы мостов первого ряда делителя 2 образуют его входы 8–15, а выходы мостов третьего ряда сумматора 3 – выходы 16–23.

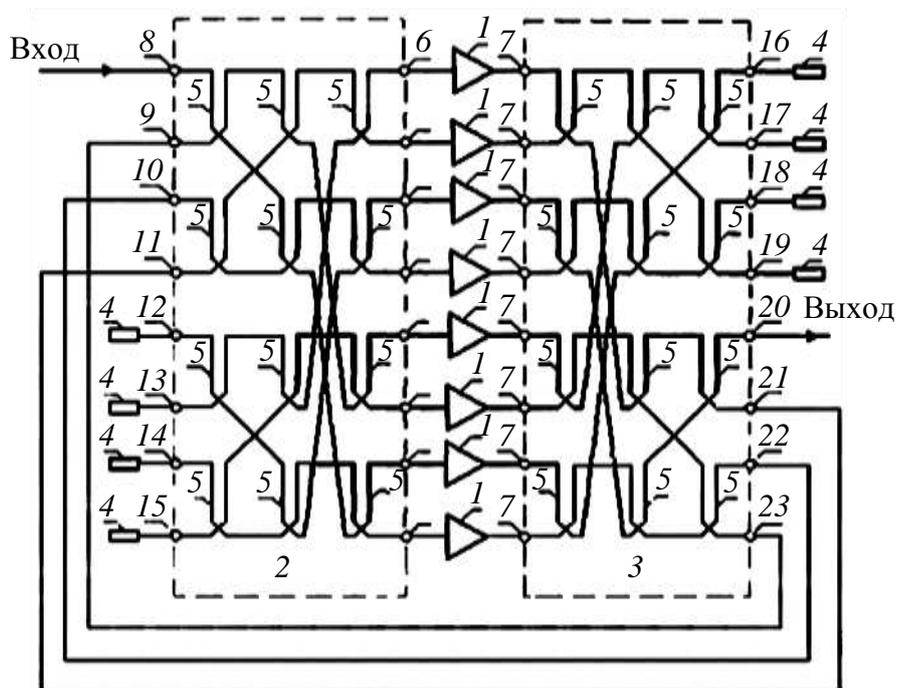


Рис. 1. Схема n -канального мощного СВЧ-усилителя

Выходы мостов i -го ряда, где $i = 1, 2$, в делителе соединены с входами мостов $(i + 1)$ -го ряда по матричной схеме Батлера: один выход j -го моста

($j = 1, 2, \dots, 0,5n$) i -го ряда соединен с входом j -го же моста ($i + 1$)-го ряда, второй выход j -го моста первого ряда соединен с входом ($j + 1$)-го при $j = 1, 3$ или ($j - 1$)-го при $j = 2, 4$ моста второго ряда, а второй выход j -го моста второго ряда – с входом ($j + 2$)-го при $j = 1, 2$ или ($j - 2$)-го при $j = 3, 4$ моста третьего ряда. При этом длина соединительных отрезков линии передачи, например коаксиального кабеля, выбрана одинаковой для всех отрезков. Сумматор идентичен делителю, но включен зеркально симметрично делителю.

В схеме, представленной на рис. 1, входам 8, 9, ..., 15 делителя 2 в сумматоре 3 соответствуют выходы 23, 22, ..., 16, а число p выбрано равным 4. При этом m_1, m_2, m_3 и m_4 входы делителя 2 – это его первый–четвертый входы (8, 9, 10 и 11). Вход 8 делителя 2 является входом усилителя СВЧ, три других его входа (9, 10 и 11) соединены соответственно с выходами 23, 22 и 21 сумматора 3. Длина соединительных отрезков линии передачи, например коаксиального кабеля, может быть произвольной, одинаковой для всех отрезков. Выход 20 сумматора 3 является выходом усилителя СВЧ. Подчеркнем, что соответственными являются входы 8, 9, 10, 11 делителя 2 и выходы 23, 22, 21, 20 сумматора 3. К оставшимся пятому–восьмому входам 12, 13, 14 и 15 делителя 2 и первому–четвертому выходам 16, 17, 18 и 19 сумматора 3 подключены балластные резисторы 4.

Таким образом, предложенный усилитель СВЧ позволяет увеличить модуль коэффициента передачи (усиления) устройства за счет p -кратной передачи сигнала через активные элементы усилителей мощности. Число циклов усиления может быть выбрано в пределах $2 \cong p \cong 0,5n$. В линейном режиме работы усилителей мощности модуль коэффициента передачи достигает величины $|K|^p$, что в $|K|^{p-1}$ раз больше, чем у усилителя СВЧ, принятого за прототип, в котором модуль коэффициента передачи тот же, что и у каждого из усилителей мощности, и равен $|K|$. В нелинейном режиме больших сигналов, когда по мере роста амплитуды уменьшается модуль коэффициента передачи усилителей мощности, выигрыш в коэффициенте усиления получается меньшим. Однако и в этом случае p циклов усиления позволяет резко снизить величину мощности на входе усилителя СВЧ, необходимую для возбуждения активных элементов усилителей мощности.

Задачей изобретения, представленного в патенте RU 2177205 [12], является создание объединенного линейного устройства усиления мощности, включающего в себя делитель мощности, множество линейных усилителей мощности, сумматор мощности и устройство для диагностики индивидуального состояния каждого из линейных усилителей мощности. После обнаружения состояния отказа одного из усилителей выполняются следующие этапы: отключение линейного усилителя, для которого обнаружено состояние отказа; равномерное распределение мощности, которая в противном случае подавалась бы на вышедший из строя линейный усилитель мощности, между работающими линейными усилителями мощности; получение стабильной выходной мощности этих усилителей.

Для решения поставленной задачи в настоящем изобретении один из вариантов осуществления устройства объединенного линейного усиления мощности содержит модуль делителя мощности, который имеет каналы, подсоединенные соответственно между одним входным выводом и множеством выходных выводов, и коммутаторы, соединенные соответственно с каждым выходным выводом, для деления мощности входного радиочастотного (РЧ) сигнала и выдачи разделенной мощности на выходные выходы; модуль сумматора мощности, который имеет каналы, подсоединенные соответственно между множеством входных выводов и одним выходным выводом, и коммутаторы, соединенные соответственно с каждым входным выводом, для объединения мощности входного РЧ-сигнала и выдачи суммарной мощности; множество линейных усилителей мощности, которые соответственно подсоединены между выходными выводами модуля делителя мощности и входными выводами модуля сумматора мощности, для линейного усиления мощности РЧ-сигнала, разделенной в модуле делителя мощности, и для выдачи линейно усиленного сигнала на модуль сумматора мощности. В случае возникновения отказа одного из линейных усилителей мощности отключается канал, связанный с указанным усилителем мощности, посредством коммутаторов в модуле сумматора мощности и в модуле делителя мощности.

Блок-схема возможного варианта осуществления объединенного устройства линейного усиления мощности, соответствующего данному изобретению, для суммирования сигналов с выходов четырех линейных усилителей мощности представлена на рис. 2.

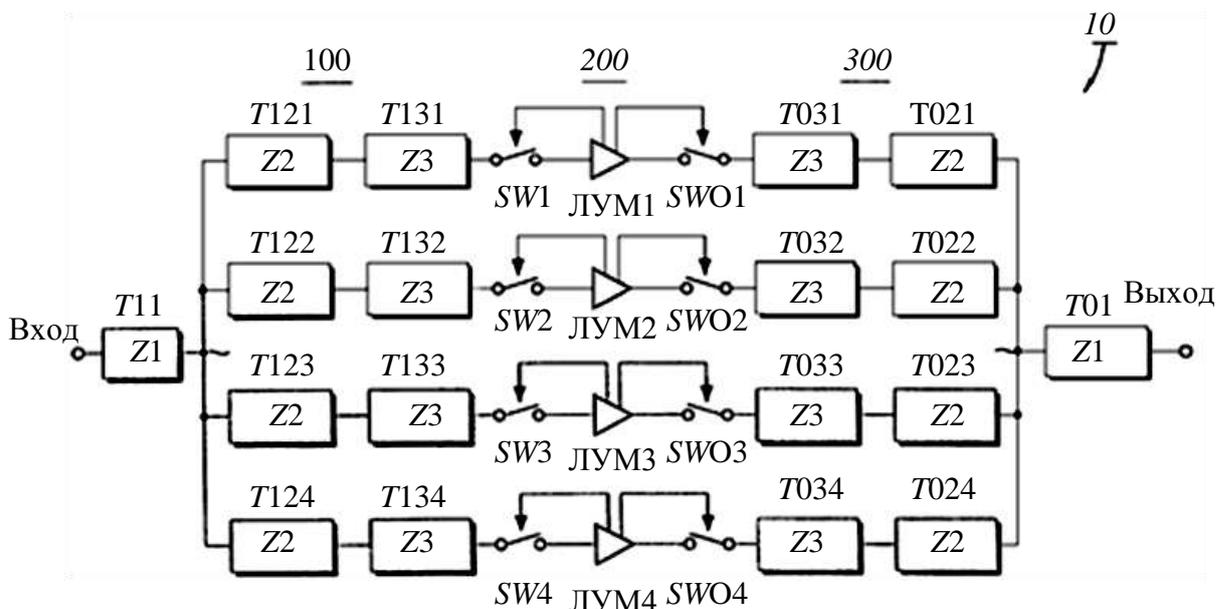


Рис. 2. Блок-схема объединенного устройства линейного усиления мощности для суммирования выходов четырех линейных усилителей мощности

Объединенное устройство 10 линейного усиления мощности содержит модуль 100 делителя мощности, модуль 200 линейных усилителей мощности (ЛУМ), связанный с модулем 100 делителя мощности, для усиления каждого из соответствующих РЧ-сигналов, модуль 300 сумматора мощности, связанный с модулем 200 усилителей, для суммирования и выдачи на выход выходных сигналов модуля 200 ЛУМ.

Линейные усилители мощности выполнены с системой линеаризации, а также содержат детекторы для обнаружения состояния отказа и обеспечивают управление переключением РЧ-коммутаторов в модулях делителя и сумматора мощности после обнаружения состояния отказа. Детекторы включают в себя:

- детектор высокой температуры, содержащий датчик температуры для обнаружения состояния отказа, обусловленного высокой температурой;
- детектор коэффициента стоячей волны (КСВ) для обнаружения состояния отказа, связанного с полученным значением КСВ;
- детектор отказа источника питания для обнаружения состояния отказа источника питания, если мощность питания превышает установленный диапазон мощности;
- детектор отказа контура компенсации для детектирования состояния отказа контура, если РЧ-сигнал с выхода компенсатора РЧ-сигнала имеет повышенное значение в установленное время;
- детектор пониженной мощности для обнаружения состояния отказа, связанного с пониженной мощностью, если указанная мощность падает ниже установленного значения.

Каждый из ЛУМ1–ЛУМ4 выполняет проверку их рабочего состояния с регулярными интервалами времени. Если обнаружен отказ в одном из ЛУМ1–ЛУМ4, то соответствующий входной SWI_n и выходной SWO_n коммутаторы размыкаются, причем если один из РЧ-коммутаторов выключается, то соответствующий РЧ-сигнал отражается назад к общей входной либо выходной точке.

Характеристический импеданс канала передачи $T11$ равен $Z1$, характеристические импедансы каналов передачи $T121$ – $T124$ равны друг другу и равны $Z2$, а характеристические импедансы каналов передачи $T131$ – $T134$ равны друг другу и равны $Z3$. Кроме того, все каналы передачи $T11$, $T121$ – $T124$, $T131$ – $T134$ модуля 100 делителя мощности являются четвертьволновыми ($\lambda/4$) и могут быть выполнены как микрополосковые линии на тефлоновой подложке.

Коммутаторы $SW1$ – $SW4$, функционирующие как РЧ-переключатели, могут представлять собой коммутаторы модели «*MMS-12-F-PC*», выпускаемые компанией *K & L Co., Ltd* (США).

Характеристический импеданс линии передачи $T01$ равен $Z1$, характеристические импедансы каналов передачи $T021$ – $T024$ равны друг другу и равны $Z2$, а характеристические импедансы каналов передачи $T031$ – $T034$

равны друг другу и равны Z_3 . Кроме того, все каналы передачи T_{01} , T_{021} – T_{024} , T_{031} – T_{034} модуля 300 делителя мощности являются четвертьволновыми ($\lambda/4$) и могут быть выполнены как микрополосковые линии на тефлоновой подложке. Коммутаторы SW_{01} – SW_{04} , функционирующие как РЧ-переключатели, могут представлять собой коммутаторы модели «*MMS-12-F-PC*», выпускаемые компанией *K & L Co., Ltd* (США).

Характеристические импедансы каждой микрополосковой линии установлены в соответствии с соотношением $Z_3 \geq Z_2 \geq Z_1$.

Патенты [27–40] посвящены способам осуществления температурной компенсации в схемах транзисторных усилителей.

В патенте WO2011026293 [33] предложена схема температурной компенсации для усилителя мощности. Функциональная блок-схема электрической цепи компенсации температуры для усилителя мощности представлена на рис. 3.

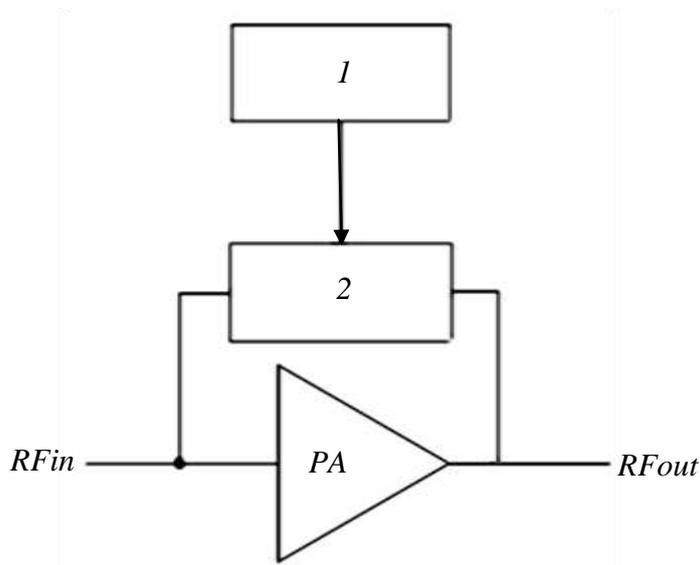


Рис. 3. Функциональная блок-схема электрической цепи компенсации температуры для усилителя мощности

Блок-схема включает цепь обратной связи (2) и цепь управления (1). Управляющий сигнал, регулируемый в зависимости от изменения температуры усилителя мощности PA , генерируется цепью управления (1), чтобы регулировать обратную связь схемы обратной связи (2). Схема обратной связи (2) присоединена между входным терминалом (RF_{in}) и выходным терминалом (RF_{out}) усилителя мощности. Схема компенсации температуры может уменьшить девиацию усиления усилителя мощности, когда температура усилителя мощности изменена, и сохранять характеристики усилителя мощности. Принципиальные электрические схемы различных оптимизированных вариантов реализации электрической схемы температурной компенсации представлены на рис. 4, 5.

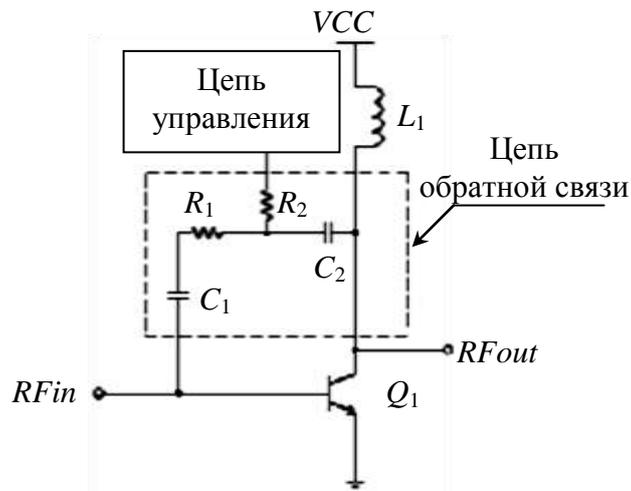


Рис. 4. Один из вариантов реализации электрической схемы температурной компенсации

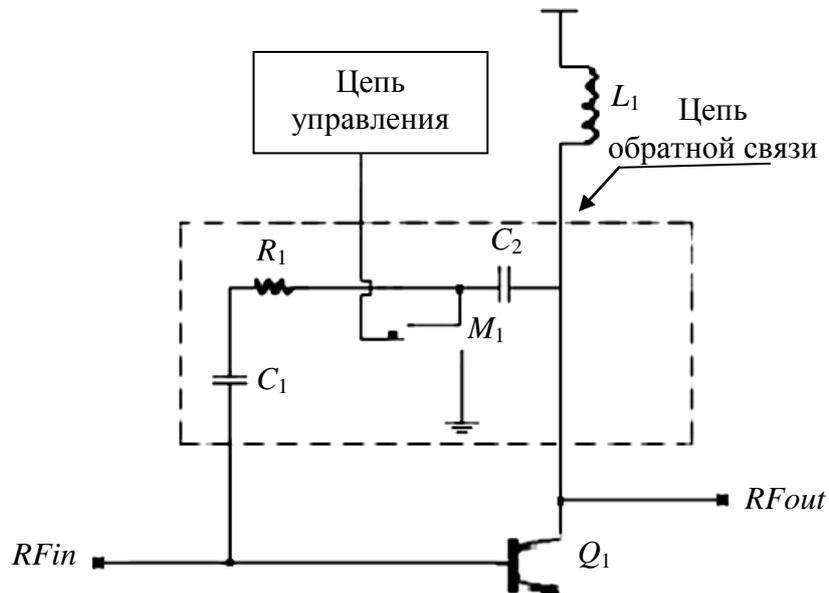


Рис. 5. Другой вариант реализации электрической схемы температурной компенсации

Зависимость от температуры коэффициента усиления по мощности в диапазоне изменения температур от -20 до $+80^{\circ}\text{C}$ представлена на рис. 6 (сплошная линия – без температурной компенсации, пунктирная – с температурной компенсацией в соответствии с данным изобретением).

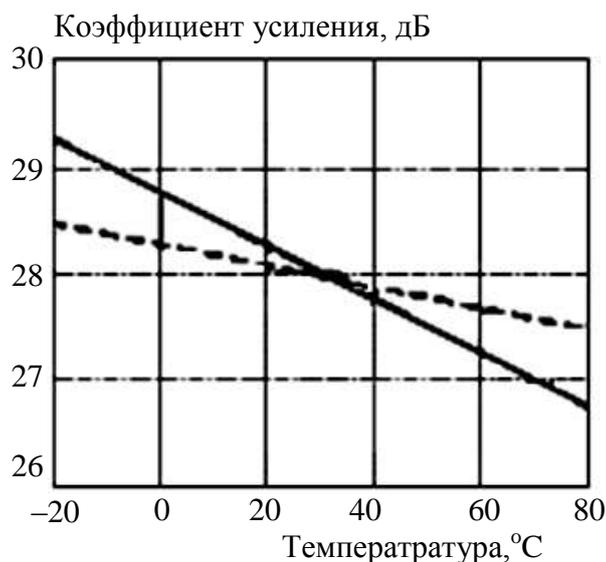


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления от температуры

Целью изобретения, предлагаемого в патенте RU 2369956 [37], является обеспечение низкого уровня нелинейных искажений усилителя мощности в широкой полосе частот, уменьшение неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) до 0,25 дБ и температурной стабилизации усиления. Блок-схема усилителя мощности представлена на рис. 7

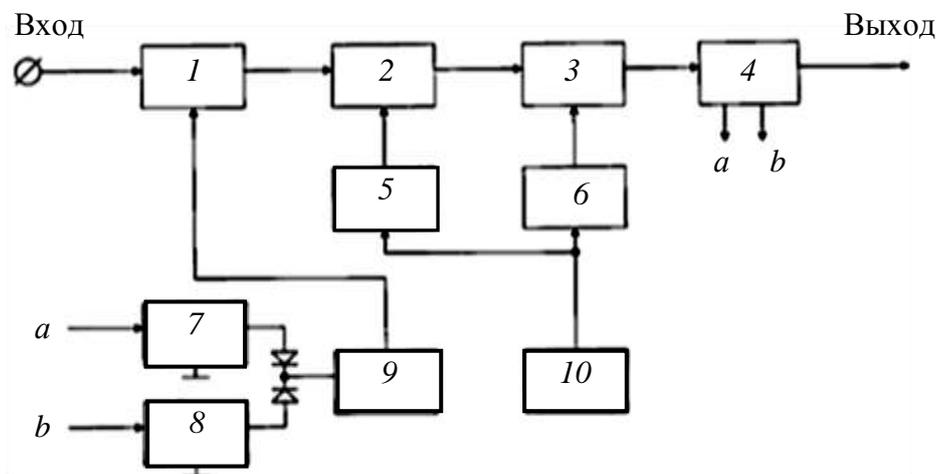


Рис. 7. Схема заявляемого усилителя мощности

Высокочастотный сигнал подается на вход усилителя мощности и поступает на блок 1 автоматической регулировки усиления (АРУ). Введение схемы местного АРУ позволило обеспечить малую неравномерность амплитудно-частотной характеристики усилителя мощности (до 0,25 дБ), а также возможность работы при КСВ вплоть до 2,0. Далее ВЧ-сигнал поступает на предварительный каскад 2 усилителя мощности, затем на окончательный каскад 3 и на фильтр гармоник 4, который содержит токовые датчики, сигналы с которых поступают на схему автоматики. Схема автоматики со-

стоит из детектора 7 падающей волны, детектора 8 отраженной волны и формирователя 9 напряжения управления АРУ. Величина напряжения управления АРУ определяется тем, какой по величине и с какого токового датчика сигнал поступает на схему автоматики. Если сигнал с токового датчика падающей волны увеличивается (уменьшается), что, в свою очередь, соответствует увеличению (уменьшению) сигнала на выходе УМ, то напряжение управления будет иметь такую величину, что схема блока 1 АРУ будет менять свой коэффициент передачи в меньшую (в большую) сторону соответственно. Большой уровень сигнала с токового датчика отраженной волны означает разомкнутое (ХХ) или короткозамкнутое (КЗ) состояние на выходе усилителя мощности. В этом случае схема автоматики жестко ограничивает коэффициент передачи схемы блока 1 АРУ. Так осуществляется регулировка усиления и работа усилителя мощности в режимах КЗ и ХХ на выходе.

В усилителе мощности применена схема смещения напряжений с температурной стабилизацией блоком 5 смещения напряжения транзисторов предварительного каскада 2 и блоком 6 смещения напряжения транзисторов окончательного каскада 3. В качестве датчиков температуры были применены диоды, включенные в обратные связи соответствующих операционных усилителей. Применение подобной схемы и расположение самих датчиков температуры позволили достаточно точно компенсировать температурную нестабильность рабочей точки транзисторов.

Одновременно в схемах смещения напряжений предусмотрен сигнал блокировки при перегреве. Схема защиты усилителя мощности от перегрева представляет собой компаратор с переменным порогом срабатывания, находящийся в блоке 10 контроля температуры и зависящий от транзисторного датчика температуры. При увеличении температуры выше нормы компаратор вырабатывает сигнал блокировки, который поступает на схемы напряжения смещения. В результате напряжения смещения будут равны нулю. При достижении усилителем мощности нормальной температуры сигнал блокировки будет снят и напряжения смещения восстановлены. Переменный порог срабатывания обеспечивает блокировку напряжения смещения при высокой температуре, а разблокировку – при низкой. Такой режим хорошо сочетается с принудительным охлаждением, в данном случае, вентиляторами.

Таким комплексным решением задачи достигается технический результат – обеспечивается низкий уровень нелинейных искажений усилителя мощности в широкой полосе частот, неравномерность АЧХ в пределах 0,25 дБ, улучшается температурная стабилизация усиления и осуществляется защита транзисторов от перегрева.

В патенте JP 2011182379 (US 8 183 927) [30] согласно одному из варианту осуществления усилитель мощности включает в себя переменный аттенуатор, расположенный во входном каскаде для регулировки уровня входного сигнала, множество транзисторов, включенных каскадно на выходе этого регулируемого аттенуатора, датчики температуры, расположен-

ные в непосредственной близости от двух или более транзисторов для определения температуры, и контроллер, в котором рассчитывается величина изменения коэффициента усиления множества транзисторов по результатам измерения температуры, полученным индивидуально от датчиков температуры. Контроллер управляет переменным аттенюатором таким образом, чтобы регулировать уровень входного сигнала для уменьшения изменения коэффициента усиления. Таким образом, коэффициент усиления, который, как правило, зависит от изменения температуры, может быть стабилизирован.

Блок-схема усилителя мощности в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящего изобретения представлена на рис. 8.

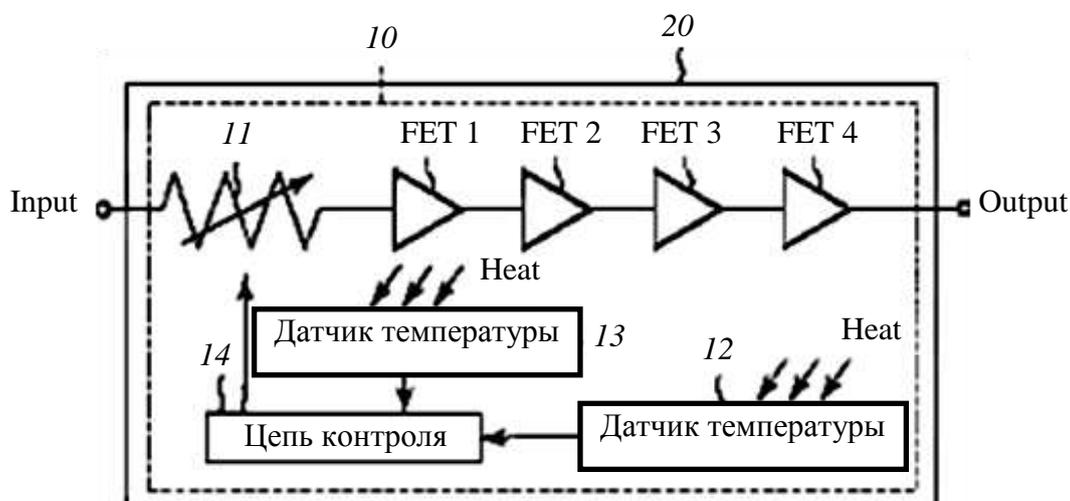


Рис. 8. Блок-схема усилителя мощности в соответствии с одним вариантом осуществления настоящего изобретения [30]

Усилитель мощности 10 выполнен на устройстве охлаждения (радиатора) 20 и включает в себя переменный аттенюатор 11, четыре полевых транзистора (ПТ) (FET 1, FET 2, FET 3, FET 4), датчики температуры 12, 13 и схему управления 14. Входной сигнал, который поступает от входного терминала, подается на FET 1 через регулируемый аттенюатор 11. Полевые транзисторы могут быть сделаны из арсенида галлия и расположены каскадно (см. рис. 8). Входной сигнал усиливается этими полевыми транзисторами, чтобы увеличить мощность передачи, и выводится через выходной разъем. Пример использования четырех полевых транзисторов показан на рис. 8, но количество транзисторов этим числом не ограничивается. Каскадное соединение может частично включать параллельное подключение полевых транзисторов. Датчик температуры 12 находится в непосредственной близости от FET 4, который расположен на выходе каскада для определения температуры FET 4. Информация об определенной температуре передается на схему управления 14. Кроме того, температурный датчик 13

располагается в непосредственной близости от FET 1, который находится на входе каскада, для определения температуры FET 1. Информация об определенной температуре передается на схему управления 14. В качестве примера на рис. 8 показаны два датчика температуры, но между FET 1 и FET 4 может располагаться большее количество датчиков. Информация о температуре, определенной каждым температурным датчиком, посылается схеме управления 14, которая управляет регулируемым аттенюатором 11 на основании результатов измерения температуры, полученных от датчиков температуры 12 и 13, и тем самым компенсирует изменение усиления ΔG усилителя мощности 10.

Температурный градиент коэффициента усиления арсенида галлия FET широко известен как 0,015 [дБ/°C]. Усиление арсенида галлия FET, следовательно, увеличивается при понижении температуры и уменьшается при повышении температуры. Полевые транзисторы, образованные из кристалла кремния и нитрида галлия, обладают сходными температурными свойствами.

Изменение усиления ΔG полевых транзисторов, соединенных каскадно (см. рис. 8), в целом можно выразить уравнением

$$\Delta G [\text{дБ}] = 0,015 [\text{дБ}/^\circ\text{C}] \times \Delta t [^\circ\text{C}] \times X,$$

где X – число стадий в каскаде; Δt – изменение температуры. Например, когда каскадное соединение включает в себя 10 транзисторов из арсенида галлия, соединенных каскадно, и температура изменяется от -20 до 60°C , изменение усиления равно 12 дБ.

Целью изобретения, представленного в патенте JP 2011035446 [31], является миниатюризация устройства усилителя мощности высокой частоты за счет уменьшения количества терминалов, предусмотренных на поверхности блока. Усилительное устройство мощности высокой частоты представлено на рис. 9.

Поставленная цель достигается тем, что усилительное устройство мощности высокой частоты имеет блок, включающий в себя усилительную цепь 11, цепь температурной компенсации 13 и выходную цепь детектирования 12, в котором входной терминал 19 схемы усилителя 11 соединен с входным высокочастотным терминалом 15, представленным на поверхности блока, входная цепь 25 схемы температурной компенсации 13 также подключена к входному высокочастотному терминалу 15 через первый резистор 26. Кроме того, выходной терминал 20 усилительной цепи 11 подключен к выходному высокочастотному терминалу 16, предусмотренному на поверхности блока, входной терминал смещения 30 на выходе схемы детектирования 12 соединен с выходным высокочастотным терминалом 16 через второй резистор 31.

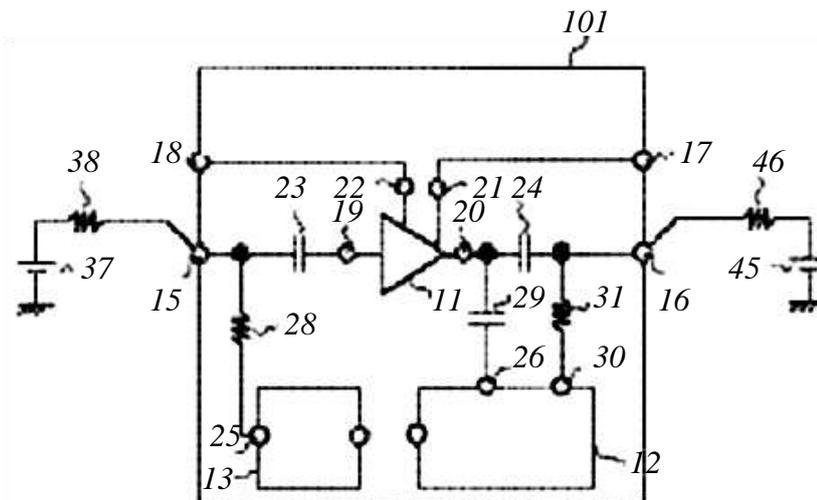


Рис. 9. Усилительное устройство мощности высокой частоты [31]

Таким образом, проведенные патентные исследования по отечественным и зарубежным источникам показывают, что в последнее время разработчики мощных транзисторных усилителей большое внимание уделяют следующим вопросам: увеличение выходной мощности и коэффициента усиления, повышение устойчивости работы усилителей СВЧ при несогласованности по входу и выходу, разработка принципиальных электрических схем температурной компенсации коэффициента усиления, обеспечение низкого уровня нелинейных искажений и уменьшение неравномерности АЧХ в широком диапазоне частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хвалин А. Л., Васильев А. В. Оптимальный синтез характеристик транзисторного усилителя УВЧ-диапазона в интегральном исполнении // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 10. С. 29–33.
2. Хвалин А. Л. Векторный магнитометр слабых магнитных полей // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 45–48.
3. Хвалин А. Л. Физические принципы моделирования полевых транзисторов в УВЧ-диапазоне // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 59–67.
4. Хвалин А. Л., Овчинников С. В., Сотов Л. С., Самолданов В. Н. Первичный преобразователь на основе ЖИГ-генератора для измерения сильных магнитных полей // Датчики и системы. 2009. № 10. С. 57–58.
5. Хвалин А. Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара : Поволжская гос. акад. телекоммуникаций и информатики, 2014. 32 с.

6. Хвалин А. Л., Страхова Л. Л., Воробьев А. В. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора по его экспериментальным характеристикам // Радиотехника. 2015. № 7. С. 35–40.

7. Игнатьев А. А., Страхова Л. Л., Кудрявцева С. П., Хвалин А. Л. Патентные исследования по разработке высокочастотных транзисторов, магнитотранзисторов и устройств на их основе // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 85–104.

8. Игнатьев А. А., Страхова Л. Л., Куликов М. Н., Кудрявцева С. П., Сложеникин К. А. ЖИГ генераторы с микрорезонаторами на эпитаксиальных пленочных структурах ферритов (анализ патентной документации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 74–84.

9. Игнатьев А. А., Страхова Л. Л., Куликов М. Н., Хвалин А. Л., Сиротинина Т. Н., Кудрявцева С. П. Магнитоуправляемые высокочастотные устройства с резонаторами на ЖИГ сферах (анализ патентной документации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2009. Вып. 7 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 112–135.

10. Пат. 2192692 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощный широкополосный ВЧ и СВЧ транзистор / заявители Воронеж. гос. ун-т, Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2001106737/28 ; заявл. 11.03.2001 ; опубл. 10.11.2002.

11. Пат. 2190899 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощный ВЧ и СВЧ транзистор / заявители Воронеж. гос. ун-т, Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2001106586/28 ; заявл. 11.03.2001 ; опубл. 10.10.2002.

12. Пат. 2308120 Российская Федерация, МПК H01L29/72. Мощный биполярный СВЧ транзистор / заявители Аронов В. Л., Евстигнеев Д. А. ; патентообладатель научно-производственное предприятие «Пульсар». – № 2006100044/28 ; заявл. 10.01.2006 ; опубл. 10.10.2007.

13. Пат. 2328057 Российская Федерация, МПК H01L29/72. Мощный ВЧ- и СВЧ-балансный транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2006146580/28 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 27.06.2008.

14. Пат. 2328058 Российская Федерация, МПК H01L29/72 (2006.01). Мощный ВЧ- и СВЧ-транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2006146581/28 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 27.06.2008.

15. Пат. 2402836 Российская Федерация, МПК H01L29/72. Мощный ВЧ- и СВЧ широкополосный транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К., Лупандин В. В., Петров С. А. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2009130144/28 ; заявл. 05.08.2009 ; опубл. 27.10.2010.

16. Пат. 2403650 Российская Федерация, МПК H01L29/72. Мощный ВЧ- и СВЧ-транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К., Лупандин В. В. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2009132059/28 ; заявл. 05.08.2009 ; опубл. 10.11.2010.

17. Пат. 2403651 Российская Федерация, МПК H01L29/72. Мощная высокочастотная транзисторная структура / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К., Петров С. А. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2009132071/28 ; заявл. 25.08.2009 ; опубл. 10.11.2010.

18. Пат. 2253924 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощный СВЧ-транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2003132889/28 ; заявл. 11.11.2003 ; опубл. 10.06.2005.

19. Пат. 2251175 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощный биполярный СВЧ-транзистор / заявители Аронов В. Л., Диковский В. И., Евстигнеев А. С., Евстигнеев Д. А. ; патентообладатель научно-производственное предприятие «Пульсар». – № 2003123545/28 ; заявл. 30.07.2003 ; опубл. 27.04.2005.

20. Пат. 2173932 Российская Федерация, МПК⁷ H03F3/60, H03F3/68. Усилитель СВЧ / заявители Новосиб. гос. техн. ун-т, Васильев В. В. ; патентообладатель Новосиб. гос. техн. ун-т. – № 99122804/09 ; заявл. 01.11.1999 ; опубл. 20.09.2001.

21. Пат. 2177205 Российская Федерация, МПК⁷ H03F3/68, H03F3/20. Устройство и способ объединенного линейного усиления мощности / заявители САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО, ЛТД (KR), Парк Джонг Тае (KR), Ли Янг Кон (KR), Ким Хонг Ки (KR), Ким Янг (KR), Чунг Сеунг Вон (KR), Ли Сеонг Хоон (KR), Джеонг Соон Чул (KR), Ким Чул Донг (KR), Чанг Ик Соо (KR) ; патентообладатель САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО., ЛТД. (KR). – № 99116366/09 ; заявл. 29.12.1997 ; опубл. 20.12.2001.

22. Пат. 2137288 Российская Федерация, МПК⁶ H03F3/60. Усилитель с распределенным усилением / заявители Военная академия связи, Вихарев Е. В., Постюшков В. П., Постюшков М. В. ; патентообладатель Военная академия связи. – № 98104057/09 ; заявл. 18.02.1998 ; опубл. 10.09.1999.

23. Пат. 2015029486 (A1) WO, МПК H03F3/189; H03F3/21; H03F3/60; H03F3/68. High frequency power amplifier / заявители Imai Shohei [JP], Otsuka Hiroshi [JP], Yamanaka KOJI [JP], Maehara Hiroaki [JP], Koynagi Motoyoshi [JP], Ota Akira [JP] ; патентообладатель MITSUBISHI ELECTRIC CORP [JP]. – № WO2014JP60191 ; заявл. 08.04.2014 ; опубл. 05.03.2015.

24. Пат. 2014197829 (A) Япония, МПК H01P5/18; H03F3/24; H03F3/60. Power amplification device and transmitter / заявитель Satomi Akihiro ; патентообладатель TOSHIBA CORP. – № JP20130203995 ; заявл. 30.09.2013 ; опубл. 16.10.2014.

25. Пат. 005313 Аргентина, МПК H03F1/02, H03F1/32, H03F3/60, H03F3/68, H03F3/72, H03F99/00, H03G3/02, H03G3/30, H04B1/04, H04B7/26, H04J13/00. Efficient parallel-stage power amplifier / патентообладатель QUALCOMM INC [US]. – № AR1996P105941 ; заявл. 27.12.1996 ; опубл. 28.04.1999.

26. Пат. 2014347136 (A1) США, МПК H03F 3/195. Apparatus and methods for radio frequency amplifiers / заявитель Ake Alan William [US], Dening David C [US] ; патентообладатель SKYWORKS SOLUTIONS INC [US]. № US201414457965 ; заявл. 12.08.2014 ; опубл. 27.11.2014.

27. Пат. 200405475 (A) Тайвань, МПК H01L21/331, H01L29/06, H01L29/423, H01L29/737, H03F1/30, H03F3/19. Semiconductor device and the manufacturing /method thereof, and the power amplifier / заявители Kusano Chushiro [JP], Tanoue Tomonori Ohbu Isao [JP], Masami [JP], Mochizuki Kazuhiro [JP], Kurokawa Atsushi Umemoto Yasunari [JP], Hidetoshi Matsumoto Ohnishi [JP] ; патентообладатель HITACHI LTD [JP]. – № TW20030108235 ; заявл. 10.04.2003 ; опубл. 01.04.2004.

28. Пат. 2014135672 (A) Япония, МПК H03F1/30, H03F3/24, H03F3/60, H04B1/04, H05K7/20. Millimetric wave radio appartus / заявители Takeuchi Atsushi, Hirata Akihiko, Takahashi Hiroyuki, Kukutsu N. ; патентообладатель NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE. – № JP20130003421 ; заявл. 11. 01 2013 ; опубл. 24.07.2014.

29. Пат. 20110081414 (A) Корея, МПК G05F1/567. Circuit for temperature and process compensation / заявители Kim Young Sik [KR], Lee Jae Heon Kim Young Sik [KR] ; патентообладатель PHUCHIPS INC [KR]. – № KR20100001561 ; заявл. 08.01.2010 ; опубл.14.07.2011.

30. Пат. 2011182379 (А) Япония, МПК H03F1/30, H03F3/24. Power amplifier / заявитель Mochizuki A. ;_патентообладатель TOSHIBA CORP. – № JP20100167470 ; заявл. 26.07.2010 ; опубл. 15.09.2011.

31. Пат. 2011035446 (А) Япония, МПК H03F1/30, H03F3/24. High-frequency power amplifier apparatus / заявитель Senju T. ; патентообладатель TOSHIBA CORP. – № JP20090176707 ; заявл. 29.07.2009 ; опубл. 17.02.2011.

32. Пат. 2346162 (A1) ЕПВ, МПК H03F1/30, H03F3/189. Method and device for compensating amplification variations in an amplifier circuit / заявители Schroth Jo. [DE], Reber R. [DE], Rittmeyer R. [DE], Sledzik H. [DE] ;_патентообладатель EADS DEUTSCHLAND GMBH [DE]. – № EP20110001969 ; заявл. 14.03.2009 ; опубл. 20. 07.2011.

33. Пат. 2011026293 (A1) WO, МПК H03F1/30. Temperature compensating circuit for power amplifier / заявитель YU ZHENGMING [CN] ; патентообладатели ZYW MICROELECTRONICS INC YU ZHENGMING [CN]. – № WO2009CN75982 ; заявл. 24.12.2009 ; опубл. 10.03.2011.

34. Пат. 201393203 (У) Китай, МПК H03F1/30. Power amplifier temperature compensation device / заявители Xuming L., Rongju P. ; патентообладатели SHENZHEN BOHAI COMM TECHNOLOGY CO LTD. – № CN20092136152U ; заявл. 20.03.2009 ; опубл. 27.01.2010.

35. Пат. 20090086633 (А) Корея, МПК H03F1/30. Temperature compensation of collector-voltage control RF amplifiers / заявители Ripley D. S. [US], Phillips K. B. [US] ; патентообладатель SKYWORKS SOLUTIONS INC [US]. – № KR20097014001 ; заявл. 13.11.2007 ; опубл. 13.08.2009.

36. Пат. 101394152 (А) Китай, МПК H03F1/30; H03F3/19; H03F3/21. Radio frequency power amplifier circuit / заявители Chen Ju. [CN], Ligang X. [CN] ; патентообладатель RDA MICROELECTRONICS SHANGHAI [CN]. – № CN2007194091 ; заявл. 20.09.2007 ; опубл. 25.03.2009.

37. Пат. 2369956 Российская Федерация, МПК H03F1/30. Усилитель мощности с температурной стабилизацией усиления/заявители Крышов Н. Н., Федотов В. И., Луговой Е.А. ; патентообладатель ООО «Научно-производственная фирма "Радиокомпоненты"». – № 2008126706/09 ; заявл. 30.06.2008 ; опубл. 10.10.2009.

38. Пат. 2231865 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощная ВЧ и СВЧ биполярная транзисторная структура / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т (RU). – № 2003101818/28 ; заявл. 22.01.2003 ; опубл. 27.06.2004.

39. Пат. 2229184 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощная СВЧ-транзисторная структура / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2003101817/282003101817/28 ; заявл. 22.01.2003 ; опубл. 20.05.2004.

40. Пат. 2229183 Российская Федерация, МПК⁷ H01L29/72. Мощный биполярный ВЧ- и СВЧ-транзистор / заявители Булгаков О. М., Петров Б. К. ; патентообладатель Воронеж. гос. ун-т . – № 2003101816/282003101816/28 ; заявл. 22.01.2003 ; опубл. 20.05.2004.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНОДА ВАКУУМНОГО МИКРОПРИБОРА

Н. Д. Жуков, С. В. Овчинников*

ООО «Реф-Свет»
Россия, 410033, Саратов, пр. 50 лет Октября, 101
E-mail: ndzhukov@rambler.ru

* Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

Представлена теплофизическая модель миниатюрного дискообразного анода, подвешенного в вакуумированном объеме микролампы, с учетом только лучистого теплообмена.

Ключевые слова: вакуумный прибор, дискообразный анод, теплофизическая модель, лучистый теплообмен.

Anode Thermal Heat Model for Vacuum Micro Device

N. D. Zhukov, S. V. Ovchinnikov

Presents the thermal heat model of miniaturized disc-shaped anode on vacuum micro-lamp. The radiant heat transfer is consider.

Key words: vacuum microlamp, disc-shaped anode, heat transfer model, radiant heat transfer.

Класс микровакuumных приборов со специфической микроструктурой постоянно расширяется. К ним относятся:

- электронно-оптические преобразователи (ЭОП) новых поколений;
- рентгеновские излучатели и визуализаторы;
- электроразрядные, микроплазменные, автоэмиссионные излучатели.

Специфика работы некоторых из них заключается в том, что на их аноде, расположенном на границе микроструктурного объема, выделяется электрическая мощность большой величины. При этом почти вся она превращается в тепло, которое рассеивается в окружающую среду за счет конвективной и лучистой теплопередачи. В других конструкциях (со свободно подвешенным в вакууме микроанодом) тепло выделяется в самом микрообъеме анода и отводится только лучистым образом. Поиск оптимальных вариантов таких конструкций является актуальной задачей при создании новых микровакuumных устройств с высокой удельной мощностью [1, 2].

В настоящей работе представлен оценочный метод расчета температуры микроанода, свободно подвешенного в вакуумированном объеме лампы на тонком керамическом металлизированном держателе, одновре-

менно выполняющем функцию анодного электрода. Микроанод представляет собой диск, выполненный из тугоплавкого материала и имеющий диаметр 1,5 ... 3,0 мм.

При падении электронного потока на такой миниатюрный анод в нем начинает выделяться тепловая мощность P_T , которая разогревает анод и рассеивается в окружающую среду путем теплового излучения. При расчетах пренебрежем температурными перепадами по телу микроанода и незначительной долей теплового потока, отводимого от анода тонким керамическим держателем.

В стационарном тепловом режиме тепловая мощность P_T , выделяемая в аноде, и температура анода T связаны законом Стефана–Больцмана, который в приближении серого тела имеет вид

$$P_T = \varepsilon \cdot \varphi \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{CP}^4) \cdot S, \quad (1)$$

где ε – интегральная по спектру степень черноты поверхности анода; φ – коэффициент взаимной облученности тел, участвующих в лучистом теплообмене; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; T_{CP} – температура окружения; S – площадь поверхности анода.

Значения интегральной по спектру степени черноты и методы расчета коэффициентов взаимной облученности тел, участвующих в лучистом теплообмене, представлены в справочной литературе, например в [3]. Определение стационарной температуры анода в этом случае труда не составляет.

Рассмотрим процесс нестационарного разогрева анода под воздействием постоянной тепловой мощности P_T , начинающей выделяться в аноде в начальный момент времени $\tau = 0$. Пренебрегая перепадами температур по телу анода, получим следующее простое уравнение теплового баланса:

$$P_T = C \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon \cdot \varphi \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{CP}^4) \cdot S, \quad (2)$$

где C – интегральная теплоемкость анода; τ – текущее время. Первое слагаемое в уравнении (2) связано с изменением теплосодержания анода, а второе – с результирующим лучистым потоком с его поверхности.

Считая T_{CP} неизменной во времени, получим следующее дифференциальное уравнение для определения температуры анода:

$$\frac{dT}{P_T + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot S \cdot T_{CP}^4 - \varepsilon \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot S \cdot T^4} = \frac{1}{C} d\tau \quad \text{или} \quad (3)$$

$$\frac{dT}{A - T^4} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot S}{C} d\tau,$$

где $A = T_{CP}^4 + \frac{P_T}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot S}$.

Уравнение (3) следует дополнить очевидным начальным условием:

$$T(\tau = 0) = T_{CP}.$$

Решение уравнения (3) просто, но не очень удобно для использования:

$$\begin{aligned} \frac{A}{\sqrt[4]{A}} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot S}{C} \cdot \tau = \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\sqrt[4]{A} + T}{\sqrt[4]{A} - T} \right) - \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\sqrt[4]{A} + T_{CP}}{\sqrt[4]{A} - T_{CP}} \right) + \\ + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{T}{\sqrt[4]{A}} \right) - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{T_{CP}}{\sqrt[4]{A}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) не дает явного вида функциональной зависимости температуры анода от времени. Однако при вычислениях с использованием компьютера нетрудно построить таблицу данных, задавая какой угодно шаг по температуре анода и вычисляя момент времени, соответствующий каждой температуре.

Выражение (4) может быть использовано и для определения температур используемых в рентгеновских визуализаторах микроанодов, собранных в виде плоской соты [2]. Действительно, лучистый поток с поверхности одного анода лишь незначительной своей частью попадает на поверхность соседнего анода, поэтому взаимной облученностью в системе анодов можно пренебречь.

Наконец, путем алгебраических преобразований нетрудно убедиться, что выражение (4) при стремлении τ к бесконечности переходит в выражение (1), а постоянная A , введенная в (3), имеет смысл стационарной температуры анода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 526ГС1/6823).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Таубин М. Л., Ясколко А. А. Миниатюрные источники излучения для внутриполостной терапии // I Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники. СПб. : ЛЭТИ, 2014. С. 8–9.
2. Пат. 2563879 Российская Федерация, МПК H01J35/2. Миниатюрный рентгеновский излучатель / заявитель Жуков Н. Д. ; патентообладатель Жуков Н. Д. – № 2014109605/07 ; заявл. 12.03.2014 ; опублик. 27.09.2015.
3. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1991. 432 с.

КОМБИНИРОВАННАЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТОМЕТРИЯ ДЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. М. Проскуряков, М. В. Поздняков, А. А. Игнатъев*

ОАО «Институт критических технологий»
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
E-mail: kbkt@renet.ru

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

В статье дано принципиальное обоснование возможности использования магнитометрического канала измерений для повышения эффективности решения задач автономной ориентации, навигации и наведения баллистических ракет. Показано, что путем расширения и алгоритмической обработки многомерной информации, получаемой с помощью векторных датчиков, можно достаточно простым путем значительно улучшить показатели точности и надежности, помехоустойчивости и автономности, контролепригодности и отказоустойчивости, технологичности и экономичности платформенных систем ориентации и навигации, применяемых на баллистических ракетах.

Ключевые слова: ориентация, навигация, автономность, отказоустойчивость, помехоустойчивость, магнитометрия, комплексирование и комбинирование измерений, баллистический аппарат.

Combined Multifunctional Magnetometry for Ballistic Apparatuses

G. M. Proskuryakov, M. V. Pozdnyakov, A. A. Ignatiev

In the paper an essential substantiation of the possibility of magnetometric measurement channel applying for the purposes of autonomic orientation, navigation and steering of ballistic rockets is given. It was shown that it is possible to significantly increase the indexes of accuracy and fault tolerance, performance and cost effectiveness of platform orientation and navigation systems applied at the ballistic rockets in a plain way.

Key words: orientation, navigation, endurance, fault tolerance, noise resistance, magnetometry, measurement combination, ballistic apparatus.

Требования по точности, надежности, помехоустойчивости, автономности, предъявляемые к решению практических задач ориентации, навигации и управления баллистическими аппаратами (боевыми баллистическими ракетами, ракетами-носителями (РН) и космическими аппаратами (КА)), в начале XXI столетия стали более жесткими. Появились дополнительные требования к системам управления баллистическими аппаратами (БА): необходимость самотестирования (наличие систем встроенного контроля (СВК)), обеспечения адаптации к возникающим аппаратным и информационным отказам, реконфигурации алгоритмов и программ обработки информации с целью реализации свойства многофункциональности, отказоустойчивости и живучести при частичной потере функций. Кроме того, вышеперечисленные требования должны рассматриваться на фоне необходимости выполнения общих условий по обеспечению малых габаритов, массы и энергопотребления, технологичности и экономичности систем.

В то же время к XXI столетию значительно расширился и продолжает расширяться спектр функций, подлежащих выполнению бортовыми системами управления баллистическими аппаратами, и в первую очередь системами автономной ориентации и навигации (СОН).

В настоящее время на БА находят широкое применение как платформенные (ПСОН), так и бесплатформенные (БСОН) системы ориентации и навигации, построенные по принципам **комплексирования** средств инерциальных измерений (акселерометров, гироскопов) с другими средствами коррекции (спутниковыми, астрономическими, радиотехническими, лазерными и др.).

Специалисты в области управления БА в этой непростой обостряющейся с каждым годом ситуации ищут радикальные пути удовлетворения все более жестких и противоречивых требований к СОН за счет расширения информации путем ее **комплексирования и комбинирования**, совершенствования методов, способов и алгоритмов обработки многомерной информации, усовершенствования и улучшения схмотехнических и конструктивно-технологических решений. Однако эти пути пока не позволяют решить кардинально и полностью весь комплекс задач совершенствования СОН и часто обеспечивают улучшение одних показателей системы ценой ухудшения других.

В статье обосновывается возможность эффективного решения комплекса задач совершенствования СОН БА за счет организации и использования **магнитометрического канала** измерений, а также практической целесообразности реализации предлагаемого пути применительно к конкретным задачам управления БА.

Для конкретности в настоящей статье рассматриваются вопросы перспективного усовершенствования решения задач автономного управления БА на всех этапах жизненного цикла применительно к **межконтинентальным баллистическим ракетам** (МБР) с использованием ПСОН. Вместе с тем большинство практических приложений предлагаемого магнитометрического канала измерений достаточно легко и эффективно могут быть реализованы применительно к любым объектам ракетно-космической техники (МБР, РН, КА).

Для повышения эффективности работы ПСОН на МБР с учетом требований необходимого улучшения основных технико-эксплуатационно-экономических показателей (точности, надежности, автономности, экономичности, отказоустойчивости, технологичности, самопроверяемости, контролепригодности, живучести) предлагается на базе штатной ПСОН построить **комбинированную СОН** (КСОН) путем включения в ее состав магнитометрического канала измерений [1–8].

За счет включения магнитометрического канала измерений в состав ПСОН предполагается достижение реализации основных принципов усовершенствования системы:

–**расширение информации** и формирование функционально избыточной информации;

–**алгоритмическая** (многоальтернативная, многофункциональная, многорежимная) **обработка** расширенной информации.

Конструктивно магнитометрический канал измерений реализуется на основе использования магнитоинерциального модуля (МИМ) [9], представляющего собой малогабаритную измерительно-вычислительную систему ($m \approx 0,2$ кг). В состав измерительной части МИМ входят, в первую очередь, три базовых трехосных блока магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА), гироскопов (ТБГ), а в состав вычислительной части модуля – многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер (МК).

Функционально МИМ построен по принципу реконфигурации программ и алгоритмов обработки многомерной магнитоинерциальной информации, при котором аппаратная часть модуля остается неизменной, а достижение модулем или всей системой тех или иных функций обеспечивается за счет сменного программно-алгоритмического обеспечения (ПАО).

Структурно с помощью МИМ реализуется несколько измерительно-вычислительных каналов: магнитометрический, акселерометрический, гироскопический (тахометрический), хронометрический.

Магнитоинерциальная информация, формируемая в соответствующем канале измерений, попадает в МК модуля, в котором она подлежит программно-алгоритмической обработке в соответствии с целевыми функциями [1–15]. Девятимерный вектор \mathbf{u} (9×1) выходных сигналов МИМ формируется на основе объединения трех векторов (3×1) показаний блоков: \mathbf{u}_m (ТБМ), \mathbf{u}_a (ТБА) и \mathbf{u}_g (ТБГ) [16, 17]. Блоки ТБМ, ТБА, ТБГ модуля измеряют соответственно компоненты векторов напряженности результирующего магнитного поля (\mathbf{T}_m), кажущегося ускорения (\mathbf{n}_m) и абсолютной угловой скорости вращения основания ($\boldsymbol{\omega}_m$) в связанном с корпусом МБР трехграннике $m = XYZ$.

Введем в рассмотрение граф преобразований систем координат (рис. 1), используемый в дальнейшем при решении конкретных задач автономной ориентации, навигации и наведения МБР с помощью КСОН (ПСОН+МИМ). Приведем обозначения, принятые на рис. 1: Φ , Ψ_0 – программный (расчетный) и фактический углы азимутального прицеливания (АП) МБР на старте; $\Delta\Psi$ – ошибка АП МБР; ϑ_0 , ψ_0 – угол тангажа и угол рыскания МБР на стартовом столе перед пуском; α_0 , β_0 , σ_0 – углы поворота гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно корпуса МБР (m) перед стартом в режиме автономной начальной выставки (АНВ); ρ_0 , η_0 , ε_0 – углы ориентации ГСП относительно географического трехгранника q в точке старта в режиме АНВ; α , β , σ , ρ , η , ε – углы ориентации ГСП относительно связанного (m) и географического (q) трехгранников в рабочем режиме автономного полета ракеты; Ψ , ϑ , γ – углы ориентации корпуса МБР (m) относительно географического трехгранника (q) в рабочем режиме; ϑ , ψ , γ – углы ориентации корпуса МБР (m) относительно стартового трехгранника (s) в рабочем режиме; A_0 , B_0 , D_0 , P_0 – соответствующие матрицы ориентации трехгранников в режиме АНВ; A , B , C , D , P – соответствующие матрицы ориентации трехгранников в рабочем режиме; \mathbf{e}_p , \mathbf{e}_m , \mathbf{e}_q – единичный вектор, нормальный к базовой плоскости $Y_{II}Z_{II}$ ГСП, отнесенный к трехгранникам p , m и q соответственно; \mathbf{T} , \mathbf{g} , $\boldsymbol{\Omega}$ – векторы напряженности результирующего магнитного поля, ускорения свободного падения тел и угловой скорости вращения Земли, отнесенные к осям соответствующего трехгранника (p , q или m).

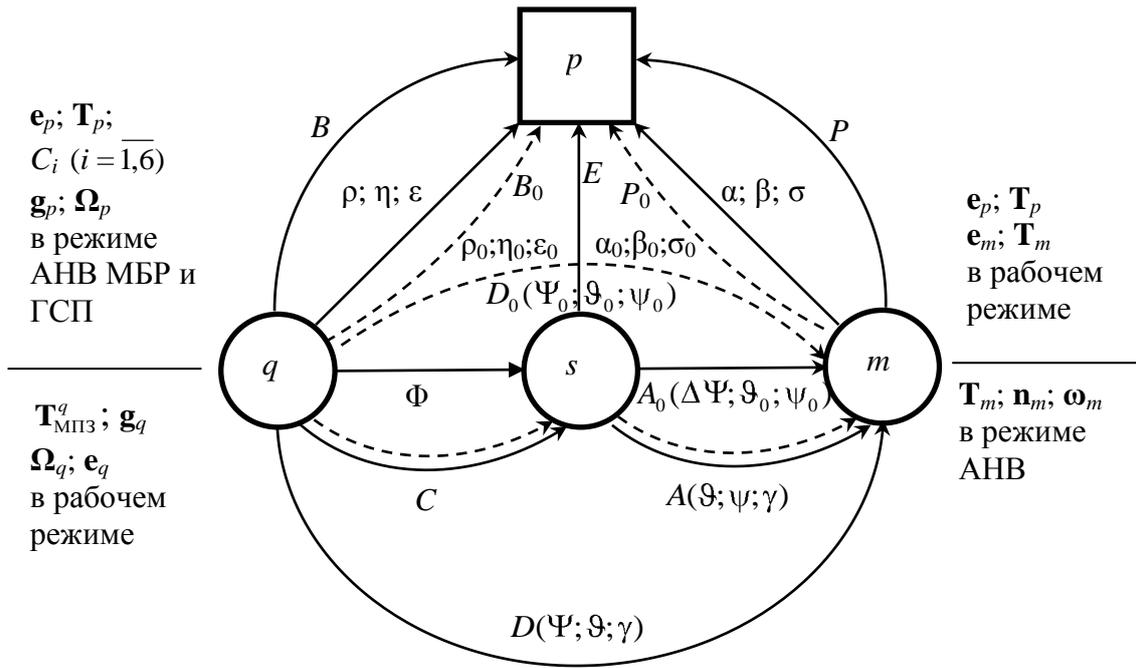


Рис. 1. Граф преобразования координат

Обозначения и названия базовых трехгранников (систем координат), используемые в дальнейшем при решении задач автономного управления МБР, даны в табл. 1.

Таблица 1

Трехгранники (системы координат)

Трехгранник		Моделируемая система координат	
Обозначение	Название	Обозначение	Название
q	Географический	NHE	Географическая: N – направлена на север, H – вертикаль места, E – направлена на восток
s	Стартовый	$X_C Y_C Z_C$	Стартовая (ортодромическая): X_C – направлена на цель, Y_C – стартовая вертикаль, Z_C – нормаль к ортодромии
m	Связанный	XYZ	Связанная: X – продольная ось, Y – нормальная ось, Z – поперечная ось
p	Платформенный	$X_{П} Y_{П} Z_{П}$	Платформенная: $X_{П}$ – ось вращения (B), $Y_{П}$ – ось рыскания (P), $Z_{П}$ – ось тангажа (T)

Схема трехосного гиросtabilизатора с гиросtabilизированной платформой представлена на рис. 2.

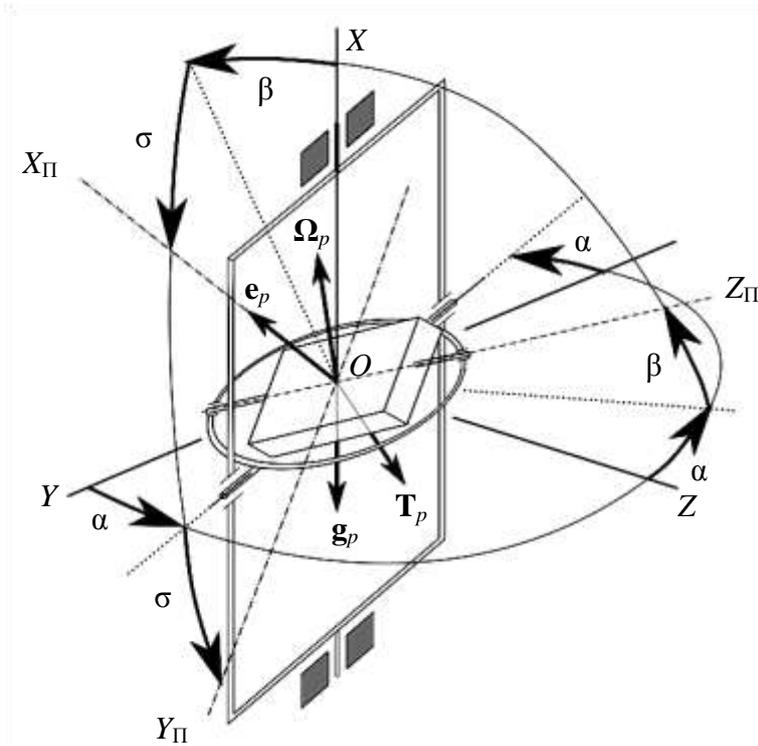


Рис. 2. Схема подвеса ГСП и преобразования координат

Из анализа рис. 1, 2 видно, что при измерении векторов \mathbf{e} , \mathbf{T} , \mathbf{n} , $\boldsymbol{\omega}$ и других можно аналитическим путем на основе алгоритмической обработки многомерной информации получить дополнительную информацию о ненаблюдаемых углах ориентации трехгранников q , s , p , t относительно друг друга, причем как в режиме предстартовой подготовки, так и в рабочих режимах.

С учетом предварительно проводимых операций технологических и объектовых калибровок блоков модуля первичные показания блоков модуля (\mathbf{T}_m , \mathbf{n}_m , $\boldsymbol{\omega}_m$) удастся привести к редуцированным (нормированным) векторам ($\tilde{\mathbf{T}}_m$, $\tilde{\mathbf{n}}_m$, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_m$) соответствующим немагнитному ортонормированному основанию [16, 17]. Дальнейшая алгоритмическая обработка многомерной информации ($\tilde{\mathbf{T}}_m$, $\tilde{\mathbf{n}}_m$, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_m$) позволяет решить комплекс задач управления МБР на этапах предстартовой подготовки, автономной ориентации и навигации ракеты на баллистической траектории и заключительном этапе разделения боеголовок (РБГ) для наведения их на точечные цели.

В частности, в режиме предстартовой подготовки МБР к пуску на основе оценки измеренных с помощью МИМ векторов (\mathbf{T}_m , \mathbf{n}_m , $\boldsymbol{\omega}_m$) и приведенных к ортонормированному основанию ($\tilde{\mathbf{T}}_m$, $\tilde{\mathbf{n}}_m$, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_m$) возможно вычисление направляющих косинусов $d_{i,j}^0$, $i, j = \overline{1,3}$ матрицы D_0 , характеризующих начальную ориентацию МБР (см. рис. 1):

$$\begin{bmatrix} d_{i1}^0 \\ d_{i2}^0 \\ d_{i3}^0 \end{bmatrix} = N_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{T}}_i \\ \tilde{\mathbf{n}}_i \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{N0} & T_{H0} & T_{E0} \\ g_{N0} & g_{H0} & 0 \\ \Omega_{N0} & \Omega_{H0} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{T}}_i \\ \tilde{\mathbf{n}}_i \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \end{bmatrix}, \quad \left(\begin{array}{l} i = \overline{1,3} \\ i \sim x, y, z \end{array} \right), \quad (1)$$

где $T_{N0}, T_{H0}, T_{E0}, g_{N0}, g_{H0}, \Omega_{N0}, \Omega_{H0}$ – значения компонент векторов $\mathbf{T}_{МПЗ}^q, \mathbf{g}_q, \Omega_q$ в географическом трехграннике q в предстартовых условиях; $\tilde{\mathbf{T}}_i, \tilde{\mathbf{n}}_i, \tilde{\omega}_i$ – проекции редуцированных векторов ($\tilde{\mathbf{T}}_m, \tilde{\mathbf{n}}_m, \tilde{\omega}_m$) на i -е оси (X, Y, Z).

По значениям $d_{i,j}, j = \overline{1,3}$ можно вычислить углы $\Psi_0, \vartheta_0, \psi_0$ начальной ориентации МБР относительно географического трехгранника $q = NHE$ в условиях функциональной избыточности информации.

Алгоритм АП МБР при АНВ сводится к вычислению ошибки АП $\Delta\Psi$ и ее отработке в ноль через канал стабилизации и управления вращением ракеты при ее вертикальном старте в первые секунды после отрыва от стола пусковой установки:

$$\Delta\Psi = \Psi_0 - \Phi. \quad (2)$$

Направление плоскости стрельбы МБР можно рассчитать в первом приближении (без учета вращения Земли), если известны географические координаты точки старта $S(\varphi_0; \lambda_0)$ и точки цели $C(\varphi_1; \lambda_1)$:

$$\begin{aligned} \sin \Phi &= \left(\frac{\sin^2 \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0 + \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0} \right)^{1/2}, \\ \cos \Phi &= \left(\frac{\sin^2 \lambda_1 - \lambda_0}{\varphi_1 - \varphi_0 + \lambda_1 - \lambda_0 \cdot \cos^2 \varphi_0} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для автономной начальной выставки ГСП в предстартовых условиях в исходное положение на практике в настоящее время часто используются контактные методы (основанные на использовании гирокомпасов или гироскопических устройств выставки курса) или бесконтактные бескомпасные методы (методы векторного согласования) – методы **аналитического горизонткомпасирования** (АГК), основанные на использовании и обработке информации, получаемой от платформенных векторных датчиков (акселерометров и гироскопов, включенных в режим датчиков угловых скоростей). Однако этот метод не обеспечивает точности выставки ГСП на необходимом уровне, не обладает свойством функциональной избыточности информации, а следовательно, и отказоустойчивостью.

Предлагается более совершенный бескомпасный метод, основанный на методе расширенного векторного согласования, – метод **аналитического пространственного ориентирования** (АПО) ГСП путем обработки многомерной и многовекторной ($\mathbf{e}_p, \mathbf{T}_p, \Omega_p, \mathbf{g}_p$) информации, получаемой от платформенных акселерометров, гироскопов и магнитометров (см. рис. 1,2).

Если ГСП **заарретирована** ($A_{p0}^m = P_0 = E$), то используя информацию от платформенных датчиков – акселерометров (\mathbf{g}_p), гироскопов (Ω_p) и магнитометров (\mathbf{T}_p), – по алгоритмам (1) можно вычислить 9 направляющих

косинусов d_{ij}^0 , $j = \overline{1,3}$, характеризующих начальную ориентацию МБР, а также углы ее начальной ориентации ($\Psi_0, \vartheta_0, \psi_0$) перед стартом.

Если же ГСП **разарретирована** ($A_{p_0}^m = P_0 \neq E$), то можно поставить и решить задачу АНВ ГСП (например, $A_{p_0}^s = A_p^s = E$) и дистанционного переориентирования ее в любую выбранную базовую систему координат. Причем выставку ГСП в выбранную систему координат можно выполнить по трем независимым алгоритмам, выражаемым с помощью трех матричных уравнений (см. рис. 1):

$$A_0 \cdot P_0 = A \cdot P = E, \quad (4)$$

$$A_0 \cdot C = A \cdot C = D, \quad (5)$$

$$P_0 \cdot A_0 \cdot C = P \cdot A \cdot C = B_0 = B. \quad (6)$$

Матричные уравнения (4)–(6) могут быть использованы для выставки ГСП в стартовую систему координат $s = X_c Y_c Z_c$, что чаще всего используется на практике [18–22].

Для реализации алгоритмов выставки ГСП в стартовый трехгранник ($A_{p_0}^s = E$), а также поддержания этой начальной ориентации осей платформенного трехгранника $p = X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$ в автономном режиме ($A_p^s = E$) в платформенном трехграннике p оценивают и измеряют два вектора (e_p и T_p) тремя способами (см. рис. 2). Кроме того, одновременная реализация алгоритмов (4)–(6) поддержания начальной ориентации ГСП в стартовом трехграннике s обеспечивает возможность работы КСОН в режиме автономной коррекции (АК), системы встроенного контроля (СВК) и резервно-аварийных режимах (РАР). Реализация алгоритмов АК, СВК и РАР работы КСОН (ПСОН+МИМ) основана на принципе сравнения и мажоритарном принципе (принципе голосования, принципе 2/3).

В рабочем (автономном) режиме при полете МБР к цели по баллистической траектории задачи автономной ориентации и навигации (АОН) можно решить с помощью КСОН (ПСОН+МИМ) на основе расширенного **векторного метода** [23–26] с учетом наблюдений за показаниями датчиков МИМ и датчиков платформы, предварительно выставленной в положение стартового трехгранника $s = X_c Y_c Z_c$ (см. рис. 1, 2).

Задача автономной ориентации МБР в полете может быть решена не только на основе наблюдения за показаниями командных приборов ГСП (α, β, σ) [18]:

$$A = P^{-1} = P^T = \mathbf{A}_{\sigma} \cdot A_{\beta} \cdot A_{\alpha}^T, \quad (7)$$

но и на основе метода АПО путем обращения матричных уравнений (5) и (6):

$$A = DC^{-1} = DC^T, \quad (8)$$

$$A = P^{-1} \cdot B \cdot C^{-1} = P^T = P^T \cdot B \cdot C^T. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) элементы матриц D и B (направляющие косинусы d_{ij} и b_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$)) вычисляются по **двухвекторным алгоритмам** (**е**; **Т**) АПО, аналогичным алгоритмам АНВ (1). Одновременная реализация алгоритмов АПО (7), (8) и (9) в полете МБР позволяет решить задачу автономной ориентации в штатном режиме, а также в режимах АК, СВК и РАР в условиях функциональной избыточности информации.

Задачу автономной навигации МБР в полете можно решить на основе использования **одновекторного** метода (**Т**) дифференциальной геомагнитной навигации (ДГМН) [7, 15, 27]. С этой целью предварительно в условиях предстартовой подготовки формируют **геомагнитную сетку** (ГМС) в виде дискретно заданных реперных точек с координатно привязанными значениями параметров магнитного поля Земли (МПЗ) (рис. 3), причем координаты (φ , λ , r) реперных точек определяются расчетным путем на основе задания трех близких друг к другу по углу Φ азимутального прицеливания ракеты программных баллистических траекторий, а параметры МПЗ в этих дискретно заданных реперных точках вычисляются на основе использования моделей нормального МПЗ (IGRF, WMM–2015; EMM–2015; HDGM–2015) [28, 29].

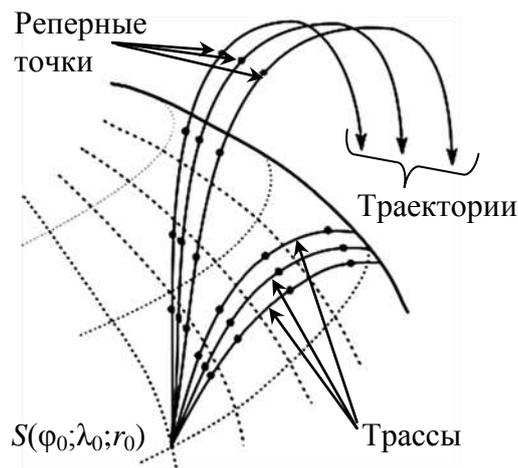


Рис. 3. Схема формирования геомагнитной сетки МБР

Таким образом, ГМС представляет собой не цифровую карту МПЗ, а дискретное виртуальное задание совокупности данных о реперных точках.

Алгоритм ДГМН МБР сводится к реализации в МК МИМ дискретного вычислительного процесса в соответствии со следующими формулами [15, 27]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \varphi_0 & \lambda_0 & r_0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \Delta \varphi & \Delta \lambda & \Delta r \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{r} = G_i^{-1} \cdot \Delta \mathbf{x}_i = F_i \cdot \Delta \mathbf{x}_i, \quad i = \overline{1,4}, \quad (11)$$

$$G = \begin{bmatrix} \nabla T_N^\varphi & \nabla T_N^\lambda & \nabla T_N^r \\ \nabla T_H^\varphi & \nabla T_H^\lambda & \nabla T_H^r \\ \nabla T_E^\varphi & \nabla T_E^\lambda & \nabla T_E^r \\ \nabla T^\varphi & \nabla T^\lambda & \nabla T^r \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где \mathbf{r} , \mathbf{r}_0 – радиусы-векторы контрольной (текущей) и реперной точек; $\Delta\mathbf{r}$ – радиус-вектор корреляции; G , G_i , F_i – тензоры градиентов МПЗ и матрица функций чувствительностей.

Разностные векторы $\Delta\mathbf{x}_i$ ($i = \overline{1,4}$) формируются на борту МБР в реальном масштабе времени путем сравнения редуцированного вектора $\tilde{\mathbf{T}}_m = \tilde{T}_x \quad \tilde{T}_y \quad \tilde{T}_z \quad \tilde{T}_-$, вычисленного в микроконтроллере (МК) МИМ на основе показаний ТБМ МИМ в контрольных (текущих) точках траектории, с соответствующими значениями вектора $\tilde{\mathbf{T}}_{МПЗ}^q = \tilde{T}_N \quad \tilde{T}_H \quad \tilde{T}_E \quad \tilde{T}_{МПЗ}_-$, вычисленного в реперных точках ГМС.

Таким образом, магнитограммы, снятые для конкретных маршрутов при движении по земной (водной) поверхности, носят вполне определенный, строго индивидуальный для данных маршрутов (репрезентативный) характер.

Эта особенность формирования МПЗ в приземном (приводном) слое ($h \leq 1 \dots 2$ км) и на достаточно больших высотах ($h > 2$ км) указывает на возможность использования геомагнитной информации для целей геомагнитной навигации в нескольких вариантах:

– **трековая геомагнитная навигация** (ТГМН) по аномальному геомагнитному полю (МПЗ-А) на основе предварительно снятых **геомагнитных треков** (по модулю, компонентам и градиентам) для выбранных маршрутов на земной, водной поверхности (например, для наземных носителей мобильных ракетных комплексов) или под землей (в тоннелях), под водой для подземной и подводной геомагнитной навигации транспортных средств (например, для навигации в тоннелях)¹;

– **дифференциальная геомагнитная навигация**² (ДГМН) по нормальному магнитному полю Земли (МПЗ-Н) для летательных и баллистических аппаратов (например, МБР) на выбранных маршрутах для высот $h > 2$ км в соответствии с алгоритмами ДГМН (10)–(12);

– **дифференциальная редуцированная геомагнитная навигация**³ (ДРГМН) по аномальному магнитному полю Земли (МПЗ-А) на основе снятых магнитных треков для выбранных маршрутов на земле, на воде, под землей и под водой с учетом предварительно проводимых операций пространственно-временной фильтрации трековой информации (например, с использованием фильтров Калмана).

¹ Идея организации автономной навигации по геомагнитным трекам впервые была предложена профессором А. А. Игнатьевым в 2013 г.

² Идея, содержание и алгоритмы ДГМН впервые были разработаны и опубликованы доцентом Г. М. Проскуряковым в 2013 г. (патенты РФ № 2523753 от 09.01.2013 г. и № 134633 от 08.05.2013 г.).

³ Идея о возможности использования информации об МПЗ-А для целей наземной ДГМН с учетом проведения операций пространственно-временной фильтрации впервые была предложена в 2016 г. профессором Г. Н. Румянцевым (ФГУП (НПЦ АП им. академика Н. А. Пилюгина), г. Москва).

Работа МИМ в составе КСОН на этапах предварительной подготовки и автономного полета МБР по алгоритмам выставки, ориентации и навигации соответствует схеме взаимодействия МИМ со штатной СОН. Схема взаимодействия МИМ с ГСП в составе КСОН и алгоритмы функционирования КСОН обеспечивают реализацию условия **функциональной избыточности информации**.

На заключительном этапе полета МБР по баллистической траектории требуется обеспечить условие для эффективного наведения разделяющихся боеголовок (РБГ) на точечные индивидуальные цели [20]. Боеголовки РБГ при разделении закручиваются вокруг продольной оси с угловыми скоростями ω_0 , составляющими величины от нескольких единиц до нескольких десятков (20...40) герц. Режим принудительного вращения РБГ может быть рационально использован для эффективного решения задач автономной навигации, наведения и самонаведения РБГ в условиях ограничений на массогабаритные параметры, энергопотребление, а также с учетом показателей технологичности и экономичности СОН [10–13, 26]. С этой целью в состав КСОН, устанавливаемых на РБГ, предлагается включить МИМ и координатор цели в виде безгироскопной оптической головки самонаведения (ОГС) (рис. 4) [14], при этом исключить ГСП как достаточно дорогостоящее, ненадежное и крупногабаритное устройство.

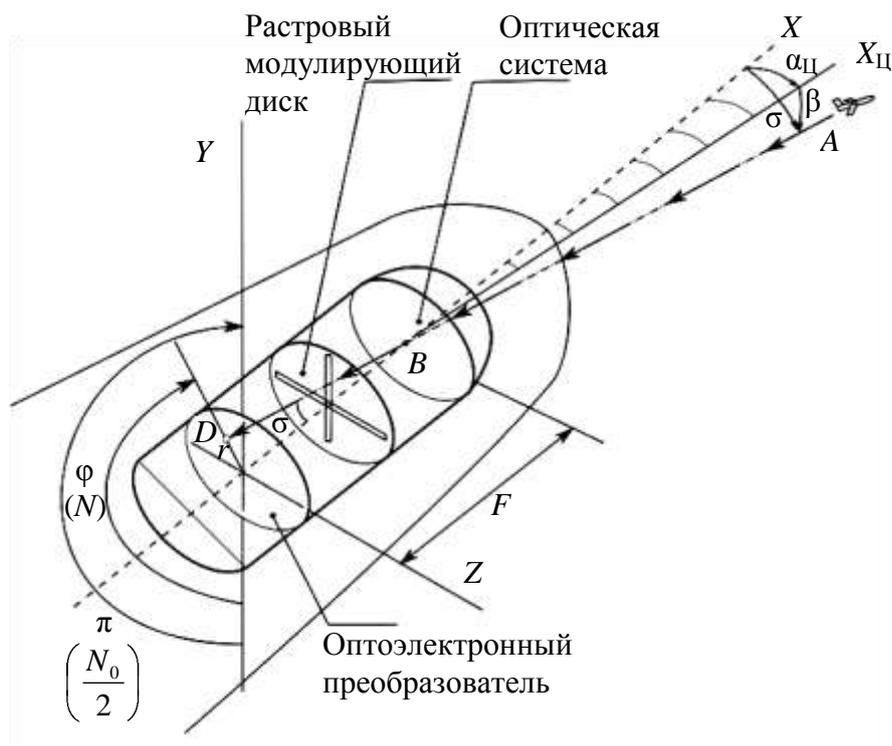


Рис. 4. Схема формирования линии визирования с помощью координатора цели

С учетом фактора вращения РБГ с угловой скоростью ω_0 вокруг продольной оси X можно предварительно решить ряд вспомогательных задач:

- **хронометрирование** измерительных и вычислительных процессов с частотой ω_0 ;
- **модуляция** сигналов гармоническая (для МИМ) и широтно-импульсная (для ОГС);

–пространственно-временная **синхронизация** измерительных и вычислительных процессов;

–косвенное (аналитическое) **горизонтирование** основания;

–**сканирование** геофизических полей (МПЗ, ПТЗ),

способствующих повышению эффективности решения основных задач автономной навигации, ориентации и наведения снаряда.

С учетом проявления указанных сервисных функций вращающегося основания (РБГ) на выходе МИМ и ОГС формируются гармонически модулированные (МИМ) и широтно-импульсно модулированные (ОГС) сигналы, в амплитудах, текущих значениях, фазах и сдвигах фаз которых содержится полезная информация о траекторных, навигационных параметрах, а также о параметрах самонаведения и автономной ориентации РБГ в пространстве.

В процессе вращения РБГ с помощью КСОН (МИМ+ОГС) формируются шесть измерительных каналов: магнитометрический; хронометрический; тахометрический (гироскопический); инерциальный (акселерометрический); оптического самонаведения (ОСН); геомагнитного самонаведения (ГМСН).

Приборная информация в виде выходных сигналов всех измерительных каналов КСОН подается на вход общего МК, в котором она по специальным алгоритмам обработки информации преобразуется в выходную (траекторную, навигационную, позиционную) информацию.

Хронометрический канал включает в свой состав генератор хроноимпульсов (ГХИ) и таймер, которые могут быть воспроизведены программным путем с помощью МК. Хронометрический канал работает в тесной связи с магнитометрическим каналом, который позволяет определять моменты прохождения РБГ вертикального (горизонтального) положения. В пределах каждого полупериода (полуоборота) производится таймером подсчет чисел хроноимпульсов (N_0, N), с помощью которых по алгоритмам автономного хронометрирования вычисляются параметры текущего положения РБГ [10, 11]:

$$\begin{aligned}T_0 &= 2N_0\tau, \\v_0 &= 1/T_0, \\ \omega_0 &= 2\pi v_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \frac{\pi}{N_0 \cdot \tau}, \\ t &= N \cdot \tau, \\ \gamma &= \omega_0 \cdot t + \Delta\gamma = \frac{N}{N_0} \pi + \Delta\gamma,\end{aligned}\tag{13}$$

где N_0, N – числа хроноимпульсов, подсчитанных таймером за полупериод (полуоборот) и текущее время t ($t \leq T_0/2$); T_0, v_0, ω_0 – период, частота и угловая скорость вращения РБГ; $\gamma, \Delta\gamma$ – текущее значение угла вращения РБГ и поправка к вычислениям; τ – цена одного хроноимпульса.

Поправка $\Delta\gamma$ вычисляется по специальным алгоритмам [10, 11]. Аналитическим путем можно получить математическое описание магнитограмм, тахограмм и динамограмм, формируемых в виде гармонических функций на основе обработки выходных сигналов блоков ТБМ, ТБГ и ТБА, соответственно [11]:

–ТБМ

$$\begin{aligned}\tilde{T}_x &= F_{mx} + A_{mx} \cdot \sin \varphi + \varphi_{mx} \\ \tilde{T}_y &= F_{my} + A_{my} \cdot \sin \varphi + \varphi_{my} \\ \tilde{T}_z &= F_{mz} + A_{mz} \cdot \sin \varphi + \varphi_{mz};\end{aligned}\quad (14)$$

–ТБА

$$\begin{aligned}\tilde{n}_x &= F_{ax} + A_{ax} \cdot \sin \varphi + \varphi_{ax} \\ \tilde{n}_y &= F_{ay} + A_{ay} \cdot \sin \varphi + \varphi_{ay} \\ \tilde{n}_z &= F_{az} + A_{az} \cdot \sin \varphi + \varphi_{az};\end{aligned}\quad (15)$$

–ТБГ

$$\begin{aligned}\tilde{\omega}_x &= F_{gx} + A_{gx} \cdot \sin \varphi + \varphi_{gx} \\ \tilde{\omega}_y &= F_{gy} + A_{gy} \cdot \sin \varphi + \varphi_{gy} \\ \tilde{\omega}_z &= F_{gz} + A_{gz} \cdot \sin \varphi + \varphi_{gz},\end{aligned}\quad (16)$$

где $\mathbf{F}_M, \mathbf{F}_a, \mathbf{F}_\Gamma$ – векторы смещений нулевых сигналов ТБМ, ТБА, ТБГ:

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_M &= F_{mx} \quad F_{my} \quad F_{mz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \mathbf{F}_a &= F_{ax} \quad F_{ay} \quad F_{az} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \mathbf{F}_\Gamma &= F_{gx} \quad F_{gy} \quad F_{gz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix};\end{aligned}\quad (17)$$

$\mathbf{A}_M, \mathbf{A}_a, \mathbf{A}_\Gamma$ – векторы амплитуд магнитограмм, тахограмм и динамограмм соответственно:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_M &= A_{mx} \quad A_{my} \quad A_{mz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \mathbf{A}_a &= A_{ax} \quad A_{ay} \quad A_{az} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \mathbf{A}_\Gamma &= A_{gx} \quad A_{gy} \quad A_{gz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix};\end{aligned}\quad (18)$$

$\varphi_M, \varphi_a, \varphi_\Gamma$ – векторы начальных фаз магнитограмм, тахограмм и динамограмм:

$$\begin{aligned}\varphi_M &= \varphi_{mx} \quad \varphi_{my} \quad \varphi_{mz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \varphi_a &= \varphi_{ax} \quad \varphi_{ay} \quad \varphi_{az} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}, \\ \varphi_\Gamma &= \varphi_{gx} \quad \varphi_{gy} \quad \varphi_{gz} \begin{matrix} \bar{T} \\ - \end{matrix}.\end{aligned}\quad (19)$$

Компоненты векторов (17)–(19) доступны измерениям (т. е. являются наблюдаемыми в каждый момент времени t), и они позволяют сформировать первичную приборную информацию. Причем эти измерения подчиняются условию пространственно-временной синхронизации за счет эффекта вращения РБГ.

Обработка по специальным алгоритмам A комплексной многомерной приборной информации, на основе которой можно сформировать вектор \mathbf{x} , дает возможность получить на выходе расширенную (траекторную, навигационную и позиционную) информацию, выражаемую с помощью вектора \mathbf{y} :

$$\mathbf{x} \xrightarrow{A} \mathbf{y}, \quad (20)$$

причем

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_M^T \quad \mathbf{F}_a^T \quad \mathbf{F}_r^T \quad \mathbf{A}_M^T \quad \mathbf{A}_a^T \quad \mathbf{A}_r^T \quad \boldsymbol{\Phi}_M^T \quad \boldsymbol{\Phi}_a^T \quad \boldsymbol{\Phi}_r^T \quad N \quad N_0^T, \quad (21)$$

$$\mathbf{y} = \omega_0 \quad t \quad \gamma \quad \psi \quad \vartheta \quad \dot{\vartheta} \quad \dot{\psi} \quad v \quad \dot{v} \quad \hat{\mathbf{g}}^T \quad \Delta \hat{\mathbf{a}}^T \quad \hat{\boldsymbol{\omega}}_{др}^T, \quad (22)$$

где ψ , ϑ , $\dot{\psi}$, $\dot{\vartheta}$ – углы курса и тангажа РБГ и их производные; v , \dot{v} – оценки скорости и продольного ускорения РБГ; $\hat{\mathbf{g}}^T$, $\Delta \hat{\mathbf{a}}^T$, $\hat{\boldsymbol{\omega}}_{др}^T$ – оценки транспонированных векторов \mathbf{g} , $\Delta \mathbf{a}$, $\boldsymbol{\omega}_{др}$.

Преобразования (20) по алгоритмам A (в настоящей статье алгоритмы не приводятся) вектора \mathbf{x} в вектор \mathbf{y} позволяют получить выходную информацию в условиях ее функциональной избыточности и в режиме самотестирования блоков ТБМ, ТБА, ТБГ за счет текущего уточнения оценок векторов смещений их нулевых сигналов ($\Delta \hat{\mathbf{a}}$, $\Delta \hat{\boldsymbol{\omega}}_{др}$).

Работа каналов оптического и геомагнитного самонаведения (ОСН и ГМСН) обеспечивает режим **комбинированного самонаведения** РБГ на точечные цели. Причем каналы ГМСН и ОСН работают не в противоречии друг с другом, а в режиме поддержки одного канала (ОСН) другим каналом (ГМСН). Взаимодействие между каналами ГМСН и ОСН основано на принципе поэтапной работы (эстафеты): канал ГМСН обеспечивает дальнейшее наведение РБГ (а именно приведение боеголовки в район цели), а канал ОСН реализует непосредственно режим самонаведения на цель в условиях прямой видимости. Отличительные особенности работы каналов ГМСН и ОСН по физическим и техническим признакам показаны в табл. 2, 3.

Сравнительный анализ каналов показывает, что способ ГМСН имеет существенные преимущества перед способом ОСН по физическим (условиям самонаведения) и техническим (по дальности, помехозащищенности, эксплуатационным ограничениям) признакам.

Таблица 2

Каналы геомагнитного и оптического самонаведения РБГ
(сравнение по физическим признакам)

Физические показатели сравнения каналов	Канал геомагнитного самонаведения (ГМСН)	Канал оптического самонаведения (ОСН)
Условия самонаведения	Дальнее самонаведение (наведение в условиях отсутствия прямой видимости целей)	Ближнее самонаведение (наведение в условиях прямой видимости целей)
Носители сигналов	Магнитные сигналы о векторе T	Оптические сигналы (свет, ИК, УФ от цели)
Условия воспроизведения линии визирования (ЛВ)	Косвенные условия (виртуальное воспроизведение ЛВ методом математического моделирования)	Прямые условия (реальное воспроизведение ЛВ в виде оптического луча)
Принципы самонаведения	Косвенное самонаведение путем совмещения вектора скорости v с магнитной ЛВ	Прямое самонаведение путем совмещения продольной оси X РБГ с оптической ЛВ
Координаты каналов самонаведения	Углы магнитного визирования (магнитный пеленг $\psi_{ц}$ и магнитный зенитный угол $\theta_{ц}$ цели в сопровождающем ортодромическом трехграннике)	Углы оптического визирования (углы фазирования (φ) и визирования ($\alpha_{ц}; \beta_{ц}; \sigma_{ц}$) цели в связанном трехграннике $m = XYZ$)

Таблица 3

Каналы геомагнитного и оптического самонаведения РБГ
(сравнение по техническим признакам)

Технические показатели сравнения каналов	Канал геомагнитного самонаведения (ГМСН)	Канал оптического самонаведения (ОСН)
Датчики первичной информации	Магниточувствительные датчики (магнитометры)	Опто-электронные преобразователи (ОЭП)
Измерительные блоки	Трехосный блок магнитометров (ТБМ)	Оптический координатор цели (оптическая головка самонаведения)
Ограничения на работу каналов СН: – по излучательной способности целей – по состоянию атмосферы (среды) – по помехозащищенности	Отсутствуют (цели могут не излучать физических полей) Отсутствуют, т.к. канал ГМСН работает в любой среде (атмосфере, воде, земле) Помехозащищен	Имеются (интенсивность излученной энергии оптических лучей $I \geq I_{доп}$ при $I \geq I_{min}$) Имеются (канал ОСН чувствителен к оптической прозрачности среды) Помехонезащищен

Технические показатели сравнения каналов	Канал геомагнитного самонаведения (ГМСН)	Канал оптического самонаведения (ОСН)
– по дальности действия	В пределах околоземного пространства дальность не ограничена	Дальность действия ограничена пороговой чувствительностью ОЭП, условиями прямой видимости и прозрачности среды
– по вероятности обнаружения скрытых целей (в шахтах, тоннелях, бункерах, ангарах и пр.)	Возможно ГМСН РБГ на скрытые (под водой, землей и препятствиями) цели независимо от условий скрытости и невидимости цели	Возможность ОСН РБГ на скрытые (невидимые) цели практически отсутствует

Кроме того, следует иметь в виду, что канал ГМСН не нуждается в обеспечении многодиапазонных измерений магнитного поля Земли, тогда как канал пассивного ОСН требует обеспечения широкодиапазонной чувствительности ОЭП к интенсивности излучения целями в оптическом луче энергии в разных частотных диапазонах (инфракрасном (ИК), световом и ультрафиолетовом (УФ)).

Алгоритм ГМСН сводится к вычислениям вектора корреляции $\Delta \mathbf{r}_C$ углов ориентации вектора скорости \mathbf{v} ГБГ ψ , ϑ (с помощью МИМ) и углов магнитного визирования цели $\psi_{ц}$, $\theta_{ц}$ (по сигналам ТБМ) с последующим управлением вектором скорости \mathbf{v} боеголовки в соответствии с условием сведения к нулю ошибок ГМСН ($\Delta \mathbf{r}_C$, $\Delta \psi_{РБГ}$, $\Delta \theta_{РБГ}$):

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_C &= G^{-1} \cdot \Delta \mathbf{T} \rightarrow 0, \\ \Delta \psi_{РБГ} &= \psi - \psi_{ц} \rightarrow 0, \\ \Delta \theta_{РБГ} &= \vartheta - \theta_{ц} \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (23)$$

причем углы магнитного визирования цели $\psi_{ц}$, $\theta_{ц}$ в горизонтальной и вертикальной плоскостях, проходящих через центр масс РБГ, вычисляются исходя из геометрических соображений:

– в горизонтальной плоскости

$$\begin{aligned} \sin \psi_{ц} &= \left(\frac{\lambda \cos \varphi - \lambda_C \cos \varphi_C}{\varphi - \varphi_C + \lambda \cos \varphi - \lambda_C \cos \varphi_C} \right)^{1/2}, \\ \cos \psi_{ц} &= \left(\frac{\varphi - \varphi_C}{\varphi - \varphi_C + \lambda \cos \varphi - \lambda_C \cos \varphi_C} \right)^{1/2}, \\ \operatorname{tg} \psi_{ц} &= \frac{\lambda \cos \varphi - \lambda_C \cos \varphi_C}{\varphi - \varphi_C}; \end{aligned} \quad (24)$$

– в вертикальной плоскости

$$\begin{aligned} \sin \theta_{\text{н}} &= \left(\frac{h - h_c}{h - h_c + R^2 \varphi - \varphi_c + \lambda \cos \varphi - \lambda_c \cos \varphi_c} \right)^{1/2}, \\ \cos \theta_{\text{н}} &= \left(\frac{\varphi - \varphi_c}{h - h_c + R^2 \varphi - \varphi_c + \lambda \cos \varphi - \lambda_c \cos \varphi_c} \right)^{1/2}, \\ \operatorname{tg} \theta_{\text{н}} &= \frac{h - h_c}{R \varphi - \varphi_c + \lambda \cos \varphi - \lambda_c \cos \varphi_c}, \end{aligned} \quad (25)$$

где R – средний радиус Земли, $R = 6371,302$ км; h, h_c – высоты текущей точки местоположения РБГ и цели (по модели WGS-84) [30].

Текущие географические координаты РБГ (φ, λ, h) определяют с использованием показаний ТБМ по алгоритмам ДГМН или с помощью спутниковой навигационной системы.

Особенности реализации метода комбинированного самонаведения РБГ на точечные цели заключаются в следующем:

– возможность выполнения оперативного расчета полетного задания (ОРПЗ) всех РБГ, находящихся в каскаде последней ступени МБР, до их разделения на основе данных разведки или на основе оперативной информации о целях, получаемой с помощью бортовых средств наблюдения;

– возможность обеспечения одновременного запуска всех РБГ по распределенным в соответствии с ОРПЗ точечным целям без построения боевого порядка с последовательным подавлением целей [20];

– возможность использования дифференциально-геометрического метода навигации РБГ в процессе самонаведения [31, 32] с целью выполнения маневрирования ($v, \dot{v}; \psi, \dot{\psi} \sim \text{var}$) в интересах обеспечения неуязвимости РБГ относительно средств ПРО противника.

Работоспособность отдельных алгоритмов автономных навигации, ориентации и наведения объекта (в частности, алгоритмов ДГМН) проверена и подтверждена путем проведения натуральных лабораторных и полевых испытаний, а также результатами компьютерного эксперимента на основе метода математического моделирования баллистической магнитометрии [33].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А.* Специальная магнитометрия. СПб. : Наука, 2002. 228 с.
2. *Белоглазов И. И., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П.* Основы навигации по геофизическим полям. М. : Наука, 1985. 328 с.
3. *Игнатъев А. А., Проскураков Г. М., Каюшкина Е. А.* Проблемы и перспективы развития прецизионной магнитометрии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 93–103.

4. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М.* Гетеромагнитометрия : Алгоритмы, методики калибровки блоков магнитометров. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 152 с.
5. *Проскуряков Г. М.* Комплексные алгоритмы бортовой магнито-гравиметрии // Гироскопия и навигация. 1995. № 1 (8). С. 72–73.
6. *Силкин А. А.* Синтез и анализ алгоритмов определения пространственной ориентации беспилотной аэродинамической платформы по измерениям магнитного поля Земли : дис. ... канд. техн. наук. М., 2002. 280 с.
7. *Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л. И.* Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 74–84.
8. *Погорелов М. Г., Шведов А. П., Малютин Д. М.* Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2009. № 5. С. 51–54.
9. *Лекарев А. А., Спиридонов Д. М., Игнатъев А. А., Солопов А. А.* Магнитоинерциальный модуль для новых применений // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–12.
10. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В., Маслов А. А.* Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (хронометрический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 53–62.
11. *Проскуряков Г. М., Игнатъев А. А., Маслов А. А.* Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (гармонический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 81–88.
12. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Маслов А. А.* Миниатюрная курсовертикаль для квазистационарных объектов // Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 64–74.
13. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В.* Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов // Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 78–91.
14. *Бабаев А. А.* Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. Л. : Машиностроение, 1984. 232 с.
15. *Проскуряков Г. М., Игнатъев А. А., Поздняков М. В., Ляшенко А. В.* Дифференциальная геомагнитная навигация подвижных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 13–22.
16. *Ляшенко А. В., Проскуряков Г. М., Поздняков М. В., Румянцев Г. Н., Игнатъев А. А., Васильев А. В., Спиридонов Д. М.* Технологическое обеспечение магнитоинерциального модуля // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2016. Вып. 21 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–19.

17. *Игнатъев А. А., Проскураков Г. М., Спиридонов Д. М.* Однофакторные калибровки блока магнитометров (алгоритмы, методика, технологии) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–130.
18. *Назаров Б. И., Хлебников Г. А.* Гиросtabilизаторы ракет. М. : Воениздат, 1975. 216 с.
19. *Ефимов М. В.* Прицеливание баллистических ракет. М. : Воениздат, 1968. 120 с.
20. *Волков Л. И., Прокудин А. И., Гаврилов В. С., Мохоров Г. И.* Точность межконтинентальных баллистических ракет. М. : Машиностроение, 1996. 304 с.
21. *Иванов Н. М., Лысенко Л. Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов. М. : Дрофа, 2004. 544 с.
22. *Сихарулидзе Ю. Г.* Баллистика летательных аппаратов. М. : Наука, 1982. 352 с.
23. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 280 с.
24. *Барышев В. А., Крылов Г. Н.* Контроль ориентации метеорологических спутников. Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1968. 212 с.
25. *Репников А. В., Сачков Г. П., Черноморский А. И.* Гироскопические системы : учеб. пособие для авиационных вузов / под ред. А. В. Репникова. М. : Машиностроение, 1983. 319 с.
26. *Розенцвейн В. Г.* Современное состояние скважинных гироскопических навигационных систем // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. ст. и докл. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2002. С. 146–167.
27. Пат. 2523753 Российская Федерация, МПК G01C21/00. Способ персональной автономной навигации / заявители Проскураков Г. М., Буров А. С. ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ имени Гагарина Ю. А.» – № 2013100327А ; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 20.07.2014.
28. *Горбулин В. И., Радионов Н. В., Немиров А. В., Комаров П. А., Астахов Н. Н.* Математические модели неоднородного магнитного поля Земли в околоземном пространстве // Тр. / Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. 2014. № 644. С. 147–152.
29. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. М. : Изд-во стандартов, 1985. 22 с.
30. Руководство по Всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). URL : http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/ICAO_Doc9674.pdf (дата обращения : 24.09.2016).
31. *Громов Г. Н.* Дифференциально-геометрический метод навигации. М. : Радио и связь, 1986. 384с.
32. *Гулько В. А.* Инвариантный метод в исследовании динамики управляемого полета. Саратов : Высш. командно-инж. училище ракетных войск, 1967. 211 с.
33. *Вязьмин В. С., Голован А. А., Папуша И. А., Попеленский М. Ю.* Информативность измерений векторного магнитометра и глобальных моделей магнитного поля Земли для коррекции БИНС летательного аппарата // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб. : ГНЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 340–344.

УДК 001.891, 001.895

ОСОБЕННОСТИ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ МАГИСТРАТУРЫ «МАГНИТОЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ И БЕЗОПАСНОСТИ»

А. А. Игнатъев, Л. А. Романченко, С. П. Кудрявцева

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

В статье описаны основные этапы текущей аттестации и особенности промежуточной аттестации по научно-исследовательской работе студентов, обучающихся по программе магистратуры «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности».

Ключевые слова: магистратура, текущая аттестация, промежуточная аттестация, научно-исследовательская работа.

Features of Current and Intermediate Attestation of Research Work of Students, Enrolled in the Master's Program «Magnetoelectronics in Information Protection and Safety Systems»

A. A. Ignatiev, L. A. Romanchenko, S. P. Kudriavceva

In the article there are described the main stages OF CURRENT attestation and the features of intermediate attestation of research work of students, enrolled in the Master's program «Magnetoelectronics in the information protection and safety systems».

Key words: master program, current attestation, intermediate attestation, research work.

Обучение студентов по программе магистратуры «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» в рамках направления «Физика» реализуется с 2013 г. на физическом факультете Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Научно-исследовательская работа тесно связана с научными направлениями кафедры общей физики и поддерживается производственными возможностями кафедры физики критических и специальных технологий на базе ОАО «Институт критических технологий» [1–3].

Научно-исследовательская работа (НИР) является важной частью при обучении студентов в магистратуре [4, 5]. Магистранты должны постоянно выполнять практические задания, относящиеся к их научно-исследовательской деятельности и связанные с их научной работой и темой выпускной квалификационной работы. Кроме того, перед студентами могут быть поставлены и иные задачи, необходимые для формирования у них компетенций на заключительном (втором) уровне их освоения:

- способности к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1);
- готовности к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3);
- готовности к коммуникации в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности (ОПК-1);
- способности к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ (ОПК-3);
- способности использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе (ОПК-6);
- способности свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (ПК-2);
- способности принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности (ПК-3).

В результате освоения этих компетенций студенты должны:

- знать принципы планирования научной деятельности, построения математических моделей физических процессов в микросистемах магнитоэлектроники, методы их экспериментального исследования, обосновывать признаки достоверности научных результатов;
- уметь находить информационные источники по разрабатываемой тематике для обоснования научной практической значимости проводимых исследований;
- владеть методами анализа и систематизации информации по теме исследования, теоретическими, экспериментальными и численными методами расчета и анализа характеристик изучаемых физических процессов и явлений [6].

Освоение вышеперечисленных компетенций происходит при выполнении студентами ряда практических заданий и лабораторных работ в рамках НИР, в их числе: «Исследование угловой чувствительности одноосного гетеромагнитного датчика», «Исследование шумовых и спектральных характеристик одноосного гетеромагнитного преобразователя», «Исследование температурных зависимостей ухода частоты гетеромагнитного преобразователя», «Исследование нелинейных свойств гетеромагнитного преобразователя на сфере из железонитридевого граната», «Исследование плавной термостабилизации уходов частоты в гетеромагнитном преобразователе», «Исследование температурных зависимостей показаний трехосного феррозонда», «Исследование магниторезистивного трехосного преобразователя», «Исследование характеристик трехосного гетеромагнитного модуля с цифровой обработкой данных».

Для формирования компетенции ОПК-1, ОПК-3, ПК-3 магистранты работают в малых научных группах и выполняют задания, разделив обязанности между собой по поиску и систематизации информации, проведению экс-

перимента и обработке результатов, оформлению отчета и анализу полученных результатов. Работа строится таким образом, чтобы каждый студент получил возможность принять участие в каждом из видов деятельности. Совместная работа позволяет сформировать навыки коммуникации, организации научно-исследовательских и инновационных работ, научить студентов принимать участие в разработке методических подходов к научно-инновационным исследованиям и инженерно-технологической деятельности.

Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1) и способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (ПК-2) неизбежно формируются в процессе выполнения всех практических заданий и лабораторных работ.

Отчет по НИР студенты оформляют в конце второго семестра обучения, т. е. с момента получения задания по научно-исследовательской работе проходит довольно много времени. Для того чтобы своевременно скорректировать научно-исследовательскую работу студентов и помочь им избежать ошибок в работе, необходимо постоянно организовывать процесс обратной связи при обучении, которая может быть представлена в разных формах [7–9]. От разнообразия этих форм напрямую зависит качество формирования умений и навыков у студентов. Регулярность применения обратной связи также играет большую роль в образовательном процессе. Для студентов прикладной магистратуры, научная тематика которой связана с производственным процессом, наиболее эффективными видами обратной связи при обучении являются выступления с докладами на научных семинарах с последующим обсуждением (форумом), а также текущие консультации научных руководителей.

Ясные и четкие критерии оценивания и сроки предоставления мини-отчетов по проделанным лабораторным работам помогают студентам при подготовке к текущей аттестации по научно-исследовательской работе. В результате магистранту ставится оценка:

– «отлично» при выполнении всего намеченного объема работы в срок и на высоком уровне в соответствии с поставленными задачами НИР, проявлении самостоятельности, творческого подхода, владении теоретическими знаниями и практическими навыками;

– «хорошо» при выполнении намеченной работы с незначительными просчетами методического характера при общем хорошем уровне профессиональной подготовки;

– «удовлетворительно» при частичном выполнении намеченной работы, если магистрант допускал просчеты или ошибки методического характера;

– «неудовлетворительно» при выполнении менее 50% всех заданий, низком уровне теоретической подготовки, отсутствии самостоятельности.

Промежуточная аттестация по НИР проводится в виде выступления студентов с презентацией, отражающей итоги работы, с предоставлением отчета в письменном виде. Обязательными структурными элементами от-

чета являются: титульный лист, обозначения и сокращения (при необходимости), содержание, основная содержательная часть, список использованных источников, приложения (при необходимости). Минимальные сведения, отражаемые студентами в отчете, должны включать:

- общие сведения о базе, порядке и сроках проведения НИР;
- тему, цель и задачи НИР;
- методы проведения исследований (теоретические, экспериментальные), используемое оборудование;
- анализ результатов выполненной работы;
- заключение (общие выводы по результатам исследований, проведенных в рамках НИР).

При самостоятельной подготовке к выступлениям на научных семинарах (с краткими сообщениями или с итоговым отчетом) студентам предлагается ориентироваться на следующие контрольные вопросы:

1. Сформулируйте тематику НИР.
2. Какова актуальность исследуемой проблемы?
3. Какие этапы, необходимые для выполнения задания по НИР, могли бы вы выделить?
4. Какая информация была необходима вам для выполнения задания?
5. Каковы основные положения, лежащие в основе используемой вами математической модели изучаемого процесса (явления, структуры)?
6. Каковы принципы действия изучаемых вами объекта и предмета исследования (алгоритма, схемы, конструкции, устройства и т. п.)?
7. Сформулируйте и объясните результаты ваших экспериментальных и компьютерных исследований.
8. Чем подтверждается достоверность полученных вами результатов? Приведите систему аргументов.
9. В чем состоит новизна (оригинальность) полученных вами результатов?
10. Какова теоретическая и практическая значимость полученных вами результатов?
11. Какое общее заключение вы можете сделать по результатам своей работы, какую закономерность обнаружили в результате проведенного исследования?

Критерии промежуточной аттестации магистрантов за итоговый отчет и выступление по НИР:

- оценка «отлично» – при демонстрации свободного владения теоретическим материалом, за обоснование актуальности проведенных исследований и объяснение методики их проведения, четкое формулирование результатов исследований и их значимости;
- оценка «хорошо» – за владение теоретическим материалом по поставленной теме, демонстрацию понимания используемой методики исследования, четкую формулировку выводов по проделанной работе, при неполных ответах на заданные вопросы;
- оценка «удовлетворительно» – в случае допущения ошибок при формулировании целей и задач НИР, неполного проведения намеченных

исследований, слабого владения теоретическим материалом и методикой исследований;

– оценка «неудовлетворительно» – при выполнении менее 50 % всех заданий, низком уровне теоретической подготовки и отсутствии самостоятельности в работе.

Описанные в статье особенности и способы проведения текущей и промежуточной аттестации магистрантов, обучающихся по программе «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности», были успешно применены в реальном учебном процессе и могут использоваться для других профилей обучения в рамках направления «Физика».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Магистерская программа «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 92–98.

2. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Реализация магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» направления 011200 «Физика» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 75–77.

3. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Магистерские программы и перспективы развития магистратуры на кафедре общей физики СГУ // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 14 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 123–130.

4. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А., Ляшенко А. В.* Научно-исследовательская работа по программе прикладной магистратуры «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 106–109.

5. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Практики и научно-исследовательская работа для подготовки магистров по профилю «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» // Воспитательный потенциал инновационной образовательной среды : сб. науч. тр. Одиннадцатой Междунар. заоч. науч.-метод. конф. Саратов : Изд-во СРОО «Центр-Просвещение», 2015. С. 119–121.

6. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Прикладная магистратура по профилю подготовки «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» // Непрерывная предметная подготовка в контексте педагогических инноваций : сб. науч. тр. в 2 ч. Саратов : Изд-во СРОО «Центр-Просвещение», 2016. Ч.1. С. 184–190.

7. *Романченко Л. А.* Применение современных образовательных технологий при преподавании дисциплины «Основы физики полупроводниковых микроструктур» // Воспитательный потенциал инновационной образовательной среды : сб. науч. тр. Одиннадцатой Междунар. заоч. науч.-метод. конф. Саратов : Изд-во СРОО «Центр-Просвещение», 2015. С. 278–281.

8. *Романченко Л. А.* Современные образовательные технологии при преподавании специальных дисциплин // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 98–101.

9. Романченко Л. А., Боц Т. С., Недогреева Н. Г., Романова Н. В. Интерактивные технологии // Образовательные технологии в высшем педагогическом образовании / под общ. ред. Е. Г. Елиной. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. С. 101–124.

УДК 537.6

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПЛАСТИНООБРАЗНЫХ МАГНИТОВ В УЧЕБНОМ ПРАКТИКУМЕ

С. П. Кудрявцева

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

В статье описан метод определения намагниченности пластинообразных магнитов. Согласно данному методу для определения намагниченности достаточно располагать сведениями о локальном коэффициенте формы магнита и измерить значение магнитной индукции в определенных точках магнитного образца.

Ключевые слова: магнит, намагниченность, коэффициент формы.

Methodological Development for Determination of Plate-shape Magnets Magnetization in the Training Workshop

S. P. Kudryavceva

The article describes the method for determination of plate-shape magnets magnetization. According to this method for determination of magnetization it is enough to have information about local shape factor of magnet and to measure the value of magnetic induction in certain points of magnetic sample.

Key words: magnet, magnetization, shape factor.

Определить намагниченность постоянных магнитов можно по коэффициентам размагничивания либо по локальным коэффициентам формы [1–4]. Наиболее приемлемым способом определения намагниченности магнитов для учебного практикума является способ, основанный на знании локальных коэффициентов формы K . Этот способ не требует информации о кривой размагничивания материала магнита. Намагниченность M магнита для определенной точки поверхности тела рассчитывается по формуле

$$M = \frac{B}{\mu_0 K},$$

где B – магнитная индукция в выбранной точке; μ_0 – магнитная постоянная.

Направление вектора намагниченности в исследуемом образце магнита прямоугольного сечения показано на рис. 1.

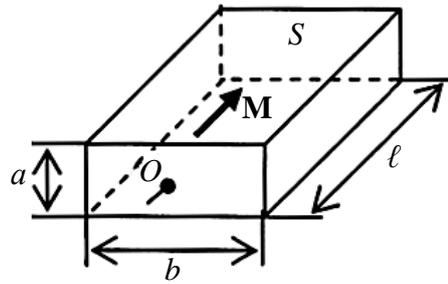


Рис. 1. Исследуемый образец

Зависимость локального коэффициента формы для центральной точки O (см. рис. 1) торца магнита прямоугольного сечения от геометрических размеров образца представлена в таблице и в виде графического материала (рис. 2) [3].

Локальные коэффициенты формы

b/a	l/a			
	0,2	0,5	1,0	1,5
1,0	0,169	0,333	0,435	0,468
1,5	0,145	0,299	0,413	0,454
2,0	0,135	0,282	0,397	0,443

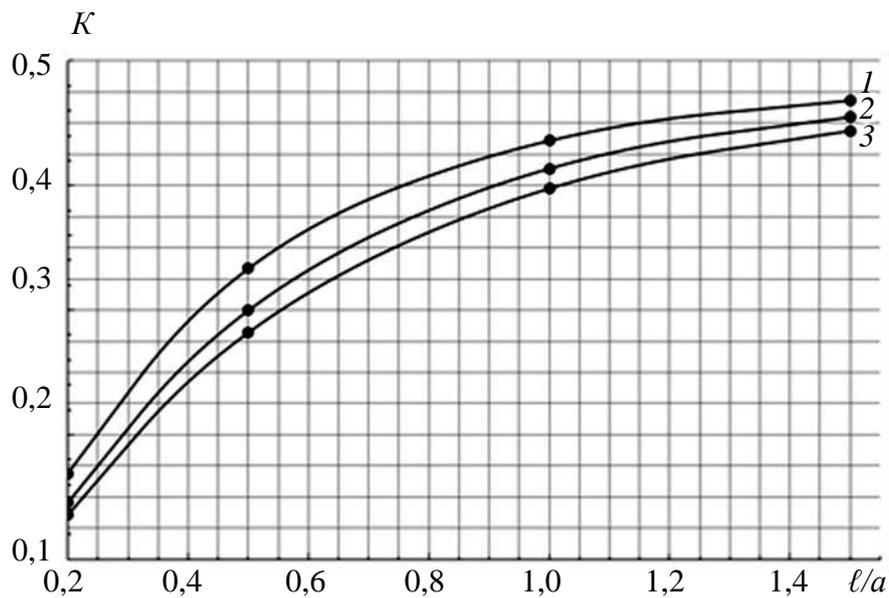


Рис. 2 Зависимость локального коэффициента формы магнита от его нормированной длины для различных b/a : 1 – 1,0; 2 – 1,5; 3 – 2,0

Анализ представленных зависимостей показывает, что величина локального коэффициента формы магнитов прямоугольного сечения определяется в основном их длиной в направлении намагничивания. Зависимость локального коэффициента формы от поперечных размеров выражена зна-

чительно слабее. При изменении b/a от 1,0 до 2,0 различия по величине локального коэффициента формы составляют от 5 до 20%.

Значение магнитной индукции измеряется с помощью тесламетра, использующего зонд с датчиком Холла. Поскольку чувствительный к магнитному полю элемент Холла расположен в зонде на небольшом расстоянии от торцевой поверхности магнита, невозможно измерить магнитную индукцию непосредственно в центре торцевой поверхности (в точке O), поэтому значение магнитной индукции в данной точке следует определять методом экстраполяции.

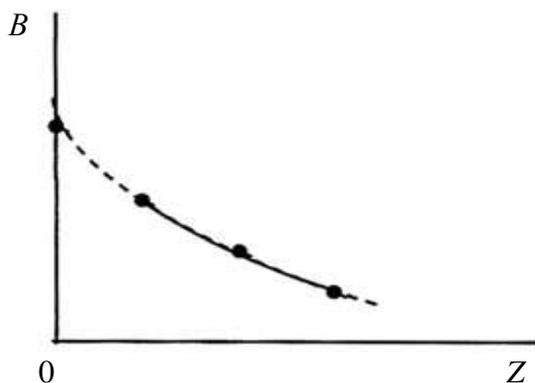


Рис. 3. Характерная зависимость магнитной индукции вдоль оси образца

Для этого надо определить значение магнитной индукции в нескольких точках (трех, четырех), лежащих на прямой, проходящей через точку O перпендикулярно к поверхности образца. По результатам измерений следует построить зависимость $B = f(z)$ и продолжить ее в точку $z = 0$, как показано на рис. 3 пунктирной линией.

Таким образом, для определения значения намагниченности

M образца необходимо измерить магнитную индукцию в точке O и затем воспользоваться сведениями из приведенной таблицы или рис. 2. Для оценки погрешности измерения требуется наличие эталонного магнита с известной намагниченностью. С эталонным магнитом необходимо проделать аналогичные измерения магнитной индукции и рассчитать относительную разницу полученного среднего значения намагниченности в сравнении с истинным значением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцева С. П., Петров А. Н. Теоретическое исследование зависимости баллистического коэффициента размагничивания от геометрических размеров аксиально-намагниченных кольцевых магнитов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун.-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 89–91.

2. Кудрявцева С. П., Петров А. Н. Исследование зависимости локального коэффициента формы от геометрических размеров аксиально-намагниченных кольцевых магнитов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун.-та, 2015. Вып. 19 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 20–24.

3. Кудрявцева С. П. Исследование зависимости локального коэффициента формы от геометрических размеров пластинообразных магнитов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун.-та, 2016. Вып. 20 : Теоретические

и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 23–26.

4. *Игнатьев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А., Страхова Л. Л.* Некоторые аспекты метрологии магнитных свойств нанокompозитных материалов (информационный обзор) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 95–102.

УДК 332

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИННОВАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. Солопов

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: kbkt@renet.ru

В статье рассмотрены теоретические подходы к определению инновационной активности социально-экономических систем, даны характеризующие ее основные понятия, а также направления, позволяющие повысить инновационную активность регионов.

Ключевые слова: инновационная активность, инновационная деятельность, инновационный потенциал, инновационная восприимчивость.

Theoretical Aspects of Innovation Activity Areas

A. A. Solopov

The article deals with theoretical approaches to the definition of socio-economic systems innovation activity. There are defined the main concepts, describing wasps, and directions, enhancing innovative activity of regions.

Key words: innovation activity, innovation, innovative capacity, innovative susceptibility.

В настоящее время для современного мирового хозяйственного развития характерен переход к инновационной экономики. Россия в мировых инновационных процессах занимает место, не соответствующее имеющемуся в стране интеллектуальному и образовательному потенциалу. Разработка и внедрение технологических инноваций отечественными предприятиями в несколько раз ниже, чем в странах Европы. Отдача от реализации технологических инноваций тоже очень низкая, а затраты на них постоянно растут.

Необходимость решения государственных долгосрочных задач хозяйственного развития связана со стимулированием инновационной активности в стране. Переход экономики России в новое качественное состояние сделал еще более актуальной активизацию инновационной деятельности, позволяющей реорганизовать экономику, ускоренно развивать наукоемкое производство.

В настоящее время отечественные компании слабо представлены на мировых рынках высокотехнологичной продукции. Доля инновационных товаров и услуг, произведенных отечественными предприятиями в общемировых объемах экспорта высокотехнологичной и наукоемкой продукции, значительно ниже доли таких стран, как США, Германия и Китай [1].

Если таким образом ситуация будет складываться и дальше, то это приведет к потере перспектив роста национальной конкурентоспособности отечественной наукоемкой продукции, необратимому отставанию при переходе на технологии постиндустриальных укладов [2].

Учитывая вышесказанное, очевидным становится необходимость повышения инновационной активности социально-экономических систем (регионов, федеральных округов и страны в целом).

За последние годы правительством РФ были предприняты значительные усилия по формированию инновационной инфраструктуры и модернизации российской экономики на основе технологических инноваций на различных уровнях.

Но следует отметить, что сложившаяся на сегодня система межбюджетных отношений не направлена на стимулирование региональными органами власти инновационной деятельности. Ни на федеральном уровне, ни на уровне регионов не предусмотрены преференции для инновационно-активных предприятий. Отсутствует это и в федеральном законе о государственных закупках [3]. В соответствии с этим многие предприятия не заинтересованы в собственных разработках инноваций, производстве высокотехнологичной продукции и обновлении основных производственных фондов.

Таким образом, возникает острая необходимость управления инновационной активностью социально-экономических систем на различных уровнях, которая в современных условиях является одной из важнейших составляющих экономической устойчивости территории.

В научной литературе [4–10] понятие инновационной активности широко применяется к предприятиям. Присутствуют отдельные попытки определения данной экономической категории применительно к территории (различного уровня), но общепринятый подход к определению данного понятия не был выработан. Основные определения данного понятия представлены в таблице.

Обобщение взглядов экономистов на понятие «инновационная активность»

Источник	Определение
Руководство Осло	Действия, связанные с разработкой и внедрением новых или усовершенствованных продуктов и технологических процессов, и иные виды инновационной деятельности [4]
Е. В. Сесюнина, О. С. Сухарев	Степень применения инновационного потенциала, отражающего возможность успешного создания и использования нововведения и своевременного освобождения от устаревших технологий [5]
Г. И. Жиц, А. А. Флегонтов	Действия по осуществлению нововведений безотносительно к интенсивности их осуществления, уровню новизны и другим аналогичным характеристикам [6]

Источник	Определение
А. В. Тимерев	Комплексная характеристика инновационной деятельности, включающая степень интенсивности осуществляемых инновационных преобразований и их своевременность, способность мобилизации ресурсов в необходимом количестве и требуемого качества, возможность обеспечения эффективности, прогрессивности и рациональности применяемых методов и технологии инновационного развития [7]
Л. И. Абалкин	Динамичная целенаправленная деятельность по созданию, освоению в производстве и продвижению на рынок продуктовых, процессных, организационных и управленческих нововведений с целью получения коммерческой выгоды и конкурентных преимуществ [8]
О. Н. Мельников, В. Н. Шувалов	Процесс, направленный на воплощение результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений в новый или усовершенствованный продукт, в новый или усовершенствованный технологический процесс, используемый в практической деятельности [9]
И. Ф. Мухарь, К. П. Янковский	Способность к быстрому и эффективному освоению новшеств [10]

Исходя из проведенного аналитического исследования [4–10], можно сделать вывод, что большинство авторов рассматривают инновационную активность с позиции интенсивности внедрения различных инноваций и мобилизации инновационного потенциала территории в условиях нестабильности внешней среды.

Такие исследователи, как Л. И. Абалкин, Г. И. Жиц, А. А. Флегонтов, рассматривают инновационную активность в качестве совокупности определенных мероприятий, которые направлены на достижение определенного результата (повышение конкурентоспособности, укрепление рыночных позиций и т. д.). Но они не определяют и не уточняют субъектов инновационной деятельности, что не позволяет получить достаточно полного представления о содержании применяемых действий и их специфике, а также о применяемых документах.

У многих авторов не указывается цель инновационной деятельности. Такие исследователи, как И. Ф. Мухарь, К. П. Янковский, связывают инновационную активность с инновационной восприимчивостью. Многими авторами данные понятия рассматриваются относительно социально-экономических систем, а исследования сущности данных категорий, их взаимосвязи на уровне региона не производится. Кроме того, рассмотрение инновационной активности только во взаимосвязи с инновационной восприимчивостью территории к различным инновациям не позволяет применить комплексный подход к инновационной активности.

По нашему мнению, с учетом вышесказанного под инновационной активностью следует понимать деятельность промышленных, научных и обра-

зовательных предприятий, объектов инновационной инфраструктуры на мезоуровне, которая направлена на эффективное и полное использование потенциала инновационного развития, повышение инновационной восприимчивости регионов с целью обеспечения роста конкурентоспособности их экономики в условиях усиливающихся процессов глобализации и интеграции.

Данный подход позволяет учесть всех субъектов инновационной активности, взаимосвязь инновационной восприимчивости с инновационным потенциалом. Более того, по нашему мнению, повышение инновационной восприимчивости на региональном уровне будет способствовать развитию новых возможностей эффективного использования инновационного потенциала, что в итоге приведет к росту результатов инновационной деятельности региона.

Как следует из вышесказанного, инновационная активность региона включает в себя инновационный потенциал, инновационную восприимчивость и результат инновационной деятельности. Данные категории не имеют однозначного определения и, следовательно, требуют уточнений.

Развитие инновационной деятельности ведет к необходимости оценки качественной готовности региона к восприятию инноваций. В научной литературе [5–7, 10] понятие инновационной восприимчивости предприятий освещается достаточно часто, но региональному аспекту практически не уделяется внимания. Так, Е. А. Монастырный на основе системного анализа определяет инновационную восприимчивость как один из элементов интегральной оценки инновационного потенциала и формулирует ее как характеристику системы и ее элементов [11].

Г. Н. Гродская рассматривает инновационную восприимчивость как составную часть оценки конкурентоспособности регионов [12].

Можно отметить, что инновационная восприимчивость, с одной стороны, предопределяет возможность перестройки производства, ускорения научно-технического процесса, с другой – сама находится под его воздействием. На уровне региона инновационная восприимчивость зависит от экзогенных и эндогенных факторов.

Экзогенными по отношению к региону являются такие факторы, как уровень конкуренции между инновационно активными предприятиями, государственная инновационная и инвестиционная политика, уровень инновационности регионов-соседей и страны в целом, мобильность научных кадров, спрос на инновации и скорость их диффузии. Эндогенные факторы – это качество региональной инновационной инфраструктуры, содержание региональной научно-технической, инновационной и инвестиционной политики, наличие нормативных и правовых актов, формирующих режим наибольшего благоприятствования для инноваторов и инвесторов.

Понятие инновационного потенциала впервые было введено в [13], под которым авторы понимают способность к восприятию чужих новых идей и имитации новых технологий, разработанных в экономически более развитых странах. На наш взгляд, данная трактовка отражает сущность инновационной восприимчивости, а не инновационного потенциала и сужает

его понятие. Следование данному подходу способно оставить Россию в разряде вечных аутсайдеров. Поэтому только активная наступательная инновационная политика способна обеспечить стране достаточный прорыв в научно-техническом развитии, перевести ее на новый уровень жизни. Такой подход означает, что инновационный потенциал должен определяться способностью самим творить будущее, вырабатывать улучшающие изменения и создавать новые ценности.

Так, И. В. Шляхто рассматривает инновационный потенциал как возможность осуществления новшеств, готовность их воспринять для последующего эффективного использования на уровне, соответствующем мировому [14]. Однако данное определение больше характеризует инновационную восприимчивость, не учитывает инновационную инфраструктуру региона и существующий опыт осуществления инновационной деятельности.

Российские экономисты Ю. А. Бакланова и И. В. Скопина понимают под инновационным потенциалом региона источники, возможности, средства создания условий для оптимизации вклада науки и техники в экономическое развитие за счет внедрения рыночных принципов в эту сферу и ее реструктуризацию [15]. Но данное определение не показывает взаимосвязи инновационного потенциала и принципов функционирования экономики.

Можно отметить, что в [16] инновационный потенциал отождествляют либо с научным, либо с интеллектуальным, либо с технико-технологическим потенциалом. Часто в научной литературе используется ресурсный подход, при котором инновационный потенциал рассматривается как упорядоченная совокупность ресурсов, обеспечивающих осуществление инновационной деятельности субъектом рынка [17, 18]. Такой подход, с одной стороны, позволяет выявить сильные и слабые стороны, оценить текущую ситуацию развития инновационной деятельности, а с другой – ресурсы не могут служить характеристикой инновационного развития, так как не являются гарантией одинаковых экономических результатов в силу различных условий их использования.

Таким образом, анализ существующих трактовок российских и зарубежных ученых позволил уточнить представление о данной экономической категории. Под инновационным потенциалом социально-экономической системы (региона) нами понимается совокупность взаимосвязанных условий и ресурсов, которые обеспечивают, с одной стороны, воспроизводство существующей научно-технической и технологической базы, а также осуществление инновационной деятельности, а с другой – возможность расширенного воспроизводства всей региональной социально-экономической системы.

Рассматривая инновационный потенциал в данном контексте как совокупность науки, бизнеса и инновационной инфраструктуры региона, можно получить представление о состоянии научно-исследовательской сферы и интенсивности проводимых исследований и разработок, а также оценить степень заинтересованности бизнеса в проведении собственных исследований и внедрении передовых технологий.

Устойчивое развитие регионов в долгосрочной перспективе определяется тем, насколько эффективно будет использован инновационный потенциал для повышения конкурентоспособности и усиления позиций на мировых рынках высоких технологий.

Авторский подход к результативной составляющей инновационной активности региона состоит в понимании под ней конечного результата реализации имеющегося потенциала.

Управление инновационной активностью региона осуществляется в рамках инновационной политики, под которой нами понимается составная часть государственной научно-технической политики, представляющая собой совокупность социально-экономических мер органов власти, направленных на формирование условий для создания новых и развития существующих субъектов инновационной деятельности с целью производства конкурентоспособной инновационной продукции.

Главной задачей инновационной политики является реальное превращение инновационного потенциала в основной фактор, обеспечивающий переход экономической системы региона на инновационный путь развития [19].

Изучая региональные концепции и программы развития субъектов Российской Федерации [20], можно выделить следующие общие положения:

- создание инновационной инфраструктуры региона, включающей инновационные центры, бизнес-инкубаторы, технопарки, центры трансфера технологий;

- подготовка и переподготовка кадров (особенно управленческого звена) для инновационной сферы;

- информационное обеспечение инновационной деятельности региона с целью формирования его инвестиционного имиджа и повышения инновационной активности предприятий.

На практике региональным органам власти необходимо поддерживать текущую конкурентоспособность действующих крупнейших предприятий региона, являющихся налогоплательщиками и работодателями.

Основными целями региональных программ должны быть:

- модернизация материально-технической базы научных, исследовательских, образовательных учреждений для повышения фундаментальных и прикладных исследований;

- развитие сектора исследований и разработок, а также повышение его конкурентоспособности;

- содействие увеличению вклада науки в развитие экономики региона и в решение важнейших социальных задач.

Для достижения данных целей необходимо выполнение ряда задач:

- развитие инновационной инфраструктуры, способной обеспечить создание цепочки потребителей инновационной деятельности;

- формирование и развитие региональных инновационных кластеров, осуществляющих полный инновационный цикл;

–создание образовательно-инновационного комплекса, состоящего из предприятий сферы инкубирования высокотехнологичных и наукоемких технологий, а также предоставляющего инновационные образовательные услуги по заказам компаний.

Таким образом, анализ подходов к повышению инновационной активности и системы управления ей на уровне региона позволяет нам говорить о необходимости осознания бизнес-сообществом и региональными органами власти технической и технологической модернизации и, как следствие, перехода от фрагментарных отраслевых программ к комплексной программе развития высоких технологий в долгосрочной перспективе. Региональными органами власти должна проводиться работа по повышению уровня инновационной восприимчивости региона, изучению и подготовке площадок для осуществления крупных инновационных проектов в реальном секторе экономики, а также формироваться взаимосвязанная инфраструктура региональной инновационной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г. : распоряжение Правительства РФ от 8 дек. 2011 г. URL : <http://base.garant.ru/70106124/> (дата обращения : 19.10.2016).
2. Стратегия развития науки и инноваций в Российской Федерации на период до 2015 г. : утв. Межвед. комис. по науч.-инновац. политике (протокол от 15 фев. 2006 г. № 1). URL: <http://base.garant.ru/198072/> (дата обращения : 19.10.2016).
3. О размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципальных нужд : федер. закон принят Государственной Думой РФ от 21 июня 2005 г. // Собрание законодательства РФ. Ст. 3105. URL : <http://base.garant.ru/5228941/> (дата обращения : 21.10.2016).
4. Руководство Осло. Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. URL : http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/science/ (дата обращения : 25.10.2016).
5. *Сесюнина Е. В., Сухарев О. С.* Инновационная активность предприятия – фактор его устойчивого развития // Инновационные процессы в управлении предприятиями и организациями : сб. ст. II Междунар. науч.-прак. конф. Пенза, 2003. С. 168–170.
6. *Жиц Г. И., Флегонтов А. А.* Об инновационной активности и факторах, определяющих ее уровень на промышленных предприятиях // Инновационная деятельность. 2009. № 2(7). С. 11–17.
7. *Тимерев А. В.* Формирование комплексного механизма оценки эффективности инновационной деятельности предприятия : автореф. дис. ... канд. экон. наук. Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 8 с.
8. *Абалкин Л. И.* Логика экономического роста. М. : Ин-т экономики РАН, 2002. 228 с.
9. *Мельников О. Н., Шувалов В. Н.* Инновационная активность как фактор повышения конкурентоспособности предприятия // Российское предпринимательство. 2005. № 9(69). С. 100–104.
10. *Янковский К. П., Мухарь И. Ф.* Организация инвестиционной и инновационной деятельности : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2001. 448 с.
11. *Монастырский Е. А.* Термины и определения в инновационной сфере // Инновации. 2008. № 2(112). С. 28–33.

12. Гродская Г. Н. Инновационная конкурентоспособность региона : оценка концепции развития. Самара : Изд-во Самар. эконом. ун-та, 2008. 163 с.
13. Freeman C., Soete L. The Economics of Industrial Innovation. URL : <https://www.amazon.com/Economics-Industrial-Innovation-3rd/dp/0262561131> (дата обращения : 09.10.2016).
14. Шляхто И. В. Оценка инновационного потенциала региона // Управление общественными и экономическими системами. 2007. № 1. С. 5–11.
15. Бакланова Ю.О., Скопина И. В. Планирование проекта управления региональными инновациями (на примере Кировской области) // Региональная экономика и управление : электронный научный журнал. 2011. № 1(25). URL : <http://region.mcnip.ru> (дата обращения : 09.10.2016).
16. Москвина О. С. Определение уровня технологического уклада в экономике региона. // Вестн. Челяб. гос. ун-та. Экономика. 2010. Вып. 23. С. 53–56.
17. Туманян И. В., Туманян И. В, Ушвицкий Л. И. К вопросу о реализации инновационного потенциала региона // Региональная экономика. 2008. №14(71). С. 17–21.
18. Калюжнова Н. Я. Конкурентоспособность регионов в условиях глобализации. М. : ТЕИС, 2003. 526 с.
19. Байрамукова А. С.-Х. Механизмы развития инновационного потенциала региона // Экономические исследования. 2011. № 5. URL : <http://cyberleninka.ru/article/n/mechanizmy-razvitiya-innovatsionnogo-potentsiala-regiona> (дата обращения : 09.10.2016).
20. О Программе социально-экономического развития Пермского края на 2009–2012 г. и на период до 2017 г. : проект закона Пермского края. URL : <http://base.garant.ru/16115847/> (дата обращения : 17.10.2016).

УДК 330.4:51-77

ЭКОНОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКИ ПО КРАТКОСРОЧНЫМ КРЕДИТАМ

А. Д. Шаталова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Россия, 125993, Москва, Ленинградский проспект, 49
E-mail: al.schatalowa@yandex.ru

Построена эконометрическая модель на основе анализа факторов, влияющих на процентную ставку по краткосрочным кредитам. Разработанная модель может быть использована для прогнозирования значений процентной ставки по краткосрочным кредитам.

Ключевые слова: эконометрическая модель, процентная ставка, краткосрочный кредит, санкция, регрессионный анализ.

Econometric Models for Forecasting Interest Rates on Short-term Loans

A. D. Shatalova

An econometric model was constructed based on the analysis of factors influencing the interest rate on short-term loans. The model developed during research can be used for forecasting of possible values of an interest rate on short-term loans.

Key words: econometric model, interest rate, short-term loan, sanction, regression analysis.

Каждый день на рынке кредитования появляются новые предложения с теми или иными условиями. По срокам кредиты бывают краткосрочными, среднесрочными и долгосрочными.

Факт, что изменение курса доллара имеет большое влияния на экономику нашей страны, не вызывает сомнений. Следовательно, изучив статистику курса доллара и процентные ставки по кредитам до 30 дней, можно предположить, что курс доллара имеет влияние на процентные ставки.

Для выяснения характера взаимосвязи курса доллара и процентных ставок по краткосрочным кредитам была построена диаграмма рассеивания (рис. 1) с помощью «Мастер диаграмм» Excel [1, 2].

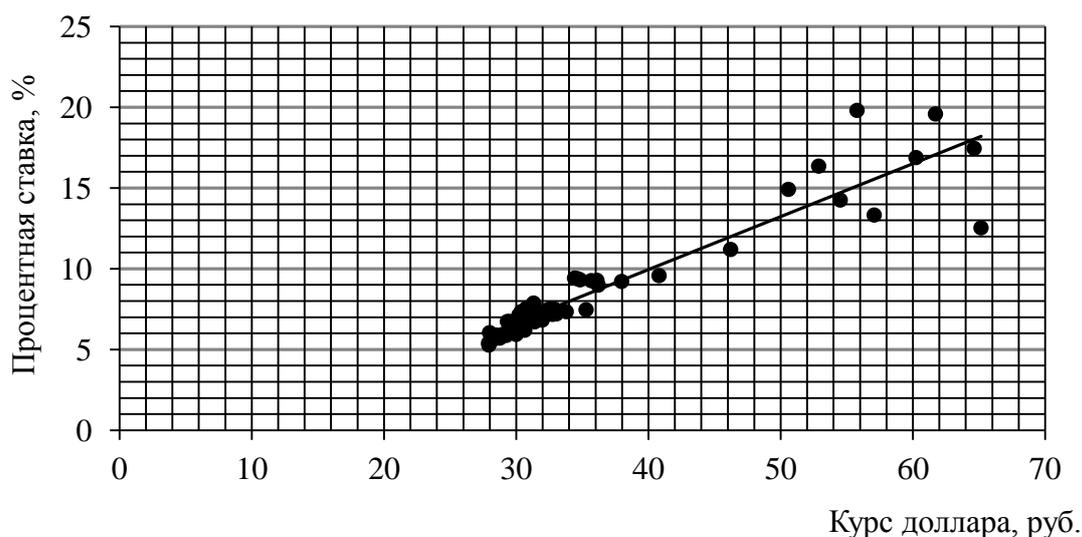


Рис. 1. Диаграмма рассеивания

Анализируя полученную диаграмму рассеивания в пределах значений курса доллара 28–38 руб., можно представить зависимость рассматриваемых показателей линейной функцией

$$Y = a_0 + a_1X,$$

где Y – значение средневзвешенных процентных ставок по кредитам до 30 дней (включая «до востребования»), предоставленных кредитными организациями нефинансовым организациям в рублях (% годовых) [1]; a_0 , a_1 – неизвестные параметры; X – значение курса доллара в рублях [2].

Спецификация примет вид

$$Y_t = a_0 + a_1X + u_t, \tag{1}$$

где Y_t – текущая процентная ставка; X_t – текущее значение курса доллара; u_t – случайная величина (возмущение), которая включает в себя совокупность не включенных в модель факторов, а также ошибки измерения.

Спецификация (1) является линейной, поэтому оценим ее методом наименьших квадратов, используя функцию «ЛИНЕЙН» из категории

формулы «Статистические» Microsoft Excel [3]. Результат вычисления приведен в табл. 1, где \tilde{a}_1 и \tilde{a}_0 – оцененные значения a_1 и a_0 , $S_{\tilde{a}_1}$ и $S_{\tilde{a}_0}$ – стандартные значения ошибок для коэффициентов \tilde{a}_1 и \tilde{a}_0 соответственно, R_1^2 – коэффициент детерминации спецификации (1), δ_u – стандартная ошибка u_t , F – значение статистики, V_2 – количество степеней свободы, $\sum (y_t - \tilde{y})^2$ – регрессионная сумма квадратов, $\sum (\tilde{y}_t - \bar{y})^2$ – остаточная сумма квадратов.

Таблица 1

Значение параметров для спецификации (1)

Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение
\tilde{a}_1	0,33749	\tilde{a}_0	-3,40478
$S_{\tilde{a}_1}$	0,01529	$S_{\tilde{a}_0}$	0,40478
R_1^2	0,82976	δ_u	1,16391
F_1	487,13463	V_2	54
$\sum (y_t - \tilde{y})^2$	659,90994	$\sum (\tilde{y}_t - \bar{y})^2$	73,15254

Тогда получим спецификацию (1) в оцененном виде [3]:

$$y = -3,41 + 0,337 \times X_t + u_t. \quad (2)$$

Далее с помощью F -теста определим качество спецификации (1). Для этого необходимо сравнить значения двух величин: статистики $F_1 = 487,13$ (см. табл. 1) и $F_{\text{крит1}}$ ($(1-\alpha)$ -квантиль распределения Фишера). $F_{\text{крит1}}$ найдем с помощью функции F.ОБР.ПХ (формулы «Статистические» Microsoft Excel):

$$F_{\text{крит}} = \text{F.ОБР.ПХ}(\alpha; V_1; V_2), \quad (3)$$

где α – уровень значимости; V_1, V_2 – количество степеней свободы.

Задавая $\alpha = 5\%$ и $V_1 = k = 1$, $V_2 = n - (k + 1) = 54$ (k – количество регрессоров в спецификация), n – объем статистики ($n = 56$), для спецификации (1) получим

$$F_{\text{крит1}} = \text{F.ОБР.ПХ}(0,05; 1; 54) = 4,02.$$

Итак, $F_1 > F_{\text{крит1}}$, следовательно, спецификация (1) является качественной [3].

Однако в момент, когда начинается резкий рост курса доллара, характер линии тренда становится нелинейным. В связи с этим необходимо ввести еще одну переменную – S (санкция). Это фиктивная переменная, так

как S не поддается количественному измерению. Поэтому используем бинарные переменные, принимающие значения «0» или «1» в зависимости от наличия или отсутствия данного признака в конкретном наблюдении. Например, переменная «в этом месяце были санкции» принимает значение 1, в противном случае – 0. Тогда уравнение, описывающее значение процентной ставки в пределах курса доллара от 28 до 65 (см. рис. 1), примет вид

$$Y = a_0 + a_1X + a_2S,$$

где a_2 – неизвестный параметр при S .

Запишем уравнение предлагаемой спецификации множественной регрессии:

$$Y_t = a_0 + a_1X + a_2S_t + u_t, \quad (4)$$

где S_t – значение санкции в момент времени t .

Спецификация (4) также является линейной, поэтому оценим ее аналогично спецификации (1) (табл. 2).

Таблица 2

Значение параметров для спецификации (4)

Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение
\tilde{a}_2	1,545687	\tilde{a}_1	0,285569	\tilde{a}_0	-4,98571
$S_{\tilde{a}_2}$	0,466459	$S_{\tilde{a}_1}$	0,021713	$S_{\tilde{a}_0}$	0,693478
R_2^2	0,916373	δ_u	1,083825	–	Нет данных
F_2	290,3817	V_2	53	–	Нет данных
$\sum (y_t - \tilde{y})^2$	682,2092	$\sum (\tilde{y}_t - \bar{y})^2$	62,25785	–	Нет данных

Тогда получим спецификацию (4) в оцененном виде:

$$y = -4,986 + 0,286 \times X_t + 1,546 \times S_t + u_t. \quad (5)$$

На следующем шаге выясним, является ли спецификация (4) качественной. Из табл. 2 значение статистики $F_2 = 290,3817$ и формулы (3) – $F_{\text{крит}2} = 3,17$.

Получается, что $F_2 > F_{\text{крит}2}$, следовательно, спецификация (4) является качественной [3], т. е. регрессоры X и S в рамках линейной спецификации (4) обладают способностью объяснять значения эндогенной переменной Y .

Итак, проведенные выше вычисления показали, что обе спецификации (1) и (4) являются качественными. На следующем шаге выясним, явля-

ется ли добавление такой переменной, как санкция, значимым. Для этого найдем скорректированные коэффициенты детерминации \tilde{R}_1^2 и \tilde{R}_2^2 [4] для спецификаций (1) и (4) по формуле

$$\tilde{R}_i^2 = 1 - (1 - R_i^2) \times \frac{n-1}{n - (k+1)}. \quad (6)$$

Используя данные табл. 1, 2, получим скорректированный коэффициент детерминации:

– для спецификации (1):

$$\tilde{R}_1^2 = 1 - (1 - 0,82976) \times \frac{56 - 1}{56 - (1 + 1)} = 0,89;$$

– для спецификации (4):

$$\tilde{R}_2^2 = 1 - (1 - 0,916) \times \frac{56 - 1}{56 - (2 + 1)} = 0,913.$$

Таким образом, $\tilde{R}_1^2 (= 0,89) < \tilde{R}_2^2 (= 0,913)$. Это значит, что при добавлении в спецификацию (1) такого фактора, как санкция, скорректированный коэффициент детерминации увеличился, следовательно, указанное добавление является весомым [4].

Для того чтобы полученные по методу наименьших квадратов (МНК) оценки обладали некоторыми полезными статистическими свойствами, необходимо выполнение ряда предпосылок относительно оцениваемой модели, которые называются условиями Гаусса–Маркова.

При проверке спецификации (4) на выполнение условий теоремы Гаусса–Маркова выяснилось, что условие о равенстве нулю математического ожидания случайного остатка выполняется. Следовательно, случайная величина не имеет систематического смещения. Однако второе условие этой теоремы (дисперсия случайной составляющей постоянна для всех наблюдений), которое проверялось с помощью теста Голдфелда–Квандта, не выполнилось. Значит, имеет место гетероскедастичность (неоднородность наблюдений, выражающаяся в непостоянной дисперсии случайной ошибки спецификации (4)).

Третье условие (случайные составляющие спецификации для различных наблюдений некоррелированы), которое проверялось с помощью теста Дарбина–Уотсона, выполняется, что свидетельствует об отсутствии систематической (статистической) связи между значениями случайного члена в любых двух наблюдениях. Можно также отметить, что оценки коэффициентов спецификации (4), полученные по МНК, являются эффективными.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Процентные ставки по краткосрочным кредитам, безусловно, зависят от курса доллара. Для более точного расчета процентных ставок по краткосрочным кредитам в экономике России в спецификации (4) необходимо учесть по крайней мере еще один параметр. Таким параметром, например, может стать инфляция.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Средневзвешенные процентные ставки по кредитам, предоставленным кредитными организациями физическим лицам и нефинансовым организациям в рублях. URL : http://www.cbr.ru/statistics/print.aspx?file=b_sector/dii_rates_2-7_13.htm (дата обращения : 21.05.2016).
2. Динамика официального курса заданной валюты. URL : http://www.cbr.ru/currency_base/dynamics.aspx?VAL_NM_RQ=R01235&date_req1=01.01.2011&date_req2=31.08.2015&rt=1&mode=1 (дата обращения : 21.05.2016).
3. *Бывшев В. А.* Эконометрика : учеб. пособие. М. : Финансы и статистика, 2008. 480 с.
4. Эконометрика : учебник для вузов / под ред. проф. Н. Ш. Кремера. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 311 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УДК 53(091), 53(092)

МАГНИТОБИОЛОГИЯ И МАГНИТОТЕРАПИЯ: «КАРМИЛОВСКИЙ» ПЕРИОД

В. М. Аникин

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru

Освещаются страницы истории развития магнитобиологии и магнитотерапии, связанные с именем Владимира Ивановича Кармилова, учителя и друга академика Николая Николаевича Семёнова.

Ключевые слова: Владимир Иванович Кармилов, Николай Николаевич Семёнов, магнитобиология, магнитотерапия.

Magneto Biology and Magneto Therapy: Karmilov's Period

V. M. Anikin

Some pages of history of magneto biology and magneto therapy, related to Vladimir I. Karmilov are presented. He was a teacher and friend of academician Nikolai N. Semenov.

Key words: Vladimir I. Karmilov, Nikolai N. Semenov, magneto biology, magneto therapy.

В наши дни магнитотерапия является одной из основных форм физиотерапии. Целенаправленные работы в этой области в нашей стране активизировались с конца 30-х гг. прошлого века. В 1983 г. для координации деятельности по магнитобиологии и магнитотерапии, которая велась в 67 научных центрах страны, была создана Проблемная комиссия Министерства здравоохранения СССР «Магнитобиология и магнитотерапия в медицине». Комиссию возглавил профессор Витебского медицинского института Анатолий Марьянович Демецкий (1921–2002), заведующий кафедрой оперативной хирургии и топографической анатомии¹. В задачу комиссии входило обобщение данных о механизмах лечебного действия магнитных полей в зависимости от формы, стадии и тяжести патологических процессов в организме человека, разработка научно обоснованных рекомендаций по использованию магнитных полей для профилактики, диагностики и лечения заболеваний. Вот что говорил А. М. Демецкий об инициаторах широкого использования магнитотерапевтических методов в интервью газете «Советская культура»:

«... В настоящее время накопилось достаточно много данных, свидетельствующих, что магнитные поля низкочастотного диапазона оказывают активное влияние на организм, вызывая в нем различные физико-химические изменения. Изучением этого влияния занимаются сегодня многие научные центры страны. <...>

¹ См.: Витебский медицинский институт. URL: http://www.surgery.by/pdf/full_text/2011_6_23_ft.pdf (дата обращения : 17.11.2016).

О лечебном действии магнитов было известно давно. <...> Многие известные медики прошлого отдали в свое время дань магнитотерапии. Среди них, в частности, французский невропатолог Ж. М. Шарко и замечательный русский клиницист С. П. Боткин, указывавшие на успокаивающее действие магнитов на нервную систему. А в конце XIX века известный французский физик Дюрвиль открыл в Париже первую школу лечебного магнетизма. Он издал книгу об этом методе, которая, кстати, была переведена в России. В книге можно найти описание приборов для лечения ряда воспалительных заболеваний – радикулитов, невритов и т. п., которые не утратили своей актуальности и по сей день.

Однако в начале XX века применение магнитного поля в физиотерапии было вытеснено более мощными средствами электротерапии. И только в 40-х годах специалисты вновь вернулись к магнитолечению <...> благодаря работам сотрудников Пермского медицинского института В. Кармилова, М. Могендовича и других, успешно применявших магниты для лечения ряда кожных заболеваний, заживления ран, ликвидаций последствий травм и т. п.» [1, с. 4].

Пионерский вклад В. И. Кармилова в развитие магнитобиологии и магнитотерапии в нашей стране отметил в своей книге «Мозг в электромагнитных полях» один из ведущих магнитобиологов страны доктор биологических наук, профессор Юрий Андреевич Холодов (1931–2002):

«Продолжая «магнитную» линию рассказа, я должен переместиться на полвека вперед, к 1948 г., когда в Перми был опубликован сборник «Биологическое и лечебное действие магнитного поля и строго-периодической вибрации» под редакцией физика В. И. Кармилова, физиолога М. Р. Могендовича и клинициста А. В. Селезнева. Через год в СССР была защищена первая кандидатская диссертация по магнитобиологии Р. Г. Скачедуб, посвященная влиянию магнитного поля на проницаемость мышечной ткани. Тогда еще не писали авторефератов диссертаций, и о самом факте защиты мне удалось недавно услышать из уст самого автора. Через два года после этого в Перми появилась вторая кандидатская диссертация по магнитобиологии. О. С. Шерстнева назвала ее «Об изменениях фагоцитоза под влиянием магнитного поля, электронаркоза и химического наркоза». При воздействии магнитного поля на голову кролика отмечали увеличение фагоцитарной активности лейкоцитов периферической крови. Следовательно, в условиях целостного организма магнитное поле оказывает влияние на свойства крови прежде всего через центральную нервную систему.

Пермский период в развитии магнитобиологии закончился в начале 50-х годов из-за смерти инициатора этих исследований В. И. Кармилова. Остались от этого периода две диссертации, сборник и несколько статей. Прошло еще 8 лет, прежде чем в МГУ была защищена диссертация автором этих строк. Она была третьей кандидатской диссертацией по магнитобиологии в СССР и имела название "К физиологическому анализу действия магнитных полей на животных"» [2, с. 8].

Речь в приведенных отрывках идет о научном сборнике [3], изданном в Перми. Исследования же влияния магнитного поля на организм человека в Перми продолжались и после смерти В. И. Кармилова. Об этом можно судить, скажем, по тому факту, что дискуссия по проблемам магнитобиологии, материалы которой были опубликованы в журнале «Наука и жизнь» [4], проходила с участием пермских медиков, включая Р. Г. Скачедуб. История применения магнитного поля в лечебных целях рассматривается также в [5], где отмечается, что «становление отечественной магнитотерапии как физиотерапевтического метода связано с именем В. И. Кармилова (1938 г.)» [5, с. 42]. В период Великой Отечественной войны синусоидальным магнитным полем лечили раненых в госпиталях. Аппараты и методика лечения В. И. Кармилова «оказали существенное влияние на развитие медицинских методик и на разработку аппаратуры магнитотерапии в ряде стран» [5, с. 42].

В. И. Кармилов: страницы биографии

Имя Владимира Ивановича Кармилова стало широко известно в 1948 г., но не только благодаря опубликованной книге [6]. 16 марта 1948 г. в газете «Пионерская правда» под рубрикой «Рассказы о школьном учителе» была опубликована статья академика Николая Николаевича Семёнова, создателя нового направления в науке – химической физики, будущего Нобелевского лауреата по химии [7, 8]. Заметка начиналась словами «Я хочу рассказать, какую роль сыграл в моей жизни учитель Владимир Иванович Кармилов».

Удивительное знакомство состоялось осенью 1912 г., когда в выпускном классе Самарского реального училища, где учился юный Николай Семёнов, появился новый учитель физики, выпускник физико-математического Казанского университета Владимир Кармилов.

Начало XX столетия было ознаменовано интересными и важными открытиями в физике, и новый учитель открыл перед реалистами увлекательный мир науки. Николай Семёнов буквально «загорелся» физикой, он и несколько его друзей в дополнение к школьным занятиям устроили у Семёновых «домашний университет», руководителем и душой которого стал молодой преподаватель.

Семёнова и Кармилова, возможно, сблизило и то обстоятельство, что они были земляками. Семёнов родился в Саратове 3(15) апреля 1896 г., а Кармилов – в конце 1889 г. в одной из слобод Аткарского уезда Саратовской губернии. Его отцом был сельский учитель, который вскоре, как он выразился в своих воспоминаниях (они хранятся в семье Кармиловых),



Владимир Иванович Кармилов, выпускник Казанского университета, 1912 г.

«ушел в духовное звание», одновременно являясь преподавателем церковно-приходских школ в Хвалынском и Кузнецком уездах, а с августа 1915 г. – в городе Аткарске.

В 1913 г. Семёнов поступил в Петербургский университет, а летом 1914 г. он и Кармилов отправились в далекое путешествие на Алтай. Родители юного студента не возражали, так как были уже достаточно хорошо знакомы с Владимиром Ивановичем, доверяли ему и отпустили сына, по выражению Людмилы Владимировны Кармиловой, дочери В. И. Кармилова, на неизведанный, далекий и дикий (по тем временам) Алтай. Поездку эту подробно описал В. И. Вардугин в своей книге об академике Н. Н. Семёнове «Тайна огня» [6, с. 65–67]. В итоге поездки родилась совместная «охотничья» фотография Семёнова и Кармилова, сделанная в Самаре после возвращения с Алтая.



В. И. Кармилов (справа) и Н. Н. Семёнов. Самара, 1914 г.

Впервые приведенные фотографии были опубликованы в книге В. И. Вардугина [6], а получил он их в сентябре 1983 г. от Л. В. Кармиловой.

Пермский период жизни Владимира Ивановича Кармилова ознаменован работой в Государственном университете, Педагогическом институте и в Медицинском институте (с 1938 г.), где он до конца жизни заведовал кафедрой физики. О стиле Кармилова как воспитателя и педагога его дочь Людмила Владимировна Кармилова рассказывала так (1983 г.)²:

«Отец мой был человек очень мягкий, крайне деликатный и очень добрый. В общении со мной и братом он был очень заботлив, направлял наши занятия, чтение, причем он никогда не подавлял нас своим авторитетом, никогда в отношении к детям не было ничего похожего на назидания и поучения.»

² Фраза из письма Людмилы Владимировны Кармиловой саратовскому журналисту, автору книги о Николае Николаевиче Семёнове «Тайна огня» [6] Владимиру Ильичу Вардугину от 5–7 сентября 1983 г. Приводимые воспоминания Л. В. Кармиловой взяты из этого письма.

Думаю, что так же было и со студентами. Он умел просто и очень увлекательно объяснять самые сложные вещи любой аудитории, т. к. очень чувствовал аудиторию – ее уровень, настроение и еще потому, что все, о чем он говорил, было «пропущено через нутро». К любой лекции он всегда готовился, дополняя каждый раз ее новыми данными. Он знал и любил литературу, искусство, очень интересовался биологией, а астрономия со студенческих времен осталась его всегдашней любовью. С 1927 года он был членом Общества любителей мирозведения, был создателем Всесоюзного астрономогеодезического общества в Перми, много энергии и сил вложил в организацию в городе места для астрономических наблюдений.



В. И. Кармилов в годы работы в Пермском университете [9]

Речь отца была одновременно простой и очень образной, рассказывал он увлеченно, с огромной верой в науку. Вспоминаю, что после одной из лекций, в которой речь шла о Вселенной, возможности межпланетных полетов, работах Циолковского, я спросила его (это было в середине 30-х годов), неужели он верит в то, человек когда-то достигнет, скажем, Луны. Он отвечал (очень убежденно!), что он, конечно, до этого не доживет, но уверен, что мы (дети) будем свидетелями таких полетов. Мне тогда казалось, что папа слишком романтик и идеалист!

Мне кажется, что не только с реалистами, но и со студентами университета, пединститута, рабфака он всегда держал себя как старший товарищ. Многие приходили к нам домой – советоваться по учебным, научным, житейским вопросам. Думаю, что, наверное, для многих он был не только педагогом-предметником, но и учителем Жизни, хотя он всегда держался очень скромно и не считал себя каким-то особенным человеком».

В Пермском медицинском институте развернулась активная научная и изобретательно-конструкторская деятельность Владимира Ивановича Кармилова в области магнитологии и магнитотерапии. Ее результаты были систематизированы в книге [3]. В. И. Кармилов написал для этого сборника цитируемые до настоящего времени статьи «К истории вопроса о биологическом и лечебном действии магнитного поля», «Аппаратура, методика лечебного применения и дозировка магнитного поля», «Электромагнитный вибратор». В книге представлена целостная, логически выстроенная работа: обоснована ее актуальность, проанализировано состояние проблемы, выверены оптимальные характеристики магнитного поля, дано конструкторское решение магнитотерапевтического устройства. Вот мнение Л. В. Кармиловой (из вышеупомянутого письма):

«Думаю, что, кроме человеческих качеств, людей к отцу привлекала еще его увлеченность наукой. Он много занимался, одним из первых в Союзе, магнитобиологией и магнитотерапией; первые приборы делал своими

руками и с помощью механика его кафедры, все это было при нищенском оснащении периферийных вузов приборами, даже самыми элементарными. В то время мало кто верил в существование таких эффектов, и только с 60-х годов, в связи с развитием космонавтики, космической медицины и т. д. такие исследования стали вестись широко».

Имея довоенный опыт создания медицинских электромагнитов, Кармилов в годы войны нашел им применение в пермских госпиталях. После войны Кармилов продолжил работу в области магнитотерапии с участницей войны хирургом Александрой Александровной Тюряевой, возглавившей в 1954 г. физиотерапевтическое отделение Пермской железнодорожной больницы, где она начала широко использовать методы магнитотерапии. Эта работа привела, в частности (к сожалению, уже после смерти Владимира Ивановича), к созданию запатентованных магнитотерапевтических устройств по воздействию магнитным полем на биологически активные точки человеческого тела.

Свидетельством массового использования электромагнитных устройств в Перми в те годы служит обращение В. И. Кармилова к выпускникам Медицинского института с призывом использовать при проведении физиотерапевтических процедур и электромагнитные вибраторы:

«Дорогие товарищи, молодые врачи!

Каждый новый выпуск врачей является праздником для нас, работников института, работающих как на клинических, так и на теоретических кафедрах.

Пять лет прошло с тех пор, как вы изучали физику. За это время вы многое узнали о человеческом организме, убедились, что в нем происходят механические, тепловые, электромагнитные процессы. Вы наблюдали, с каким превосходным лечебным эффектом можно влиять на организм физическими факторами. <...>

Не забывайте о возможности осуществлять вибрации при помощи простейшего электромагнитного вибратора, который был продемонстрирован на занятиях по физике. Эти вибраторы имеются в больницах области, имеются и в облздравотделе, откуда их можно получить. <...>

Кафедры физики, физиологии, терапии обеспечат вас технической консультацией, консультацией по вопросам физиологического и специально-лечебного характера.

Вы молоды и полны энергии. Вам нельзя отрывать от научной жизни института. Мы ждем Ваших запросов, писем, личных посещений. Вы теперь не студенты, а наши товарищи по научной и практической работе. Давайте же вести эту работу вместе, в едином коллективе» [10, с. 3].

Интересно отметить, что трудовой стаж В. И. Кармилова согласно его трудовой книжке составил 49 лет и 4 месяца: работа по найму до поступления в Молотовский (Пермский) медицинский институт – 22 года и 1 месяц, служба в Красной Армии – 1 год; работа в медицинском институте до «исключения из списка работников по случаю смерти» 19 октября 1954 г. – 16 лет 3 месяца.

Даты жизни В. И. Кармилова

1889 г. – в семье Ивана Ивановича (Иоанна Иоанновича) Кармилова в слободе Баланда Аткарского уезда Саратовской губернии родился второй сын – Владимир (всего в семье было 10 детей).

1903 г. – окончание Петровской духовной школы.

1903–1906 гг. – обучение в Саратовской духовной семинарии.

1912 г. – окончание физико-математического факультета Казанского университета. Начало работы в Самарском реальном училище.

1912 г., сентябрь – знакомство и начало многолетней дружбы с Николаем Николаевичем Семёновым.

1914 г., лето – поездка с Н. Н. Семёновым на Алтай. Уход в армию вольноопределяющимся.

1915 г. – выход книги В. И. Кармилова «Значение математики в познании мира и новые области ее приложения. Возможность предсказания войн» (Самара).

1918–1922 гг. – работа в Новониколаевском (Новосибирском) институте народного образования [9].

1923–1930 гг. – преподаватель Пермского рабфака, председатель физико-математической предметной комиссии рабфака, председатель бюро заочного обучения при Пермском рабфаке (число заочников доходило до 300 человек, среди них преимущественно были партийные работники).

1925–1927 гг. – публикация (в соавторстве с В. А. Глинковым и В. А. Кинтцелем) «Сборника упражнений по физике и механике применительно к программе рабочих факультетов, техникумов и школ II ступени». Ч. 1, 2.

1930–1946 гг. – публикация учебных пособий, статей по методике преподавания физики в центральных журналах, популярных статей в местных газетах.

С 1930 г. – преподаватель Педагогического института (первоначально это был педагогический факультет Пермского университета) [9].

1933–1934 гг. – декан физико-математического факультета Пермского университета.

1938 г., 25 июля – 1954 г., 18 октября – заведующий кафедрой физики Пермского медицинского института, научная и конструкторская деятельность в области магнитобиологии и магнитотерапии. Применение магнитотерапевтических методов в пермских госпиталях и больницах.

1945 г. – выход книги В. И. Кармилова «О небесных светилах» (г. Молотов, ныне – г. Пермь).

1948 г., 16 марта – опубликование статьи Н. Н. Семёнова [7, 8] о В. И. Кармилове.

1948 г. – выход в свет книги [3].

1949 г., 3 декабря – защита на Ученом совете Казанского государственного университета диссертации «К вопросу определения напряженности поля ультравысокой частоты плоского конденсатора» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

1954 г., 18 октября – смерть В. И. Кармилова.

Вместо послесловия

Как представляется, обе компоненты жизни В. И. Кармилова – научная и педагогическая – оказались необыкновенно плодотворными. Его инновационная деятельность (рождение востребованных идей и их практическое применение) дала старт новому витку магнитобиологических исследований и разработке магнитотерапевтических методик. Педагогический же дар способствовал не только появлению увлеченных специалистов-физиков и специалистов-медиков, но и становлению корифея российской науки, которым без всякого преувеличения является Николай Николаевич Семёнов.

Кстати, проблема пробуждения интереса к будущей профессии, к конкретной области знаний является важнейшей во все времена. Разрабатываются различные методики, способствующие через яркие впечатления и удивление (почерпнутые, в частности, из истории, философии и методологии науки) пробуждению естественной человеческой любознательности и ее трансформации в движущую силу познания (см., например [11–23]).

Свои воспоминания о Кармилове-учителе Н. Н. Семёнов закончил словами: «Мы остались с ним друзьями на всю жизнь». Талант, увлеченность наукой и личный пример самого Владимира Ивановича Кармилова не могли не сказаться на выборе жизненного пути и его собственными детьми – дочерью Людмилой и сыном Борисом. Оба они поступили в институты физического профиля. С началом Великой Отечественной войны Борис ушел на фронт пулеметчиком, но вскоре погиб. А вот Людмила Владимировна Кармилова (1920–1995) около 50 лет проработала в области физико-химии полимеров в созданном Н. Н. Семёновым Институте химической физики Академии наук. Там же работали ее сын Андрей Юрьевич Кармилов (1950–2010) и внук Илья Андреевич Кармилов (р. 1975).

Вышла семейная хроника девяти генеалогических ветвей Кармиловых, родоначальником одной из которых является Владимир Иванович Кармилов [24].



Семья Кармиловых: Владимир Иванович с супругой Екатериной Михайловной, дети Людмила и Борис (1930-е гг.)

В последнее время новые данные о В. И. Кармилове опубликованы в материалах, посвященных гениальному российскому физику Н. Н. Семёнову, 120-летие со дня рождения которого и 60-летие присуждения ему Нобелевской премии отмечались в 2016 г. [25–28].

Автор благодарит Илью Андреевича Кармилова и Владимира Ильича Вардугина за предоставленные документальные материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демецкий А. М. Загадки «волшебного камня» // Сов. культура. 1984. 24 марта. № 36 (5824).
2. Холодов Ю. А. Мозг в электромагнитных полях. М. : Наука, 1982. 123 с. (Научно-популярная сер.).
3. Биологическое и лечебное действие магнитного поля и строго-периодической вибрации (экспериментальные и клинические материалы) : сб. ст. / под ред. доц. В. И. Кармилова, проф. М. Р. Могендовича и проф. А. В. Селезнева. Молотов : Молотовгиз, 1948. 168 с.
4. Жизнь и магнитное поле // Наука и жизнь. 1961. № 7. С. 76–90.
5. Соловьева Г. Р. Аппаратура и области применения низкочастотной магнитотерапии // Медицинская техника. 1974. № 3. С. 41–46.
6. Вардугин В. И. Тайна огня : [Повесть о Н. Н. Семёнове]. Саратов : Приволж. кн. изд-во, 1986. 144 с.
7. Семёнов Н. Н. Наши первые друзья. Вспоминая школьные годы // Пионерская правда. 1948. № 22. 16 марта.
8. Семёнов Н. Н. Избранные труды : в 4 т. / отв. ред. А. Е. Шилов, Г. Б. Сергеев. Т. 4. О времени и о себе. М. : Наука, 2006. 612 с.
9. Сорокин М. П. Физический факультет Пермского государственного университета (история становления и развития). Пермь, 2006. URL : <http://www.psu.ru/files/docs/ob-universitete/smi/knigi-ob-universitete/sorokin2006.pdf> (дата обращения : 23.04.2016).
10. Кармилов В. И. Не терять связи с институтом // Медик Урала. 1953. 2 июля. № 22 (781). С. 2.
11. Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н. Осмысленная научная деятельность. М. : РИОР; ИНФРА-М, 2015. 148 с.
12. Трубецков Д. И. Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах : как закладывались основы синергетики : пиршество духа и драма идей. М. : URSS, 2013. 312 с. (Сер. Синергетика : от прошлого к будущему).
13. Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. О науке, событиях в истории изучения света, колебаний, волн, об их исследователях, а также глоссы и этимоны : учеб. пособие / под ред. А. В. Войцеховского. Томск : Изд. Дом ТГУ, 2014. 380 с.
14. Аникин В. М., Усанов Д. А. Диссертация в зеркале автореферата. М. : ИНФРА-М, 2013. 128 с.
15. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Государственная итоговая аттестация аспиранта : от формальности к превентиве // Alma Mater (Вестн. высш. шк.). 2015. № 11. С. 17–21.
16. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н., Соснин Э. А. Защищаемое положение в диссертации как трансдисциплинарный научный жанр // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/3. С. 300–303.
17. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. Диссертанту о воспринимаемости, числовой оценке и защите научных результатов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 6. С. 25–34.

18. *Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н.* Диссертация : характеристики научности // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 105–118.
19. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Научное руководство аспирантами : «внутренние» и «внешние» регуляторы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 83–88.
20. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* «Предзащита» диссертации : формальные требования и традиции // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 2. С. 95–102.
21. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Коммуникативная функция автореферата и уровень лингво-дисциплинарной компетенции диссертанта // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 80–86.
22. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Провокация магистранта на вербализацию защищаемого научного положения как прием когнитивного менеджмента // Вестн. Томск. гос. ун-та. Философия. Социология. Политология. 2013. № 2. С. 15–20.
23. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Какова природа интересного, или дефиниции науки и научности – эпистемологический компонент профессиональной компетенции (радио)физика как инженера-исследователя // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 10/3. С. 118–120.
24. *Мизулин Д. А., Дроздова М. Г.* Семейный архив. Письма, воспоминания. СПб. : АПИ, 2016. 368 с
25. *Аникин В. М.* Физик-инноватор, земляк, учитель и друг Н. Н. Семёнова Владимир Иванович Кармилов // Трибуна УФН. URL : <https://ufn.ru/tribune/trib128.pdf> (дата обращения : 23.04.2016).
26. *Аникин В. М.* Физик-инноватор, земляк, учитель и друг Н. Н. Семёнова Владимир Иванович Кармилов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 1. С. 44–54.
27. *Аникин В. М., Усанов Д. А.* Николай Николаевич Семёнов : волжские сюжеты жизни // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 2. С. 109–121.
28. *Аникин В. М.* Наши первые учителя : страницы биографий П. Н. Лебедева и Н. Н. Семёнова // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 1. С. 75–83.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(публикация в открытом доступе)

1. Общие положения

1.1. Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» включен 01.12.2015 г. под № 1168 в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

1.2. Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном доступе (спецвыпуски) и публикует материалы по группам научных специальностей:

- 01.04.00 «Физика»;
- 05.12.00 «Радиотехника и связь»;
- 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»;
- 05.27.00 «Электроника»;
- 08.00.00 «Экономические науки».

1.3. Объем статьи не должен превышать 16 страниц (1 печатного листа).

1.4. Для публикации статьи автору необходимо представить в редакцию следующие материалы и документы (1 экз.):

- сопроводительное письмо;
- внешнюю рецензию;
- сведения об авторах: фамилии, имена и отчества (полностью), рабочий адрес, телефоны, e-mail;
- экспертное заключение;
- текст статьи на русском языке, подписанный авторами, а также название статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках.

2. Структура публикаций

2.1. Рукопись оформляется следующим образом :

- первая строка – индекс УДК, выровненный по левому краю текста;
- вторая строка – заголовок статьи прописными буквами (шрифт полужирный, по центру) без переносов;
- третья строка – перечень авторов (инициалы предшествуют фамилии), разделенный запятыми (шрифт полужирный, по центру);
- четвертая строка – полное официальное название организации (при нескольких организациях каждое наименование на отдельной строке, шрифт обычный, по центру);
- пятая строка – почтовый адрес (с индексом) организации (шрифт обычный, по центру);
- затем аннотация и ключевые слова на русском языке.

2.2. Далее приводится заглавие статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотация и ключевые слова на английском языке.

2.3. Далее текст статьи и библиографический список на русском языке.

3. Требования к оформлению рукописи

3.1. Текст статьи должен быть напечатан через одинарный интервал на белой бумаге формата А4 с полями не менее 2,5 см, размер шрифта 14. Дополнительный материал набирается шрифтом 12 (аннотации, таблицы, сноски, примечания, приложения, подписи и надписи к рисункам, содержание, библиографический список, выходные данные, колонтитулы).

3.2. Все страницы рукописи, включая библиографический список, таблицы, рисунки, следует пронумеровать по центру внизу страницы.

3.3. Векторные величины выделяются полужирным шрифтом.

3.4. Каждая таблица должна быть пронумерована арабскими цифрами и иметь тематический заголовок, кратко раскрывающий ее содержание (выравнивание по левому краю таблицы. Например, Таблица 1. Требования к ...). Точка в конце заголовка не ставится. Единицы измерения указываются после запятой. Ссылка на таблицу должна предшествовать ей.

3.5. Формат рисунка должен обеспечивать ясность передачи всех деталей. Обозначения и все надписи на рисунках даются на русском языке; размерность величин указывается через запятую. Подрисуночная подпись должна быть самодостаточной без апелляции к тексту (например, Рис. 1. Зависимость ...). Подписи к рисункам не должны выходить за его границы. Точка в конце подрисуночной подписи не ставится. Ссылка на рисунок должна предшествовать ему.

3.6. Нумеровать следует наиболее важные формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте. Номер располагают по правому краю полосы по центру формулы.

3.7. Библиографический список оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 и открывается размещенным по центру заголовком. Все ссылки даются в квадратных скобках (например, [4]). Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Библиографическое описание оформляется следующим образом:

Образец описания книги:

1. *Игнатъев А. В., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 380 с.

Образец описания статьи в журнале:

2. *Игнатъев А. А., Страхова Л. Л., Овчинников С. В.* Профессиональная направленность современного курса физики для студентов-геофизиков классического университета // Физическое образование в вузах. 2002. № 2. С. 14–18.

3. *Poon H. C.* Modeling of bipolar transistor using integral charge control model with application to third-order distortion studies // IEEE Trans. 1972. Vol. ED-12, № 6. P. 719–731.

Образец описания статьи в сборнике:

4. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. В.* О времени тепловой готовности феррит-транзисторного СВЧ-генератора на высоких уровнях мощности // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 139–151.

Образец краткого описания патентов:

5. Пат. 72788 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 L 43/08, Н 01 L 27/14, G 01 R 33/05, G 01 R 33/04. Устройство для измерения магнитного поля / заявители Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Ляшенко А. В., Романченко Л. А., Солопов А. А. ; патентообладатель ОАО «НИИ-Тантал». – № 20700125198U ; заявл. 03.07.2007 ; опубл. 27.04.2008.

4. Требования к оформлению электронной версии

4.1. Текст рукописи должен быть представлен в виде одного файла на CD или по электронной почте в формате Microsoft Word 97/2000, шрифт Times New Roman, размер шрифта в соответствии с п.3.1, межстрочный интервал одинарный, величина отступа первой строки 1,25. Вся работа должна быть выполнена одной гарнитурой (Times New Roman).

4.2. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3,0, входящем в состав Microsoft Word. Греческие буквы должны набираться обычным шрифтом, латинские – курсивом. Запись химических элементов – обычным шрифтом. Векторы – полужирным шрифтом.

4.3. Диаграммы, графики и фотографии должны быть выполнены в черно-белом цвете.

Рукописи не возвращаются

Адрес : Россия, 410040, г. Саратов, пр. 50 лет Октября,110А, ОАО «Институт критических технологий»

Тел. : 8-(8452) 34-08-70

Факс : 8-(8452) 34-08-70

E-mail : kbkt@renet.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(публикация в ограниченном доступе)

1. Общие положения

1.5. Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» включен 01.12.2015 г. под № 1168 в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

1.6. Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном доступе (спецвыпуски) и публикует материалы по группам научных специальностей:

- 01.04.00 «Физика»;
- 05.12.00 «Радиотехника и связь»;
- 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»;
- 05.27.00 «Электроника»;
- 08.00.00 «Экономические науки».

1.7. Объем статьи не должен превышать 16 страниц (1 печатного листа).

1.8. Для публикации статьи автору необходимо представить в редакцию следующие материалы и документы (1 экз.):

- сопроводительное письмо;
- сведения об авторах: фамилии, имена и отчества (полностью), рабочий адрес, телефоны, e-mail организации;
- экспертное заключение о возможности открытого опубликования;
- текст статьи, подписанный авторами.

2. Структура публикаций

Рукопись оформляется следующим образом :

- первая строка – правый верхний угол: гриф секретности;
- вторая строка – правый верхний угол: номер пункта и наименование Перечня;
- третья строка – правый верхний угол: Экз. № ____;
- четвертая строка – индекс УДК, выровненный по левому краю текста;
- пятая строка – заголовок статьи прописными буквами (шрифт полужирный, по центру) без переносов;
- шестая строка – перечень авторов (инициалы предшествуют фамилии), разделенный запятыми (шрифт полужирный, по центру);
- седьмая строка – полное официальное название организации (при нескольких организациях каждое наименование на отдельной строке, шрифт обычный, по центру);
- восьмая строка – почтовый адрес (с индексом) организации (шрифт обычный, по центру);
- затем аннотация и ключевые слова на русском языке;
- далее текст статьи и библиографический список.

3. Требования к оформлению рукописи

3.8. Текст статьи должен быть напечатан через одинарный интервал на белой бумаге формата А4 с полями не менее 2,5 см, размер шрифта 14. Дополнительный материал набирается шрифтом 12 (аннотации, таблицы, сноски, примечания, приложения, подписи и надписи к рисункам, содержание, библиографический список, выходные данные, колонтитулы).

3.9. Все страницы рукописи, включая библиографический список, следует пронумеровать по центру внизу страницы.

3.10. Векторные величины выделяются полужирным шрифтом.

3.11. Каждая таблица должна быть пронумерована арабскими цифрами и иметь тематический заголовок, кратко раскрывающий ее содержание (выравнивание по левому краю таблицы. Например, Таблица 1. Требования к ...). Точка в конце заголовка не ставится. Единицы измерения указываются после запятой. Ссылка на таблицу должна предшествовать ей.

3.12. Формат рисунка должен обеспечивать ясность передачи всех деталей. Обозначения и все надписи на рисунках даются на русском языке; размерность величин указывается через запятую. Подрисуночная подпись должна быть самодостаточной без апелляции к тексту (например, Рис. 1. Зависимость ...). Подписи к рисункам не должны выходить за его границы. Точка в конце подрисуночной подписи не ставится. Ссылка на рисунок должна предшествовать ему.

3.13. Нумеровать следует наиболее важные формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте. Номер располагают по правому краю полосы по центру формулы.

3.14. Библиографический список оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 и открывается размещенным по центру заголовком. Все ссылки даются в квадратных скобках (например, [4]). Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Библиографическое описание оформляется следующим образом:

Образец описания книги:

6. *Игнатъев А. В., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 380 с.

Образец описания статьи в журнале:

7. *Игнатъев А. А., Страхова Л. Л., Овчинников С. В.* Профессиональная направленность современного курса физики для студентов-геофизиков классического университета // Физическое образование в вузах. 2002. № 2. С. 14–18.

8. *Poon H. C.* Modeling of bipolar transistor using integral charge control model with application to third-order distortion studies // IEEE Trans. 1972. Vol. ED-12, № 6. P. 719–731.

Образец описания статьи в сборнике:

9. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А.* О времени тепловой готовности феррит-транзисторного СВЧ-генератора на высоких уровнях мощности // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Саратов. унта, 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 139–151.

Образец краткого описания патентов:

10. Пат. 72788 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 L 43/08, Н 01 L 27/14, G 01 R 33/05, G 01 R 33/04. Устройство для измерения магнитного поля / заявители Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Ляшенко А. В., Романченко Л. А., Солопов А. А. ; патентообладатель ОАО «НИИ-Тантал». – № 20700125198U ; заявл. 03.07.2007 ; опубл. 27.04.2008.

4. Требования к оформлению электронной версии

4.1. Текст рукописи должен быть представлен в виде одного файла на CD в формате Microsoft Word 97/2000, шрифт Times New Roman, размер шрифта в соответствии с п.3.1, межстрочный интервал одинарный, величина отступа первой строки 1,25. Вся работа должна быть выполнена одной гарнитурой (Times New Roman).

4.2. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3,0, входящем в состав Microsoft Word. Греческие буквы должны набираться обычным шрифтом, латинские – курсивом. Запись химических элементов – обычным шрифтом. Векторы – полужирным шрифтом.

4.3. Диаграммы, графики и фотографии должны быть выполнены в черно-белом цвете.

Рукописи не возвращаются

ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИИ
в центре специальной информации
ОАО «Институт критических технологий»

ОАО «Институт критических технологий» принимает от авторов для публикации в спецвыпусках статьи и обзоры, монографии по следующей тематике: гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника, нанотехнология, схемотехника, аналого-цифровые системы на кристалле, САПР, системы защиты информации, радиоэлектроника, СВЧ- и КВЧ-приборы для военной и специальной техники.

Документы направляются в ОАО «Институт критических технологий» на имя генерального директора-генерального конструктора А. В. Ляшенко по адресу:

Россия, 410040, г. Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А.

Тел.: 8(8452) 63-28-20, 8(8452) 34-08-70

Факс: 8(8452) 48-11-83, 8(8452) 34-08-70

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии	
<i>Ляшенко А. В., Проскуряков Г. М., Поздняков М. В., Румянцев Г. Н., Игнатъев А. А., Васильев А. В., Спиридонов Д. М.</i> Технологическое обеспечение магнитоинерциального модуля.....	4
<i>Румянцев Г. Н., Ляшенко А. В., Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Поздняков М. В.</i> Отказоустойчивая система автономной ориентации и навигации для объектов ракетно-космической техники.....	20
<i>Мальшиев В. С., Овчинников С. В., Игнатъев А. А.</i> Возможность минимизации температурного влияния на дрейф частоты гетеромагнитного автогенератора.....	34
<i>Хвалин А. Л., Страхова Л. Л.</i> Компьютерное моделирование статических характеристик биполярного транзистора 2Т937.....	43
<i>Чесаков В. С., Сотов Л. С.</i> Декодер битов управления устройства манипуляции битами данных.....	50
<i>Ляшенко А. В., Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Поздняков М. В.</i> Отказоустойчивые пилотажно-навигационные комплексы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов.....	59
<i>Малярчук В. А.</i> Сравнительный анализ способов представления дескрипторов формата.....	67
<i>Страхова Л. Л., Хвалин А. Л., Сотов Л. С.</i> Мощные высокочастотные транзисторные усилители (анализ патентной документации).....	72
<i>Жуков Н. Д., Овчинников С. В.</i> Теплофизическая модель анода вакуумного микроприбора.....	88
<i>Проскуряков Г. М., Поздняков М. В., Игнатъев А. А.</i> Комбинированная многофункциональная магнитометрия для баллистических аппаратов.....	91
Методические аспекты физического образования	
<i>Игнатъев А. А., Романченко Л. А., Кудрявцева С. П.</i> Особенности текущей и промежуточной аттестации по научно-исследовательской работе студентов магистратуры «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности»...	109
<i>Кудрявцева С. П.</i> Методическая разработка для определения намагниченности пластинообразных магнитов в учебном практикуме.....	114
Экономика в промышленности	
<i>Солопов А. А.</i> Теоретические аспекты инновационной активности социально-экономических систем.....	118
<i>Шаталова А. Д.</i> Эконометрическая модель для прогнозирования процентной ставки по краткосрочным кредитам.....	125
Приложение.....	131
<i>Аникин В. М.</i> Магнитобиология и магнитотерапия: «Кармиловский» период..	131
Правила для авторов (публикация в открытом доступе).....	141
Правила для авторов (публикация в ограниченном доступе).....	144
Правила публикации в центре специальной информации ОАО «Институт критических технологий».....	146

Подписка на 2017 г.

Индекс издания по объединенному каталогу «Пресса России» 29005,
Интернет-каталог Агентства «Книга-Сервис»,
раздел 24 «Компьютеры. Информатика. Программные продукты»,
раздел 30 «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов».
Сборник выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном
доступе (спецвыпуски).

Научное издание

ГЕТЕРОМАГНИТНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Сборник научных трудов

Выпуск 21

**Теоретические и экспериментальные исследования,
компьютерные технологии.
Методические аспекты физического образования.
Экономика в промышленности**

Под редакцией профессора *А. В. Ляшенко*

Редактор *Е. А. Малютина*
Редактор английского текста *Е. А. Игнатьева*
Технический редактор *Т. А. Трубникова*. Корректор *Е. Б. Крылова*
Оригинал-макет подготовили *О. Г. Данке, Т. Н. Сиротинина*

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-35636 от 17.03.2009.

Подписано в печать 16.12.2016. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 8,60 (9,25). Тираж 100. Заказ .

Издательство Саратовского университета. 410012, Саратов, Астраханская, 83.
Типография ИП Волков В. В. 410056, Саратов, Рабочая, 105