

Министерство обороны Российской Федерации
Министерство промышленности и энергетики Саратовской области
ОАО «Тантал», ОАО «Институт критических технологий»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

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

Гетеромагнитная микроэлектроника

Сборник научных трудов

ВЫПУСК 17

**Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника.
Методические аспекты физического образования.
Экономика в промышленности**

Под редакцией профессора *А. В. Ляшенко*

Саратов
Издательство Саратовского университета
2014

УДК 621.382.029.6
ББК 548.537.611.44
Г44

Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред.
Г44 проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. –
Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические
аспекты физического образования. Экономика в промышленности. –
148 с. : ил.

В настоящем выпуске сборника представлены материалы по гетеромагнитной микроэлектронике, в частности по вопросам ориентации и навигации в геомагнитных полях подводных объектов, по проблемам компьютерной обработки сигналов в прикладных аспектах мостостроения, по проектированию микропроцессоров с расширенными возможностями, а также освещены проблемы подготовки бакалавров и инноваций в экономике.

Для специалистов-разработчиков, экспертов, работающих в области микро- и наноэлектроники, а также студентов, аспирантов и докторантов.

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, проф., 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.; *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*, канд. техн. наук, доц.; *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

В настоящем выпуске сборника научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» в разделе «Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии» представлены материалы, посвященные следующим вопросам:

- отработка модели сферического ЖИГ-резонатора;
- ориентация вращающихся в геомагнитном поле Земли подводных объектов;
- автономная ориентация платформы на подвижном объекте;
- проектирование микропроцессора на базе архитектуры OpenRisc1200;
- минимизация утечки информации из-за побочных электромагнитных излучений компьютера;
- компьютерный контроль процессов надвигки мостовых пролетов;
- построение автокорреляционной функции орбит кусочно-линейного хаотического отображения.

В разделе «Экономика в промышленности» рассмотрены:

- система венчурного инвестирования высокотехнологичных предприятий;
- система показателей и оценки экономико-инновационного потенциала предприятия.

В разделе «Методические аспекты физического образования» приведён материал о компетентностном подходе при подготовке бакалавров по направлению «Физика».

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.317.3

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОГО ЖИГ-РЕЗОНАТОРА

А. В. Васильев, А. А. Игнатьев

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kbkt@renet.ru

Приведена нелинейная модель сферического ЖИГ-резонатора для малых (милливаттных) уровней мощности в диапазоне частот от 0,7 до 4 ГГц.

Ключевые слова: ЖИГ-резонатор, эквивалентная схема, нелинейная модель.

Nonlinear Model of Spherical YIG-resonator

A. V. Vasiliev, A. A. Ignatiev

Given a nonlinear model of spherical YIG-resonator for small (mW) power levels in the frequency range from 0,7 to 4 GHz.

Key words: YIG-resonator, equivalent circuit, nonlinear model.

Гетеромагнитные устройства и микросистемы автогенераторного типа имеют в своем составе различные виды и топологии ферритовых резонаторов (ФР) [1], которые представляют собой сферы из монокристаллических ферритов [1], прямоугольные резонаторы из эпитаксиальных пленок ферритов [2], массивы из магнитных углеродных нанотрубок на диэлектрическом основании [3] или сфероиды из разных наноразмерных магнитных материалов [4]. В [5, 6] показан нелинейный характер поглощения входной СВЧ-мощности резонаторами на основе объемных ферритов (сферы, призмы).

В большинстве случаев при проектировании СВЧ-генератора с ЖИГ-резонатором используется линейная эквивалентная схема. Варианты такой схемы приведены в [7, 8]. Блок-схема СВЧ-генератора, в которой ЖИГ-резонатор заменен на линейную эквивалентную схему, приведена на рис. 1.

Применение в расчетах линейных эквивалентных схем сферических ФР в различных участках частотного диапазона (от УВЧ до ТВЧ) на различных уровнях мощности показало их ограниченный характер [1]. Так, расчетные значения центральной частоты генерируемого сигнала, уровень выходной мощности, ширина спектральной линии, уровень фазовых шумов, перестройка центральной частоты гетеромагнитных автогенераторов милливаттного уровня мощности на сферических ФР в диапазоне частот 1 ГГц не соответствовали экспериментальным данным.

В статье предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора, разработанная в среде САПР *Microwave Office*. Модель построена на основе экспериментально полученных характеристик ЖИГ-резонатора (уровней поглощения входного сигнала ферритовым резонатором на различных уровнях мощности от 0,1 мкВт (−40 дБм) до 200 мВт (+23 дБм) в диапазоне частот от 500 МГц до 4 ГГц).

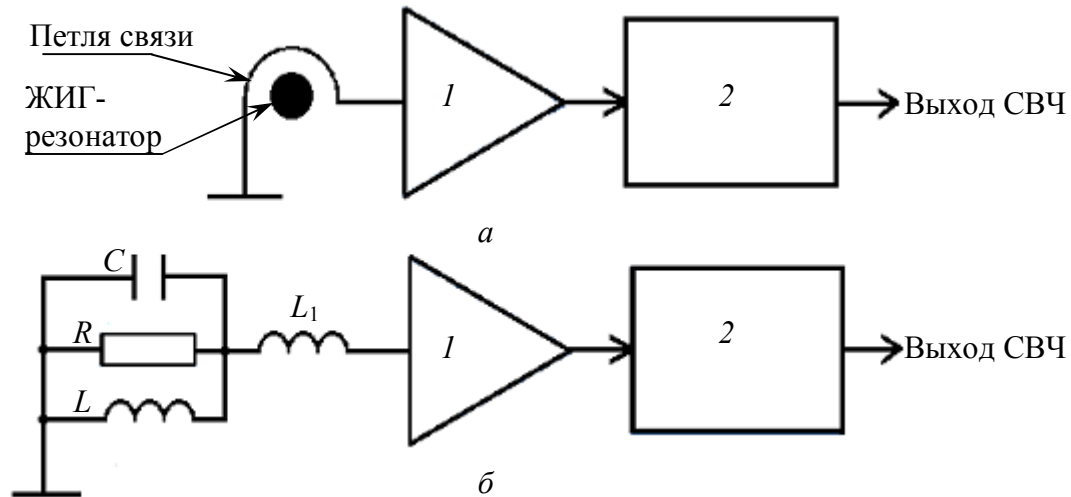


Рис. 1. Генератор с ЖИГ-резонатором: *a* – блок-схема; *б* – схема генератора с линейной эквивалентной схемой ЖИГ-резонатора; *1* – активный элемент с отрицательным сопротивлением; *2* – цепь согласования; L_1 – индуктивность петли связи с ЖИГ-резонатором; C , R и L – емкость, активное сопротивление и индуктивность ЖИГ-резонатора соответственно

Для исследований был выбран сферический ферритовый резонатор марки 30КГ диаметром 0,8 мм, с намагниченностью насыщения $4\pi M_s = 360$ Гс и шириной $\Delta H = 0,3$ Э линии ферромагнитного резонанса (ФМР) [9]. Резонатор размещен в центре петли связи (см. рис. 1, *a*), которая представляет собой один виток (диаметр 0,85 мм) медной проволоки (диаметр 0,1 мм). Виток смонтирован на плате из текстолита размером 34×19 мм и толщиной 0,5 мм. Вся конструкция смонтирована в корпусе с СВЧ-разъемами. Для измерения характеристик резонатора устройство устанавливалось в зазор электромагнита, обеспечивающего поле подмагничивания резонатора H_0 так, чтобы линии магнитной индукции лежали в плоскости витка связи (перпендикулярно монтажной плате). Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Сигнал фиксированной частоты (500, 600, 700, 750, 790, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 МГц) подавался на исследуемый резонатор, а уровень сигнала, прошедшего через него, определялся с помощью анализатора спектра. Поле электромагнита устанавливалось так, чтобы частота ФМР совпала с частотой сигнала, подаваемого на вход резонатора. При этом снималась зависимость коэффициента передачи K резонатора от уровня входной мощности $P_{вх}$. Полученные результаты представлены на рис. 3.

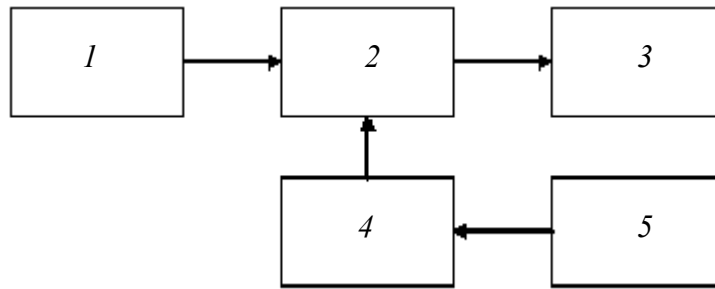


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор СВЧ-сигналов; 2 – исследуемое устройство; 3 – анализатор спектра; 4 – электромагнит; 5 – блок питания электромагнита

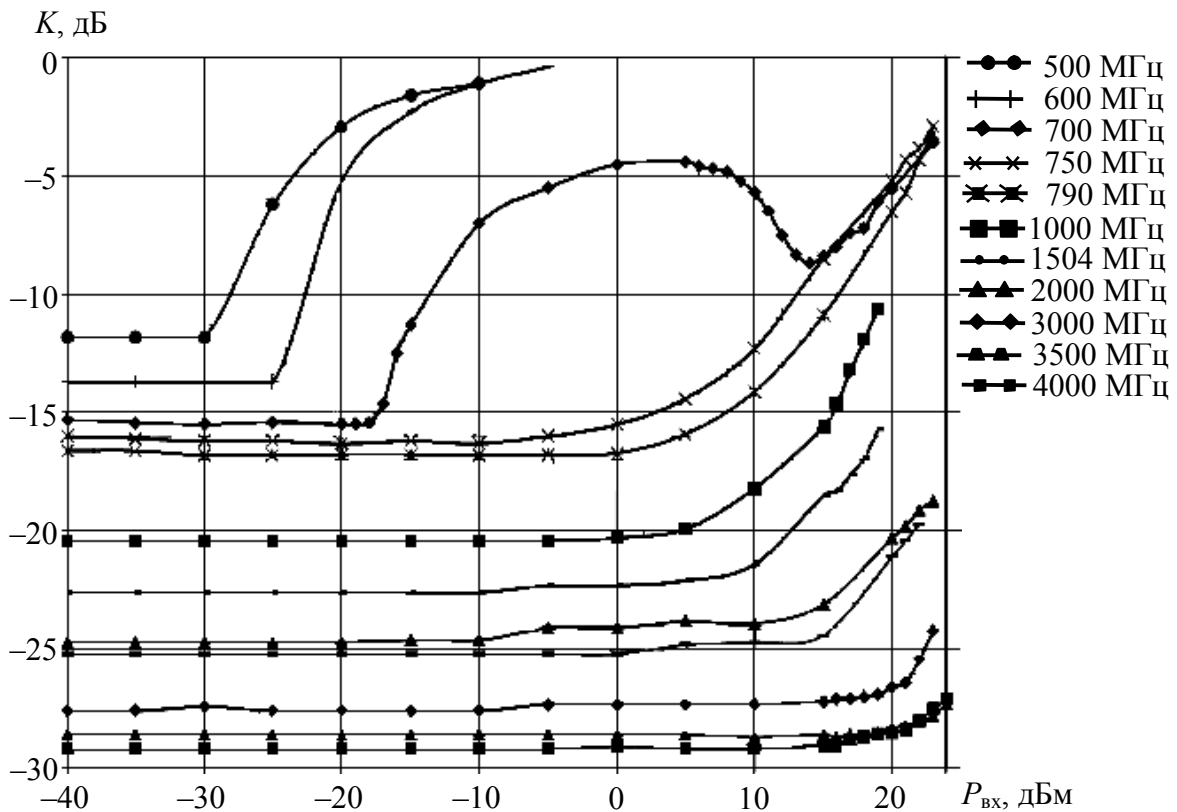


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи K от уровня мощности входного сигнала на частоте ФМР

Аномальное поведение зависимости $K(P)$ на частотах 500 МГц, 600 МГц и 700 МГц обусловлено, по всей видимости, ненасыщенным режимом работы ферритового резонатора (напомним, что использовался резонатор 30КГ с $4\pi M_S = 360$ Гс). Остальные зависимости $K(P)$ носят качественно предсказуемый характер.

По полученным характеристикам (см. рис. 3) можно определить области работы ферритового резонатора в линейном (горизонтальные участки зависимости $K(P)$) и нелинейном режимах.

Нелинейная модель ЖИГ-резонатора разрабатывалась на частоте (998,2 МГц) близкой к 1 ГГц, исходя из практических потребностей [9].

Результаты измерения параметров ферритового резонатора 30КГ на частоте ФМР 998,2 МГц при поле подмагничивания 356,5 Э представлены на рис. 4–6.

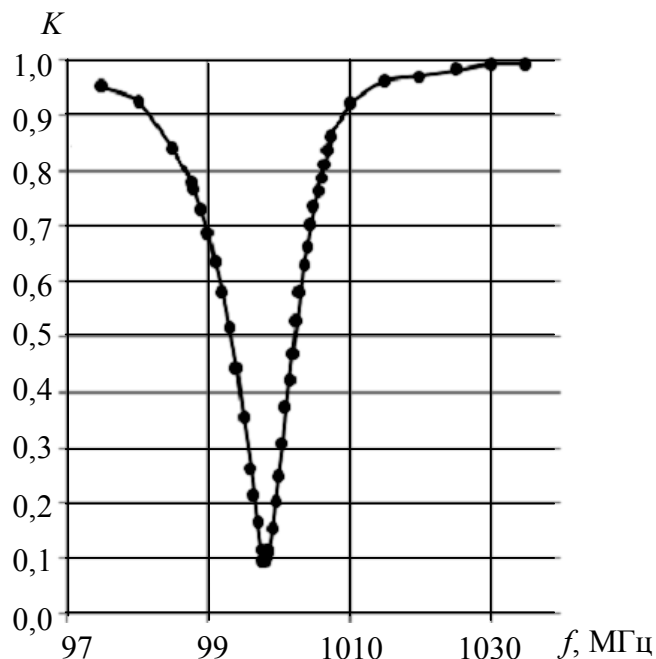


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи ЖИГ-резонатора от частоты f входного сигнала

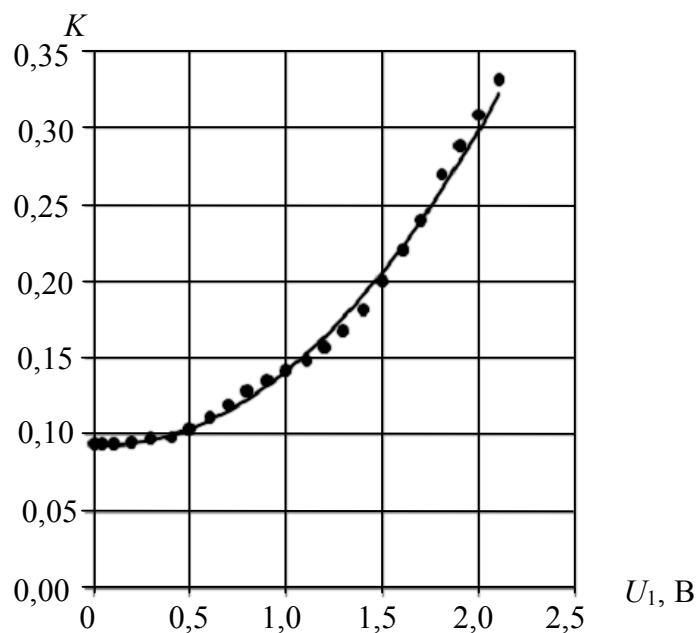


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от подаваемого на резонатор напряжения U_1 . Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация полиномом 2-го порядка

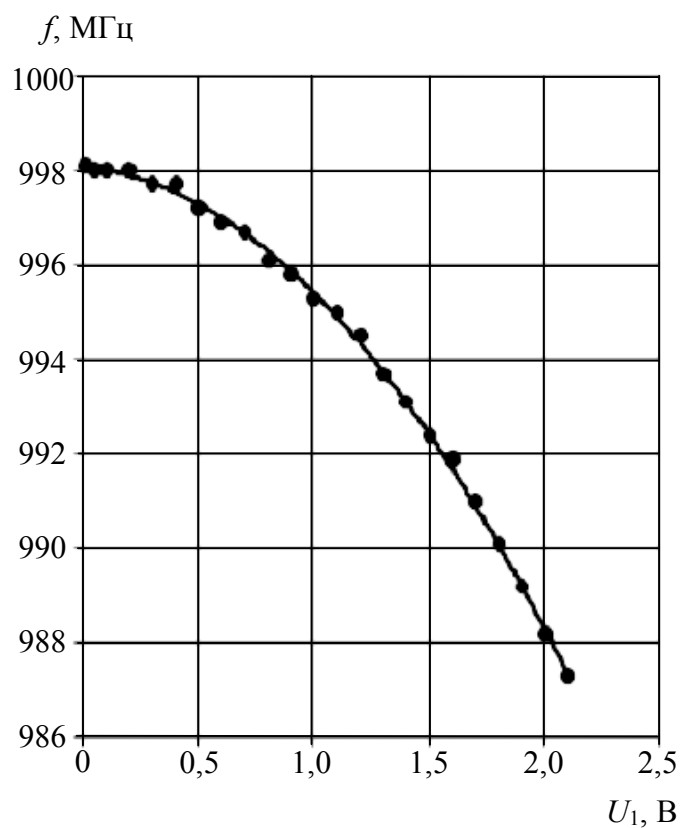


Рис. 6. Зависимость частоты ФМР от подаваемого на резонатор напряжения U_1 . Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация полиномом 2-го порядка

В качестве модели была использована нелинейная эквивалентная схема включения ЖИГ-резонатора, показанная на рис. 7.

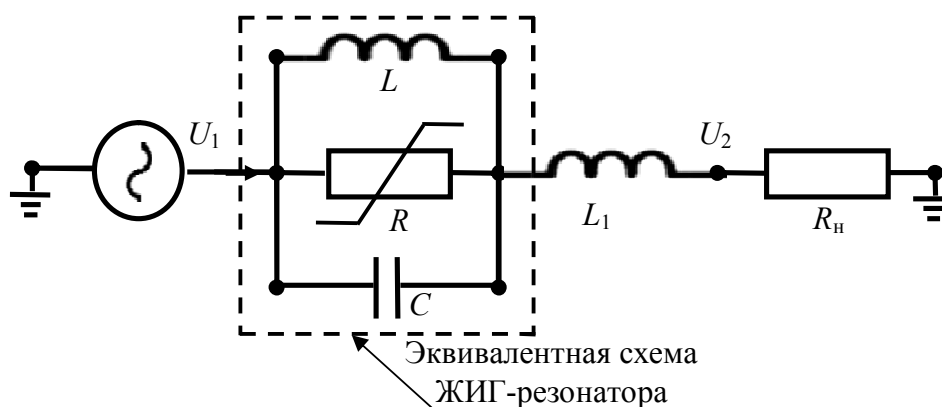


Рис. 7. Нелинейная эквивалентная схема включения ЖИГ-резонатора: U_1 – напряжение с выхода генератора; U_2 – напряжение с выхода ферритового резонатора; R_H – сопротивление нагрузки (вход анализатора спектра); L_1 – индуктивность петли связи резонатора с линией передачи СВЧ-мощности

Параметры элементов R, L, C ЖИГ-резонатора на рис. 7 определяются по следующим формулам [8]:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \gamma H_0, \\
 Q &= \frac{H_0 - \frac{1}{3}4\pi M_S}{\Delta H}, \\
 \omega_0 &= 2\pi F_0, \\
 R &= 0,487Q, \\
 L &= \frac{R}{\omega_0 Q}, \\
 C &= \frac{1}{\omega_0^2 L},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где F_0 – частота ФМР, МГц; H_0 – напряженность поля подмагничивания, Э; Q – добротность RLC -контура; ΔH – ширина резонансной линии ФМР, Э (для КГ30 это 0,3 Э); $4\pi M_S$ – намагниченность насыщения ЖИГ-резонатора, Гс (для КГ30 это 360 Гс); $\gamma = 2,8$ МГц/Гс – гиромагнитное отношение; ω_0 – циклическая частота.

Коэффициент передачи на резонансной частоте определяется по формуле

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_H}{\dot{Z} + R_H}, \tag{2}$$

где \dot{Z} – полное комплексное сопротивление ЖИГ-резонатора.

В первом приближении можно считать $\omega L_1 \ll R$, и сопротивление параллельного RLC контура на резонансной частоте становится чисто активным, т. е. $\dot{Z} \approx R$, тогда

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{R_H}{R + R_H}, \\
 R &= R_H \left(\frac{1}{K} - 1 \right).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Так как K – нелинейный параметр (см. рис.3), то и R – нелинейное сопротивление. Используя экспериментальные данные (см. рис. 4–6)

$$K(U) = 0,055U^2 - 0,007U + 0,094$$

и формулу (3), получим зависимость $R(U)$:

$$R(U) = R_H \frac{0,906 - 0,055U^2 + 0,007U}{0,094 + 0,055U^2 - 0,007U}. \tag{4}$$

Из (4) можно получить выражение для вольт-амперной характеристики (ВАХ) сопротивления R (рис. 8):

$$I(U) = \frac{U}{R_H} \cdot \frac{0,094 + 0,055U^2 - 0,007U}{0,906 - 0,055U^2 + 0,007U} \quad (5)$$

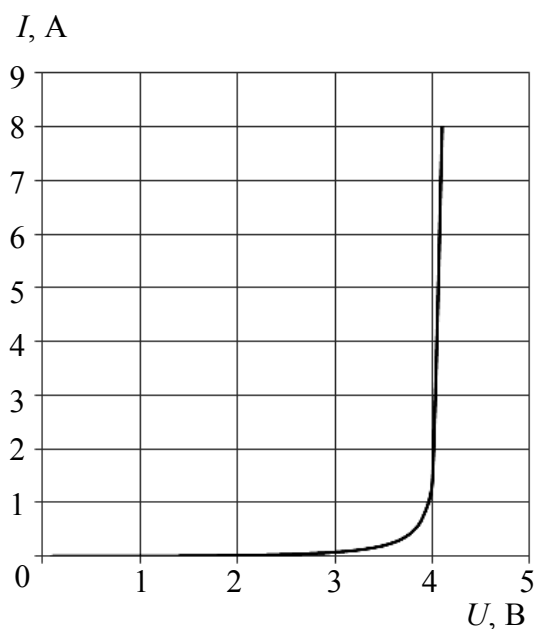


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления R в нелинейной модели ЖИГ-резонатора

Подставляем нелинейное сопротивление (3) в модель резонатора, показанную на рис. 7. В среде *Microwave Office* это можно сделать двумя способами: заданием ВАХ сопротивления кусочно-линейной аппроксимацией или заменой его двумя встречно-параллельными диодами (рис. 9) с такими же, как на рис. 8, характеристиками. Можно подобрать ВАХ диодов так, чтобы они совпадали с ВАХ сопротивления RLC -контура.

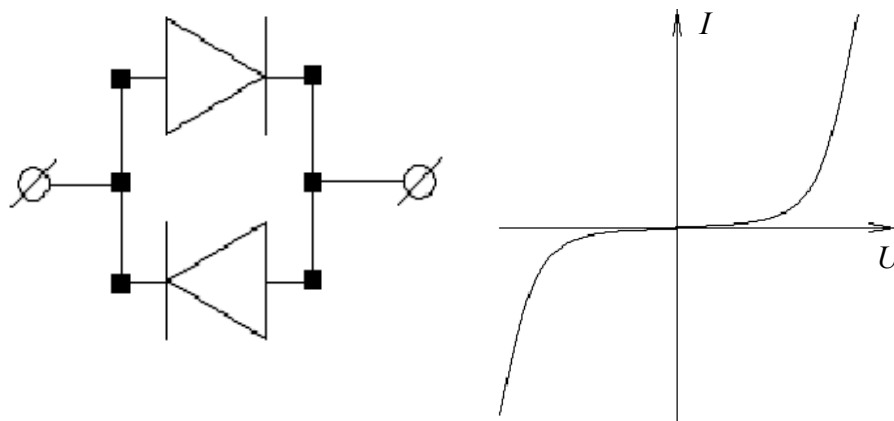


Рис. 9. Два диода, включенные встречно-параллельно и их вольт-амперная характеристика

Таким образом, смоделировано насыщение ЖИГ-резонатора при переходе в нелинейный режим работы на высоких уровнях мощности. Однако, как видно из рис. 6, с в нелинейном режиме работы ЖИГ-резонатора экспериментально наблюдается изменение резонансной частоты. В эквивалентной схеме ЖИГ резонатора величина изменения резонансной частоты от уровня мощности определяется индуктивностью L_1 петли связи. Зависимости $K(f)$ при разных уровнях мощности (от -20 до +20 дБм) показаны на рис. 10. Точкам минимума зависимости $K(f)$ соответствуют значения резонансной частоты ЖИГ-резонатора. Пунктирной линией показано изменение резонансной частоты от уровня мощности, подаваемой на резонатор, которое пересчитано из зависимости $f(U_1)$ (см. рис. 6). Величина индуктивности L_1 петли связи подбирается так, чтобы смещение резонансной частоты при изменении уровня входной мощности в модели совпало с экспериментально полученными данными.

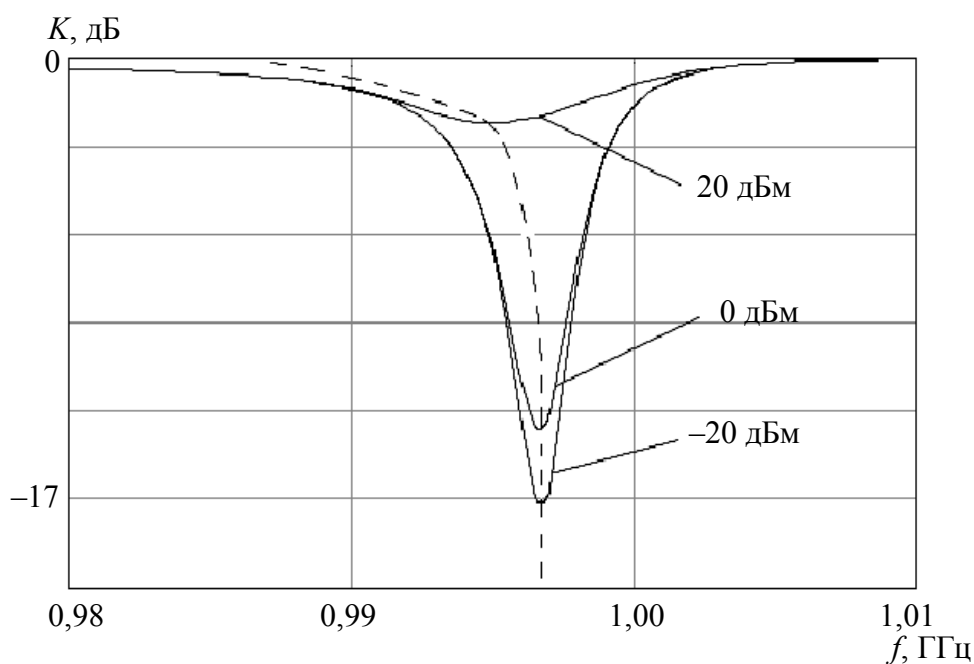


Рис. 10. Зависимость $K(f)$ при разных уровнях мощности

Проведенный расчет в среде *Microwave Office* показывает, что предложенная модель для частоты 1 ГГц достаточно корректно работает в полосе $\pm 10\%$ с точностью методической погрешности измерений параметров ЖИГ-резонатора.

Таким образом, авторами предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора и приведена методика ее расчета. Однако в модели не учтена зависимость коэффициента передачи на частоте ФМР от самой частоты ФМР (от внешнего подмагничивающего поля). Не учтено также и то, что с ростом частоты увеличивается диапазон линейного режима работы ЖИГ-резонатора (растет пороговая мощность [2, 5, 10]), как это видно из рис. 3. Для учета этих эффектов необходимо вводить зависимость величины R не только от напряжения, но и от частоты (с ростом частоты сопротивление должно увеличиваться). К сожалению, в среде *Microwave Office* нет такой возможности. Поэтому приходится ограничиваться узкополосной моделью резонатора, что достаточно для многих практических случаев [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника. Микросистемы активного типа. М. : Наука, 2007. 612 с.
2. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 877 с.
3. *Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Васильев А. В., Митин И. В.* Экспериментальные исследования возбуждения СВЧ-колебаний в магнитных углеродных нанотрубках на микрополосковых устройствах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 81–85.
4. *Глебов В. А., Глебов А. В., Сафронов Б. В., Шингарев Э. Н.* Кристаллические магнитные материалы // Цветные металлы. 2011. № 1. С. 83–86.
5. *Лакс Б., Баттон К.* Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики. М.: Мир, 1965. 675 с.
6. *Гуревич А. Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 588 с.
7. *Ильченко М. Е., Кудинов Е. В.* Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1973. 175 с.
8. *Ollivier P. M.* Microwave YIG-tuned transistor oscillator amplifier design : application to C band // IEEE J. of solid-state circuits. February. 1972. Vol. sc-7, № 1. P. 54–60.
9. *Самолданов В. Н., Луконин И. С.* Разработка автогенератора с ЖИГ-резонатором для датчика слабых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 5 : Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники. С. 35–51.
10. *Моносов Я. А.* Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 376 с.

УДК 519.6

АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ОРБИТ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ХАОТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЩЕГО ВИДА

В. М. Аникин, А. В. Муштаков

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru

Аналитически рассчитываются линейная собственная функция оператора Перрона–Фробениуса кусочно-линейного отображения с произвольным наклоном ветвей и автокорреляционная функция орбит данного отображения.

Ключевые слова: хаотическое отображение, оператор Перрона–Фробениуса, собственная функция, автокорреляционная функция орбит.

Autocorrelation Function of Orbits of General Piece-wise Linear Chaotic Maps

V. M. Anikin, A. V. Mushtakov

A chaotic map with piece-wise linear branches having arbitrary slopes is considered. The linear eigenfunction of Perron–Frobenius operator for the map and autocorrelation function of its orbits are analytically calculated.

Key words: chaotic map, Perron–Frobenius operator, eigenfunctions, autocorrelation function of orbits.

Для радиофизических приложений важное значение имеют аналитические расчеты характеристик дискретных динамических систем (хаотических отображений), демонстрирующих хаотическое поведение, в частности корреляционных и автокорреляционных функций. Возможность аналитического (не численного) расчета таких характеристик основана на знании (и предварительном нахождении) аналитических выражений для собственных функций и собственных чисел оператора Перрона–Фробениуса, ассоциированного с каждым отображением [1]. В ряде работ (см., например, [2–15]) изучались особенности решения спектральной задачи для этого оператора в случае задающих отображение итеративных функций, обладающих определенной симметрией и регулярностью ветвей.

В статье рассматривается кусочно-линейное отображение более общего вида с произвольным наклоном линейных ветвей (дается математическое представление отображения, записывается оператор Перрона–Фробениуса, находится линейная собственная функция этого оператора и приводится аналитическое выражение для автокорреляционной функции орбит).

Оператор Перрона–Фробениуса кусочно-линейного отображения с произвольным наклоном ветвей

Рассмотрим кусочно-линейное отображение с полными (линейными) ветвями на единичном интервале $(0, 1)$. Ветви могут иметь различный наклон (точнее, различный модуль тангенса угла наклона), иначе говоря, подынтервалы определения ветвей могут быть различны. Границами подынтервалов (на оси абсцисс) являются точки ξ_k (рис. 1).

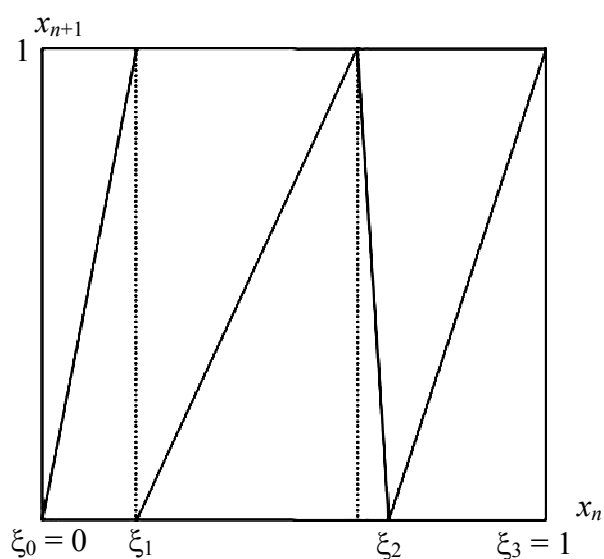


Рис. 1. Кусочно-линейное отображение с полными ветвями и произвольным наклоном ветвей (показан случай четырех ветвей)

Уравнение для m -й ветви отображения можно представить следующей линейной функцией:

$$g_m(x) = a_m x + b_m = \frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta \xi_m} x + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta \xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta \xi_m}, \quad (1)$$

где угловой коэффициент

$$a_m = (-1)^{\sigma_m} / \Delta \xi_m; \quad \sigma_m = \begin{cases} 0, & a_m > 0, \\ 1, & a_m < 0 \end{cases};$$

$$b_m = (\sigma_m - 1) \xi_{m-1} / \Delta \xi_m + \sigma_m \xi_m / \Delta \xi_m; \quad \Delta \xi_m = \xi_m - \xi_{m-1}.$$

Через значение параметра σ_m учитывается наклон ветви: для положительного углового коэффициента $\sigma_m = 0$, для отрицательного $\sigma_m = 1$. Таким образом, итеративную функцию кусочно-линейного отображения, состоящего из p ветвей, с произвольным наклоном кусочно-линейных ветвей можно представить в виде

$$g(x) = \sum_{m=1}^p g_m(x) = \sum_{m=1}^p \left(\frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta \xi_m} x + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta \xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta \xi_m} \right) \Theta_m(x), \quad (2)$$

а кусочно-линейное отображение с произвольным наклоном ветвей запишется как

$$x_{n+1} = \sum_{m=1}^p \left(\frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta \xi_m} x_n + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta \xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta \xi_m} \right) \Theta_m(x), \quad (3)$$

где $\Theta_m(x)$ – индикаторная (характеристическая) функция отрезка (ξ_{m-1}, ξ_m) , равная единице внутри него и нулю за его пределами.

Запишем оператор Перрона–Фробениуса для отображения (3), исходя из определения оператора [1]:

$$Pf(x) = \int_0^1 f(t) \delta(x - g(t)) dt, \quad (4)$$

где $f(x)$ – функция, на которую действует оператор P ; $\delta(u)$ – дельта-функция. Получим

$$\begin{aligned} Pf(x) &= \int_0^1 f(t) \delta \left(x - \sum_{m=1}^p \left(\frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta \xi_m} t + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta \xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta \xi_m} \right) \Theta_m(t) \right) dt = \\ &= \sum_{m=1}^p \int_{\xi_{m-1}}^{\xi_m} f(t) \delta \left(x - \left(\frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta \xi_m} t + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta \xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta \xi_m} \right) \right) \Theta_m(t) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Чтобы воспользоваться фильтрующим свойством дельта-функции при интегрировании, проведем замену переменных в интегралах (5) по правилам:

$$u = \frac{(-1)^{\sigma_m}}{\Delta\xi_m} t + (\sigma_m - 1) \frac{\xi_{m-1}}{\Delta\xi_m} + \sigma_m \frac{\xi_m}{\Delta\xi_m},$$

$$t = (-1)^{-\sigma_m} (\Delta\xi_m u - (\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m),$$

$$dt = (-1)^{-\sigma_m} \Delta\xi_m du.$$

Введение новых переменных позволяет во всех интегралах, входящих в выражение (5), перейти к интегрированию на интервале (0, 1). Это дает следующее представление для оператора Перрона–Фробениуса:

$$Pf(x) = \sum_{m=1}^p \int_0^1 f((-1)^{-\sigma_m} (\Delta\xi_m u - (\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m)) \Delta\xi_m \delta(x - u) du =$$

$$= \sum_{m=1}^p f((-1)^{-\sigma_m} (\Delta\xi_m x - (\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m)) \Delta\xi_m. \quad (6)$$

Рассмотрим действие оператора (6) на индикаторную функцию единичного отрезка:

$$\Theta_{0,1}(x) = \begin{cases} 1, & x \in (0,1), \\ 0, & x \notin (0,1). \end{cases} \quad (7)$$

Результат очевиден:

$$P\Theta_{0,1}(x) = 1 \cdot \Theta_{0,1}(x). \quad (8)$$

Это означает, что равномерное распределение (на единичном интервале) является инвариантной плотностью оператора Перрона–Фробениуса, т. е. его собственной функцией с собственным числом $\lambda_0 = 1$. Все остальные собственные функции $\psi_m(x)$ оператора удовлетворяют условию [1]

$$\int_0^1 \Psi_m(x) dx = 0,$$

которое одновременно служит и эффективным критерием правильности полученного решения спектральной задачи.

Линейная собственная функция оператора Перрона–Фробениуса

По причинам, которые станут понятными из последующего изложения, здесь мы остановимся только на нахождении линейной собственной функции $\psi_1(x)$ оператора Перрона–Фробениуса (6) для рассматриваемого

кусочно-линейного отображения с произвольным наклоном ветвей. Эта собственная функция и соответствующее собственное число определяются условием

$$P\psi_1(x) = \lambda_1\psi_1(x). \quad (9)$$

Будем искать линейную собственную функцию оператора в виде $\psi_1(x) = x - \mu$. Тогда при подстановке этого выражения в (9) с учетом вида оператора (6) получим:

$$P(x - \mu) = \sum_{m=1}^p (-1)^{-\sigma_m} (\Delta\xi_m x - (\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m) \Delta\xi_m - \mu = \lambda_1(x - \mu). \quad (10)$$

Приравнивая коэффициенты при переменной x и свободные члены в левой и правой частях равенства (10), получим согласованную систему уравнений для определения собственного значения λ_1 и значения μ :

$$\sum_{m=1}^p (-1)^{-\sigma_m} \Delta^2 \xi_m = \lambda_1,$$

$$\sum_{m=1}^p (-1)^{-\sigma_m} (-(\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m) \Delta\xi_m - \mu = -\lambda_1 \mu.$$

Отсюда

$$\lambda_1 = \sum_{m=1}^p (-1)^{-\sigma_m} \Delta^2 \xi_m = \sum_{m=1}^p (-1)^{\sigma_m} \Delta^2 \xi_m,$$

$$\mu = \frac{\sum_{m=1}^p (-1)^{-\sigma_m} (-(\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m) \Delta\xi_m}{1 - \lambda_1} =$$

$$= \frac{\sum_{m=1}^p (-1)^{\sigma_m} (-(\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m) \Delta\xi_m}{1 - \sum_{m=1}^p (-1)^{\sigma_m} \Delta^2 \xi_m}. \quad (11)$$

Таким образом, линейная собственная функция оператора Перрона–Фробениуса кусочно-линейного отображения с полными ветвями и произвольным их наклоном (3) есть

$$\Psi_1(x) = x - \frac{\sum_{m=1}^p (-1)^{\sigma_m} (-(\sigma_m - 1)\xi_{m-1} - \sigma_m \xi_m) \Delta\xi_m}{1 - \sum_{m=1}^p (-1)^{\sigma_m} \Delta^2 \xi_m}. \quad (12)$$

Ей соответствует собственное число λ_1 .

Применим формулы (11) и (12) для расчета параметров конкретных простых отображений (рис. 2–4).

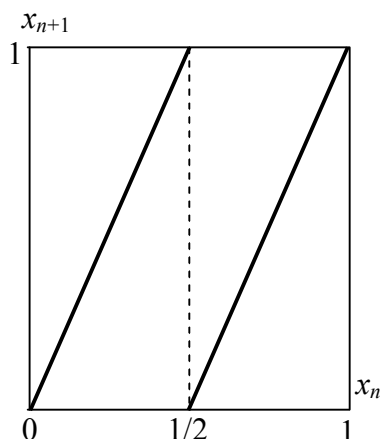


Рис. 2. Отображение «Сдвиг Бернулли»

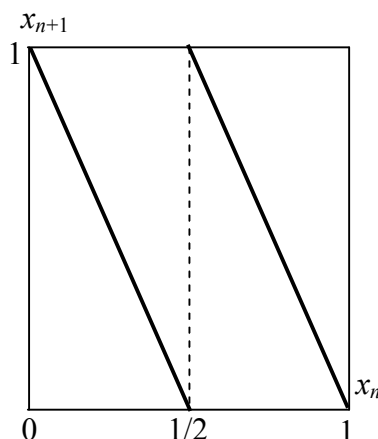


Рис. 3. Отображение «Инверсный сдвиг Бернулли»

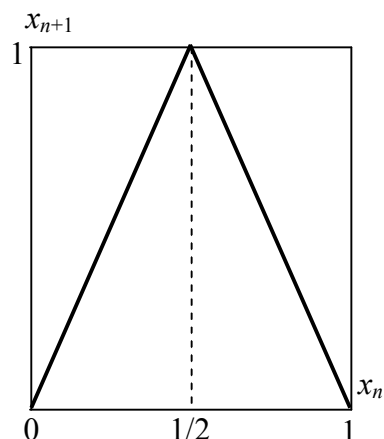


Рис. 4. Пирамидальное отображение

Значения λ_1 и μ занесены в табл. 1. Они совпадают с известными решениями [1], что свидетельствует в пользу корректности проведенных расчетов.

Таблица 1

Линейные собственные функции операторов Перрона–Фробениуса хаотических отображений на интервале (0, 1)

Отображение	σ_1	σ_2	ξ_1, ξ_2, ξ_3	λ_1	μ	$\psi_1(x)$
Сдвиг Бернулли $x_{n+1} = \{2x_n\}$ ($p = 2$, см. рис. 2)	0	0	0; 0,5; 1	0,5	0,5	$x - 0,5$
Инверсный сдвиг Бернулли $x_{n+1} = 1 - \{2x_n\}$ ($p = 2$, см. рис. 3)	1	1	0; 0,5; 1	-0,5	0,5	$x - 0,5$
Пирамидальное отображение $x_{n+1} = 1 - 2x_n - 1 $ ($p = 2$, см. рис. 4)	0	1	0; 0,5; 1	0	0,5	$x - 0,5$ (функция ноль-пространства)
Скошенное пирамидальное отображение ($p = 2$) $x_{n+1} = \begin{cases} x_n / \xi_1, & 0 \leq x_n \leq \xi_1, \\ x_n / (1 - \xi_1), & \xi_1 \leq x_n \leq 1 \end{cases}$	0	1	0; ξ_1 ; 1	$2\xi_1 - 1$	0,5	$x - 0,5$

Интересно, что в структуре собственных функций оператора Перрона–Фробениуса некоторых отображений (в табл. 1 это пирамидальное отображение) может отсутствовать линейная функция, и тогда нулевому собственному числу отвечает функция, входящая в функциональное ноль-пространство этого оператора. Как мы увидим далее, это приводит к специфическим свойствам автокорреляционной функции и соответствующему винеровскому спектру орбит хаотического отображения.

Автокорреляционная функция орбит хаотического отображения

Мерой статистической связи между сечениями связи чисто случайного (стохастического) или хаотического процессов выступает автокорреляционная функция процесса. При ансамблевом рассмотрении последовательностей $\{x_n\}$ автокорреляционная функция траекторий произвольного одномерного эргодического хаотического отображения, заданного на единичном интервале, определяется как [1]

$$R(n) = \int_0^1 \alpha g^n(\alpha) \rho(\alpha) d\alpha - \left(\int_0^1 \alpha \rho(\alpha) d\alpha \right) \left(\int_0^1 g^n(\alpha) \rho(\alpha) d\alpha \right), \quad (13)$$

где $g^n(\alpha)$ – результат n -кратного действия отображения $\alpha_{n+1} = g(\alpha_n)$ (в переменных α); $\rho(\alpha)$ – инвариантная плотность отображения (рассматривается единичный интервал определения отображения). Аргументом автокорреляционной функции выступает целочисленная величина n – число итераций, разделяющее два сечения процесса. Выражение (13) имеет место для установившегося (стационарного) процесса, когда перемешивающие свойства отображения приводят к тому, что все величины $\alpha_n = g^n(\alpha)$ имеют одинаковое распределение, совпадающее с инвариантным. Тогда и их средние значения будут одинаковы:

$$\overline{\alpha_n} = \int_0^1 g^n(\alpha) \rho(\alpha) d\alpha = \int_0^1 \alpha \rho(\alpha) d\alpha, \quad n \geq 1. \quad (14)$$

Когда инвариантное распределение является равномерным, формулы (13) и (14) существенно упрощаются и принимают соответственно вид

$$R(n) = \int_0^1 \alpha g^n(\alpha) d\alpha - \frac{1}{4}, \quad (15)$$

$$\overline{\alpha_n} = \int_0^1 g^n(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2}, \quad n \geq 0. \quad (16)$$

В случае *нестационарного* процесса среднее значение для $\alpha_n = g^n(\alpha)$ может быть получено в результате усреднения точного решения $\alpha_n = \alpha_n(n; \alpha_0)$ по начальному распределению величины α_0 . Если считать распределение α_0 инвариантным, то, естественно, будет справедлив результат (16).

Если ввести для операции усреднения черту сверху, можно более наглядно представить структуру (13):

$$R(n) = \overline{\alpha_n(\alpha_0, n)\alpha_0} - \overline{\alpha_n\alpha_0} = \int_0^1 g^n(\alpha)\alpha\rho(\alpha)d\alpha - \left(\int_0^1 \alpha\rho(\alpha)d\alpha\right)^2. \quad (17)$$

Запишем для n -го шага итераций следующее представление:

$$\alpha_n = g^n(\alpha_0) = g^{n-1}(g(\alpha_0)), \quad (18)$$

т. е. рассмотрим α_n не только как однократное преобразование величины α_{n-1} , но и как $(n-1)$ -кратную композицию значения $\alpha_1 = g(\alpha_0)$.

Следовательно, в качестве основной вычислительной задачи остается расчет первого интеграла в формуле (13) или (17), определяющего ковариацию $K(n)$ (второй начальный момент) величин α и $g^n(\alpha)$. Используя представление (18) в виде композиции $g^n(\alpha) = g^{n-1}(\alpha) \circ g(\alpha)$, найдем для ковариации величин α и $g^n(\alpha)$

$$K(n) = \overline{\alpha_n\alpha_0} = \int_0^1 g^{n-1}(\alpha)P\alpha d\alpha. \quad (19)$$

Очевидно, что процесс преобразований в формуле (19) может быть продолжен на основе представлений

$$\alpha_{n-1} = g^{n-1}(\alpha) = g^{n-2} \circ g(\alpha), \dots, \alpha_2 = g \circ g(\alpha), \alpha_1 = g(\alpha).$$

В итоге описанных преобразований автокорреляционная функция орбит хаотического отображения с равномерным инвариантным распределением представляется в виде

$$R(n) = \int_0^1 \alpha P^n \alpha d\alpha - \frac{1}{4}. \quad (20)$$

Заметим, что для любого отображения с равномерной инвариантной плотностью на единичном интервале дисперсия процесса одинакова:

$$R(0) = \int_0^1 \alpha^2 d\alpha - \frac{1}{4} = \frac{1}{12}. \quad (21)$$

Чтобы эффективно пользоваться при расчете автокорреляционных функций хаотических отображений внешне простой и элегантной формулой (20), необходимо знать результат многократного действия оператора Перрона–Фробениуса соответствующего отображения на независимую переменную α . Чтобы аналитически найти решение этой задачи, независимую переменную необходимо представить в виде:

а) либо суммы (!) константы и *линейной собственной функции* (линейных собственных функций) оператора Перрона–Фробениуса;

б) либо суммы константы и функции из ноль-пространства оператора Перрона–Фробениуса.

Результат действия оператора на константу окажется константой, собственная функция будет воспроизводиться с множителем в виде собственного числа, а действие на функцию из ноль-пространства даст ноль.

В результате интеграл в выражении (17) для автокорреляционной функции существенно упростится и его можно будет проинтегрировать – аналитически или численно. Решение спектральной задачи для оператора Перрона–Фробениуса приобретает, таким образом, важное значение для радиофизической задачи о расцеплении корреляций в динамической системе.

Автокорреляционная функция кусочно-линейного отображения с произвольным наклоном ветвей

Применим формулу (19) для расчета автокорреляционной функции кусочно-линейного отображения с произвольным наклоном полных линейных ветвей (3). Рассматривая линейную собственную функцию соответствующего оператора Перрона–Фробениуса (6) пока в общем виде

$$\psi_1(x) = (x - \mu),$$

согласно (19) получим для автокорреляционной функции отображения (3) следующее аналитическое представление:

$$\begin{aligned} R(n) &= \int_0^1 \alpha P^n (\Psi_1(\alpha) + \mu) d\alpha - \frac{1}{4} = \int_0^1 (\alpha(\lambda_1^n \Psi_1(\alpha) + \mu)) d\alpha - \frac{1}{4} = \\ &= \int_0^1 (\alpha(\lambda_1^n (\alpha - \mu) + \mu)) d\alpha - \frac{1}{4} = \lambda_1^n \left(\frac{1}{3} - \frac{\mu}{2} \right) + \frac{\mu}{2} - \frac{1}{4}. \end{aligned} \quad (22)$$

Применим формулу (22) для определения автокорреляционной функции орбит некоторых важных частных случаев кусочно-линейных отображений, перечисленных в табл. 1. Соответствующие выражения для искомой характеристики содержит табл. 2.

Результаты, приведенные в табл. 2 для сдвигов Бернулли и пирамидального отображения, совпадают с опубликованными ранее [1], что можно трактовать как подтверждение правильности предложенного обобщенного алгоритма для отображений с произвольным наклоном кусочно-линейных ветвей. Классическому сдвигу Бернулли отвечает спадающая по экспоненциальному закону автокорреляционная функция. Инверсный сдвиг Бернулли характеризует осциллирующая (и при этом меняющая знак) автокорреляционная функция. Пирамидальное отображение демонстрирует «дискретный белый шум».

Автокорреляционные функции хаотических отображений на интервале (0, 1)

Отображение	Автокорреляционная функция	Характер автокорреляционной функции
Сдвиг Бернулли	$R(n) = \frac{1}{12} 2^{-n} = \frac{1}{12} e^{-n\Lambda}, n = 0, 1, 2, \dots$	Монотонно убывающая. Показатель Ляпунова $\Lambda = -\ln \lambda_1 = \ln 2$
Инверсный сдвиг Бернулли	$R(n) = \frac{1}{12} (-2^{-n}), n = 0, 1, 2, \dots$	Убывающая, осциллирующая
Пирамидальное отображение	$R(n) = \frac{1}{12} \delta(n) = \begin{cases} 1/12, & n = 0, \\ 0, & n \geq 1. \end{cases}$	Дельта-коррелированная, «дискретный белый шум»
Скошенное пирамидальное отображение	$R(n) = \frac{1}{12} (2\xi_1 - 1)^n, n = 0, 1, 2, \dots$	Зависит от значения параметра $\xi_1 \in (0, 1)$: – монотонно убывающая при $2\xi_1 > 1$; – осциллирующая, убывающая при $2\xi_1 < 1$; – «дискретный белый шум» при $\xi_1 = 1/2$

Результат для скошенного пирамидального отображения говорит о зависимости характера автокорреляционной функции от значения точки излома отображения: при $\xi_1 > 1/2$ наблюдаются свойства автокорреляционной функции сдвигов Бернулли, а при $\xi_1 < 1/2$ поведение автокорреляционной функции подобно поведению этой характеристики для инверсных сдвигов Бернулли. При $\xi_1 = 1/2$ скошенное отображение приобретает вид классического пирамидального отображения, в соответствии с чем $R(n) = 0$ для всех $n > 1$.

В работе рассмотрено кусочно-линейное отображение с произвольным наклоном линейных ветвей, определенное на единичном интервале и имеющее полные ветви (переводящие отрезок своего определения на полный интервал задания отображения). Особенность отображения состоит в том, что оно носит обобщенный характер. Из него при соответствующем подборе параметров (угла наклона ветви, точек разбиения единичного отрезка) могут быть получены кусочно-линейные отображения с любым количеством ветвей.

Главными решаемыми задачами были формулировка оператора Перрона–Фробениуса, нахождение его собственной линейной функции или линейной функции его ядра (ноль-пространства) и аналитический расчет автокорреляционной функции орбит.

Линейная собственная функция находилась непосредственно из определяющего ее уравнения. Знания только одной линейной собственной функции и соответствующего собственного числа было достаточно для аналитического расчета автокорреляционной функции орбит, поскольку

для расчета в основном требовался результат многократного действия оператора Перрона–Фробениуса на независимую переменную. И чтобы этот результат получить, независимая переменная формально выражалась через сумму собственной функции и константы, которую требовалось определить. Многократное действие оператора на такую линейную комбинацию сопровождалось увеличением степени собственного числа, присутствующего в качестве множителя перед собственной функцией. Затем происходила обратная замена: собственная функция представлялась как линейная функция независимой переменной, и проводился успешный расчет интеграла, определяющего автокорреляционную функцию.

Легко проверялась правильность расчетов путем сравнения полученных результатов с результатами для кусочно-линейных отображений, ветви которых имеют одинаковый по модулю угловой коэффициент.

Знание линейных собственных функций позволяет достичь аналитического результата и выявить особенности различных отображений в плане автокорреляционных свойств их орбит – экспоненциальный спад или осцилляции. Скорость «расщепления корреляций» определяется значением собственного числа, отвечающего линейной функции. Наличие линейной функции ядра оператора приводит к особому виду автокорреляционной функции, отвечающей «дискретному белому шуму»: уже первая итерация показывает отсутствие корреляционной связи между различными сечениями процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аникин В. М., Голубенцев А. Ф.* Аналитические модели детерминированного хаоса. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 328 с.
2. *Golubentsev A. F., Anikin V. M.* The explicit solutions of Frobenius–Perron equation for the chaotic infinite maps // Intern. J. of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering. 1998. Vol. 8, № 4–5. P. 1049–1051.
3. *Голубенцев А. Ф., Аникин В. М., Аркадакский С. С.* О некоторых свойствах оператора Фробениуса–Перрона для сдвигов Бернулли // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8, № 2. С. 67–73.
4. *Голубенцев А. Ф., Аникин В. М.* Специальные функции в теории детерминированного хаоса // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8, № 3. С. 50–58.
5. *Goloubentsev A. F., Anikin V. M., Arkadaksky S. S.* On the convergence of nonstationary solutions of the Perron-Frobenius equation to the invariant density // International Conference on Control of Oscillations and Chaos, Proceedings 2nd International Conference on Control of Oscillations and Chaos (COC 2000). St. Petersburg, Russia, 2000. St. Petersburg : IEEE, 2000. P. 142–143.
6. *Голубенцев А. Ф., Аникин В. М.* Инвариантные функциональные подпространства линейных эволюционных операторов хаотических отображений // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2005. Т. 13, № 1–2. С. 3–17.
7. *Аникин В. М., Аркадакский С. С., Ремизов А. С.* Аналитическое решение спектральной задачи для оператора Перрона–Фробениуса кусочно-линейных хаотических отображений // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 2. С. 16–34.

8. Аникин В. М., Ремизов А. С., Аркадакский С. С. Собственные функции и числа оператора Перрона–Фробениуса кусочно-линейных хаотических отображений // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 2. С. 62–75.
9. Аникин В. М., Аркадакский С. С., Ремизов А. С. Особенности решения спектральной задачи для оператора Перрона–Фробениуса, обусловленные критическим сочетанием параметров хаотического отображения // Теоретическая физика. 2007. Т. 8. С. 176–183.
10. Аникин В. М. Спектральные задачи для оператора Перрона–Фробениуса // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 4. С. 35–48.
11. Аникин В. М., Аркадакский С. С., Ремизов А. С., Купцов С. Н., Василенко Л. П. Определение инвариантной плотности отображения Реньи на основе Гауссова подхода // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 6. С. 46–56.
12. Аникин В. М., Аркадакский С. С., Купцов С. Н., Ремизов А. С., Василенко Л. П. О показателе Ляпунова для хаотических одномерных отображений с равномерным инвариантным распределением // Изв. РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72, № 12. С. 1780–1784.
13. Аникин В. М., Аркадакский С. С., Ремизов А. С., Купцов С. Н., Василенко Л. П. Релаксационные свойства хаотических динамических систем // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1743–1749.
14. Аникин В. М., Аркадакский С. С., Купцов С. Н., Ремизов А. С. Классификация хаотических моделей малоразмерной нелинейной динамики // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1797–1800.
15. Аникин В. М., Чебаненко С. В. Аналитический расчет корреляционных функций дискретных хаотических сигналов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 103–109.

УДК 530

О ПРОБЛЕМЕ СХОДИМОСТИ РЯДА ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В КВАЗИПОТЕНЦИАЛЬНОМ МЕТОДЕ

С. В. Чурочкина

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: klechshevskaya@mail.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с проблемой сходимости ряда теории возмущений в квазипотенциальном подходе. Обсуждаются и систематизируются полученные к настоящему времени поправки, зависящие от параметра отношения масс частиц.

Ключевые слова: теория связанных состояний, квазипотенциальный подход.

About the Problem of Convergence of the Series of the Perturbation Theory in the Quasipotential Method

S. V. Churochkina

The questions connected to the problem of convergence of the series of the perturbation theory in quasipotential approach are considered. The mass ratio corrections obtained recently are discussed and systematized.

Key words: theory of bound states, quasipotential approach.

Замкнутая система двух релятивистских частиц с массами m_1 и m_2 характеризуется сохраняющейся полной энергией E . В задаче на рассеяние

$$E = \sqrt{\mathbf{p}_1^2 + m_1^2} + \sqrt{\mathbf{p}_2^2 + m_2^2} = \sqrt{\mathbf{q}_1^2 + m_1^2} + \sqrt{\mathbf{q}_2^2 + m_2^2}, \quad (1)$$

где $\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i$ – импульсы начального и конечного состояний частицы с массой m_i соответственно, $i = 1, 2$.

В случае связанного состояния

$$E = \sqrt{\mathbf{P}^2 + M^2}, \quad (2)$$

где M – масса покоя связанного состояния; $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$ – полный импульс системы двух частиц.

При рассмотрении задачи на рассеяние согласно (1) получают $E \geq m_1 + m_2$. В случае же связанного состояния системы двух частиц согласно (2) полная энергия определяется как $E < m_1 + m_2$.

В системе центра масс

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = 0, \\ \mathbf{p}_1 &= -\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}. \end{aligned} \quad (3)$$

Релятивистская система двух частиц описывается с помощью полной двухчастичной функции Грина G , которая в системе центра масс параметризуется, как показано на рис. 1. Здесь p_i и q_i – 4-импульсы начального и конечного состояний i -й частицы, $i = 1, 2$; p_0 и q_0 – относительные энергии начального и конечного состояний,

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{E^2 + m_1^2 - m_2^2}{2E^2}, \\ \eta_2 &= \frac{E^2 + m_2^2 - m_1^2}{2E^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

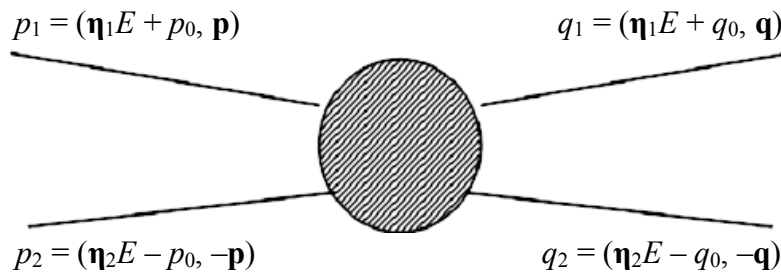


Рис. 1. Параметризация двухчастичной функции Грина вне массовой поверхности в системе центра масс

Положим

$$E = \eta_1 E + \eta_2 E = E_1 + E_2.$$

Для системы двух частиц, связанной кулоновским взаимодействием,

$$E_C = m_1 + m_2 - \frac{\mu\alpha^2}{2n^2}, \quad (5)$$

где μ – приведенная масса; α – постоянная тонкой структуры; n – главное квантовое число. Учитывая (5), выражения (4) с точностью до α^4 можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \eta_1 E &= m_1 - \frac{\mu^2 \alpha^2}{2m_1 n^2}, \\ \eta_2 E &= m_2 - \frac{\mu^2 \alpha^2}{2m_2 n^2}. \end{aligned}$$

Известно, что при $\alpha\mu \rightarrow 0$

$$\frac{\alpha\mu}{(p^2 + \alpha^2\mu^2)^2} = \pi^2 \delta(\mathbf{p}),$$

где $\delta(\mathbf{p})$ – дельта-функция Дирака.

Поэтому согласно (5)

$$E \rightarrow E_C \cong m_1 + m_2. \quad (6)$$

Волновую функцию $\Psi_{100}(\mathbf{p})$ в приближении $\alpha\mu \rightarrow 0$ можно преобразовать следующим образом:

$$\Psi_{100}(\mathbf{p}) = \frac{8\pi\alpha\mu}{(p^2 + \alpha^2\mu^2)^2} \varphi_1(0)(2\pi)^{-3/2} \Rightarrow \frac{8\pi}{\sqrt{(2\pi)^3}} \pi^2 \delta(\mathbf{p}) \varphi_1(0) = \sqrt{(2\pi)^3} \delta(\mathbf{p}) \varphi_1(0), \quad (7)$$

где $\varphi_1(0) = \frac{\alpha^3 \mu^3}{\pi}$.

$E = m_1 + m_2$ – единственный случай, когда выражения для полной энергии (1) и (2) совпадают. Тогда связанное состояние может быть описано в терминах амплитуды рассеяния T на массовой поверхности.

Для описания системы двух частиц (фермионов) используют двух-временную функцию Грина G в импульсном представлении

$$\overline{G}^+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = \overline{G}_0^+ + \overline{G}_0 T \overline{G}_0^+, \quad (8)$$

$$T = K + K G K, \quad (9)$$

$$\overline{G}_0^+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = F = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{p} - \mathbf{q}) (E - \varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p})^{-1}, \quad (10)$$

где G_0 – функция Грина невзаимодействующих частиц; $\varepsilon_{ip} = \sqrt{p^2 + m_i^2}$, символ « $\overline{\quad}$ » означает переход от четырехвременного формализма функций Грина к двухвременному, т. е. интегрирование по относительным энергиям p_0 и q_0 :

$$\overline{G}(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = (2\pi)^{-2} \int dp_0 dq_0 G(p_1, p_2; q_1, q_2);$$

символ «+» означает проектирование на состояние с положительными значениями энергии фермионов

$$\overline{G}^+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = u_1^*(\mathbf{p}) u_2^*(-\mathbf{p}) \overline{G}(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) \gamma_{10} \gamma_{20} u_1(\mathbf{q}) u_2(-\mathbf{q});$$

γ_{10} и γ_{20} – матрицы Дирака; u_i – дираковский биспинор, являющийся положительно-частотным решением уравнения Дирака; символ «*» означает транспонирование дираковского биспинора u_i , $i = 1, 2$; K – ядро уравнения Бете–Солпитера, представляющее собой сумму двухчастично неприводимых диаграмм; $T(\mathbf{p}, \mathbf{q}, p_0, q_0; E)$ – релятивистская амплитуда рассеяния двух частиц вне массовой поверхности, определяемая из уравнения Бете–Солпитера.

Квазипотенциальное уравнение для волновой функции $\Psi_E(\mathbf{q})$ системы двух различных фермионов записывается в виде

$$\begin{aligned} (\overline{G}^+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E))^{-1} \Psi_E(\mathbf{q}) &= 0 \\ \text{или } F^{-1}(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) \Psi_E(\mathbf{q}) &= V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) \Psi_E(\mathbf{q}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ – квазипотенциал, который определяется следующим образом:

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = F^{-1} - (\overline{G}^+)^{-1} = F^{-1} - F^{-1} \overline{G}_0 T \overline{G}_0^+ (\overline{G}^+)^{-1}. \quad (12)$$

Подставляя в (11) явный вид F (10), получают следующее уравнение:

$$(E - \varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p}) \Psi_E(\mathbf{p}) = (2\pi)^{-3} \int V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) \Psi_E(\mathbf{q}) d^3 q. \quad (13)$$

Введем в рассмотрение оператор τ , равный

$$\tau = F^{-1} \overline{G}_0 T \overline{G}_0^+ F^{-1}. \quad (14)$$

Выражение квазипотенциала (12) для системы двух фермионов может быть также записано с помощью оператора τ следующим образом:

$$V = \frac{\tau}{1 + F\tau}. \quad (15)$$

В квантовой электродинамике кулоновское взаимодействие для связанных состояний является основным. Согласно (6) $E \approx m_1 + m_2$, поэтому важно изучить поведение оператора τ вблизи массовой поверхности.

Запишем часть выражения (14) для оператора τ в явном виде

$$\begin{aligned} \overline{G_0 T G_0}^+ (\mathbf{p}, \mathbf{q}) = & -u_1^*(\mathbf{p})u_2^*(-\mathbf{p}) \int dp_0 dq_0 \int dk_0 dk'_0 \delta(p_0 - k_0) \delta(k'_0 - q_0) S_1(p_1) S_2(p_2) \times \\ & \times T(k_0, k'_0, \mathbf{p}, \mathbf{q}; E) S_1(q_1) S_2(q_2) \gamma_{10} \gamma_{20} u_1(\mathbf{q}) u_2(-\mathbf{q}), \end{aligned} \quad (16)$$

где S_i – одночастичная функция Грина i -го фермиона.

Представляя $\delta(x) = (2\pi)^{-1} \int dt \exp(ixt)$ и используя в соответствии с теорией вычетов формулы типа

$$\int \frac{dk_0}{k_0^2 - \mathbf{k}^2 + i\varepsilon} \exp(-ik_0 t) = -\frac{\pi i}{|\mathbf{k}|} \exp(-i|\mathbf{k}||t|), \quad (17)$$

находим, что выражение (16) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \overline{G_0 T G_0}^+ (\mathbf{p}, \mathbf{q}) = & u_1^*(\mathbf{p})u_2^*(-\mathbf{p}) \int dt \int d\tau' \int dk_0 \int dk'_0 \exp(ik'_0 \tau') \exp(ik_0 t) \times \\ & \times T(k_0, k'_0, \mathbf{p}, \mathbf{q}; E) (\exp[-i(\varepsilon_{2p} - E_2 - i\varepsilon)|t|] + \\ & \exp[-i(\varepsilon_{1p} - E_1 - i\varepsilon)|t|]) (\exp[-i(\varepsilon_{2q} - E_2 - i\varepsilon)|\tau'|] + \\ & + \exp[-i(\varepsilon_{1q} - E_1 - i\varepsilon)|\tau'|]) \gamma_{10} \gamma_{20} u_1(\mathbf{q}) u_2(-\mathbf{q}) F(\mathbf{p}) F(\mathbf{q}). \end{aligned} \quad (18)$$

Проведём интегрирование (18) по t и τ' , применяя разложение вида

$$\exp[-i(\varepsilon_{2p} - E_2 - i\varepsilon)|t|] = \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-i)^k (\varepsilon_{2p} - E_2)^k |t|^k}{k!} \right) \exp[-\varepsilon|t|]. \quad (19)$$

На массовой поверхности $E_i = \varepsilon_{ip}$, и поэтому имеем

$$\tau(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) + (\varepsilon_{ip} - E_i)^n \Delta T'_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) (\varepsilon_{iq} - E_i)^n \approx T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E), \quad (n=1, 2, \dots), \quad (20)$$

$$T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E) = T_+(p_0 = 0, q_0 = 0, \mathbf{p}, \mathbf{q}; E), \quad (21)$$

где $\Delta T'_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ – поправка к амплитуде рассеяния $T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ вблизи массовой поверхности.

Следовательно, на массовой поверхности оператор $\tau(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ и физическая амплитуда рассеяния $T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ совпадают. В связи с этим выражение (15) можно записать следующим образом:

$$V = \frac{T_+}{1 + FT_+}, \quad (22)$$

и в этом случае работает обычная диаграммная техника Фейнмана.

С учетом вышесказанного квазипотенциальное уравнение принимает вид

$$(E_C - \varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p})\Psi_E(\mathbf{p}) = (2\pi)^{-3} \int V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)\Psi_E(\mathbf{q})d^3q, \quad (23)$$

и уровни энергии находятся с помощью теории возмущений.

Решение задачи на сверхтонкое расщепление основного уровня энергии атома позитрония можно выполнить, используя δ -приближение волновой функции [1, 2]. При этом квазипотенциал задается фейнмановскими диаграммами (рис. 2).

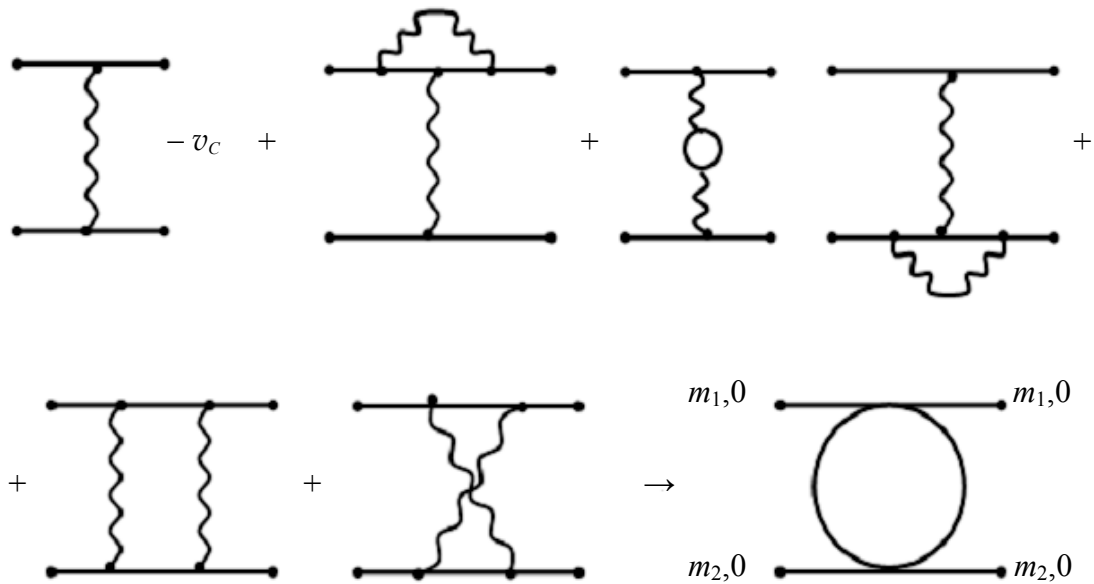


Рис. 2. Сумма фейнмановских диаграмм, необходимых для вычисления сверхтонкого расщепления основного уровня позитрония. Здесь v_c – кулоновский потенциал

Значение сверхтонкого расщепления основного уровня позитрония, полученное с использованием δ -приближения волновой функции, имеет вид

$$\Delta E_{ee}(\alpha^5) = \frac{\alpha^4 m}{2} (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) \left[\frac{7}{6} - \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{16}{9} + \ln 2 \right) \right], \quad (24)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_i$ – матрица Паули, $i = 1, 2$.

Особенностью этих вычислений является введение обрезания виртуального импульса в инфракрасной области по параметру обрезания ϵ , который компенсируется в сумме диаграмм, в связи с чем его точная величина не имеет значения.

Таким образом, при расчетах величины сверхтонкого расщепления основного уровня энергии водородоподобного атома с использованием δ -приближения кулоновской волновой функции (7) получаются лишь целочисленные по α вклады, точно так же, как это имеет место при решении задач на рассеяние.

Для увеличения точности расчетов необходимо выйти за массовую поверхность и использовать выражение для квазипотенциала (22). В этом случае связь между энергией и импульсом разрывается, и аргументы амплитуды $T_+(\mathbf{p}, \mathbf{q}; E)$ оказываются независимыми. В работе [3] проанализирована аннигиляционная диаграмма с поляризационной вставкой (рис. 3) и обнаружен логарифмический по постоянной тонкой структуры вклад, равный

$$\Delta E(\alpha^6 \ln \alpha^{-1}) = \frac{1}{24} \alpha^6 m \ln \alpha^{-1} (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2). \quad (25)$$

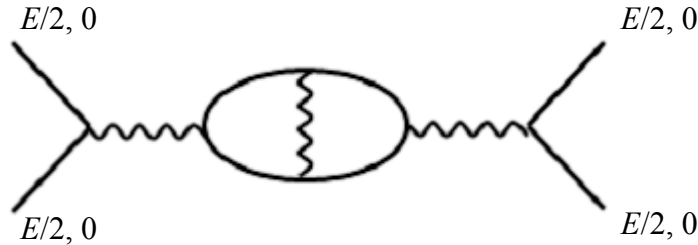


Рис. 3. Фейнмановская аннигиляционная диаграмма с поляризационной вставкой

Затем в работе [4] подобная параметризация диаграмм позволила вычислить логарифмические по α вклады от других трехфотонных диаграмм. Чтобы получить подобные вклады от диаграмм низшего по α порядка, необходимо использовать выражение квазипотенциала (15) через оператор τ .

Таким образом, в случае выхода за массовую поверхность величина энергии связи $W = E - m_1 - m_2$ позволяет избежать вопроса об особенностях квазипотенциала в инфракрасных областях.

Кроме того, при значениях импульсов $\mathbf{p}, \mathbf{q} \neq 0$ должно использоваться точное выражение кулоновской волновой функции. В результате ряд по постоянной тонкой структуре α усложняется из-за необходимости учесть

вать в пропагаторах диаграмм рис. 2 значения $E \neq m_1 + m_2$, $\mathbf{p}, \mathbf{q} \neq 0$. Степени α в этом случае возникают не только за счет зарядов в вершинах диаграмм, но и за счет новых модифицированных значений пропагатора.

Особенность такого подхода к расчету диаграмм особенно проявляется в существовании логарифмических по α вкладов, что может быть интерпретировано как следствие эффекта связанности частиц.

Если массы частиц равны, то уровни энергии характеризуются одним малым параметром – постоянной тонкой структуры α . Выражение для уровней энергии позитрония для независящих от спина S взаимодействий можно представить в виде ряда [5]

$$\frac{E(n^{2S+1}L_{2J+1})}{h} = f_{\text{RYD}}(a + b\alpha^2 + c\alpha^3 + d\alpha^3 \ln \alpha^{-1} + e\alpha^4 \ln \alpha^{-1} + f\alpha^4 + \dots), \quad (26)$$

где спектроскопическое обозначение $n^{2S+1}L_{2J+1}$ описывает состояние; S – спиновое квантовое число; J – квантовое число полного момента; h – постоянная Планка. Энергетические состояния атома с различными значениями L (от 0 до n) обозначаются большими буквами S, P, D, F, J, H и т. д. Явный вид коэффициентов a, b, c, d, e, f указан в работе [6]. Частота f_{RYD} равна cR_∞ , где c – скорость света в вакууме, R_∞ – постоянная Ридберга.

При этом надо отметить, что коэффициент e отличен от нуля только для взаимодействий в аннигиляционном канале.

Прецизионный расчет обнаружил отсутствие логарифмических по α поправок в прямом канале позитрония, а следовательно, и в мюонии.

Для водородоподобных систем, состоящих из частиц с различными массами, структура ряда (26) усложняется за счет необходимости учета массового коэффициента m_1/m_2 .

Как известно, структура уровней энергии водородоподобных атомов характеризуется тремя малыми параметрами: постоянной тонкой структуры α , связанной с зарядом электрона, величиной заряда Z тяжелой частицы, характеризуемой параметром $Z\alpha$, и массовым коэффициентом m_1/m_2 . Наибольший интерес вызывают поправки на отдачу, зависящие от параметров $Z\alpha$ и m_1/m_2 .

В обзоре [7] было отмечено, что первые поправки на отдачу ΔE , пропорциональные $(Z\alpha)^5 m_1^2/m_2$, генерируются ядром двухфотонных взаимодействий. Аргументация этого утверждения восходит к работам [8, 9] по применению двухчастичного релятивистского формализма к описанию связанных состояний. Полученный в этих работах результат от обмена двумя поперечными фотонами был впоследствии подтвержден в статьях [10, 11]:

$$\Delta E = \frac{1}{\pi} \frac{(Z\alpha)^5 \mu^3}{m_1 m_2} \frac{1}{n^3} \left\{ \frac{2}{3} \delta_{l_0} \ln \alpha^{-1} - \frac{8}{3} \ln[k_0(n)] - \frac{1}{9} \delta_{l_0} - \frac{7}{3} a_n + \right. \\ \left. + \frac{2}{m_2^2 - m_1^2} \delta_{l_0} \left(m_1^2 \ln \frac{m_2}{\mu} - m_2^2 \ln \frac{m_1}{\mu} \right) \right\}, \quad (27)$$

где l – орбитальное квантовое число; $\ln[k_0(n)]$ – логарифм Бете; δ_{l0} – символ Кронекера; $a_n = -2 \left[\ln \frac{2}{n} + \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) + 1 - \frac{1}{2n} \right] \delta_{l0} + \frac{1 - \delta_{l0}}{l(l+1)(2l+1)}$.

Отметим наличие в выражении (27) весьма высокого по порядку величины логарифмического по отношению масс частиц вклада, пропорционального $m_1^2 \ln \frac{m_2}{\mu} - m_2^2 \ln \frac{m_1}{\mu}$:

$$\begin{aligned} \Delta E^\beta &= \frac{(Z\alpha)^5 \mu^3}{\pi m_1 m_2} \frac{1}{n^3} \frac{2}{m_2^2 - m_1^2} \left[m_1^2 \ln \frac{m_2}{\mu} - m_2^2 \ln \frac{m_1}{\mu} \right] = \\ &= \frac{2(Z\alpha)^5 \mu^3}{\pi m_1 m_2} \frac{1}{n^3} \frac{1}{1 - \beta^2} \left[\beta^2 \ln \frac{1 + \beta}{\beta} - \ln(1 + \beta) \right] \sim \frac{2(Z\alpha)^5 \mu^3}{\pi m_1 m_2} \frac{1}{n^3} \beta^2 \ln \beta^{-1}, \quad (28) \end{aligned}$$

где $\beta = m_1/m_2$.

Иного логарифмического по массовому коэффициенту β вклада в тонкий сдвиг уровней энергии от других обменов во всех перечисленных работах обнаружено не было.

Все перечисленные в (28) поправки, в том числе логарифмический по массовому коэффициенту β член, получены с помощью разложений типа

$$\sqrt{p^2 + m_i^2} \approx m_i + \frac{p^2}{2m_i} + \dots, \quad (29)$$

Однако существуют и релятивистские эффекты отдачи, которые не могут быть описаны при разложениях типа (29).

Рассмотрим стандартный интеграл, при сравнении с которым устанавливаются наличие и величина поправки $\ln(m_1/m_2)^{-1}$:

$$i_\beta = \int_0^\infty \frac{dp}{\sqrt{p^2 + m_1^2} \sqrt{p^2 + m_2^2}} = \frac{\beta}{\mu(1 + \beta)} \int_0^\infty \frac{dp}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1}} = \frac{\beta}{\mu(1 + \beta)} K(\sqrt{1 - \beta^2}), \quad (30)$$

где $K(\sqrt{1 - \beta^2})$ – полный эллиптический интеграл первого рода.

Интеграл i_β не может быть выражен в элементарных функциях. Однако его легко представить в виде суммы

$$i_\beta = i_\beta^0 + i_\beta',$$

$$i_\beta^0 = \frac{\beta}{\mu(1 + \beta)} \int_0^\infty \frac{dq q}{(q^2 + \beta^2) \sqrt{q^2 + 1}} = \frac{\beta}{\mu(1 + \beta) \sqrt{1 - \beta^2}} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \approx \frac{\beta}{\mu(1 + \beta)} \ln \beta^{-1}, \quad (31)$$

$$i'_\beta = \frac{\beta^3}{\mu(1+\beta)} \int_0^\infty \frac{dq}{(q^2 + \beta^2)(\sqrt{q^2 + \beta^2} + q)\sqrt{q^2 + 1}} \approx \frac{\beta}{\mu(1+\beta)}. \quad (32)$$

Таким образом, величина i'_β представляет собой лидирующий вклад интеграла i_β .

Основной вклад интеграла (30) можно получить и иначе:

$$i_\beta = \frac{\beta}{\mu} \left\{ \int_0^\beta \frac{dp}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1}} + \int_\beta^1 \frac{dp}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1}} + \int_1^\infty \frac{dp}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1}} \right\}. \quad (33)$$

Раскладывая подынтегральные выражения в ряд, получим

$$\begin{aligned} \sqrt{p^2 + \beta^2} &= \beta \left(1 + \frac{p^2}{\beta^2} \right) \approx \beta + \frac{1}{2} \frac{p^2}{\beta} + \dots & (0 \leq p \leq \beta), \\ \sqrt{p^2 + \beta^2} &= p \left(1 + \frac{\beta^2}{p^2} \right) \approx p + \frac{1}{2} \frac{\beta^2}{p} + \dots & (\beta \leq p \leq \infty). \end{aligned} \quad (34)$$

Отсюда следует, что первое и последнее слагаемые логарифмических вкладов по β не дают. Остается вычислить интеграл

$$\frac{\beta}{\mu} \int_\beta^1 \frac{dp}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1}} \approx \frac{\beta}{\mu} \int_\beta^1 \frac{dp}{p} \left(1 + \frac{\beta^2}{p^2} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{p^2}{2} \right) \approx \frac{\beta}{\mu} \ln \beta^{-1}. \quad (35)$$

Ранее в работе [12] с применением указанной техники был исследован простейший обмен одним кулоновским фотоном. Установлено, что существует дополнительный логарифмический по массовому коэффициенту вклад в низший по постоянной тонкой структуры порядок тонкого сдвига S -уровней энергии водородоподобного атома:

$$\Delta \tilde{E}_C^{\ln} = - \frac{11}{8\sqrt{2}\pi} \frac{(Z\alpha)^5 \mu^3}{m_1 m_2} \frac{\beta^3}{1+\beta} \ln \beta^{-1}. \quad (36)$$

Всегда остается вопрос о том, не зависит ли результат исследования от особенностей выбранного метода описания связанных состояний.

О новых логарифмических по m_1/m_2 вкладах следует говорить особо: на протяжении многих лет найденная поправка [9], пропорциональная $\ln \beta^{-1}$, оставалась единственной. Некоторое время назад завершилась продолжи-

тельная дискуссия о вкладе $\frac{\alpha^6 \mu^3}{m_1 m_2} \ln \alpha^{-1}$ в тонкий сдвиг S -уровней энергии во-

дородоподобных атомов. Благодаря расчетам [5] было установлено, что для атомов с $m_1 \neq m_2$ такой вклад отсутствует.

Можно показать, что существование подобной логарифмической поправки как в расчетах [5], так и в исследованиях [13], обуславливает один и тот же стандартный интеграл. Выпишем соответствующее выражение, обращаясь к работе [14]:

$$\int d^3 p d^3 p' \frac{\mathbf{p}^2 \mathbf{p}'^2}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2 (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2 (p'^2 + \alpha^2 \mu^2)^2}. \quad (37)$$

Очень важно замечание автора [14] относительно расходимости этого интеграла. Факторы, не играющие роли для вычисления величин, не содержащих $\ln \alpha^{-1}$, опущены.

Несколько ранее и более точно интеграл такого же вида (37) исследовался в работе [13]. Для атомов с $m_1 \neq m_2$ имеем

$$I_{\text{st}} = \int \frac{d^3 p}{\varepsilon_{1p} \varepsilon_{2p} (p^2 + \alpha^2 \mu^2)} \int \frac{d^3 p'}{(p'^2 + \alpha^2 \mu^2) (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2}. \quad (38)$$

Интеграл по трехимпульсу \mathbf{p}' можно считать табличным, поэтому находим

$$I_{\text{st}} = (2\pi)^3 \int_0^\infty \frac{dp p}{\varepsilon_{1p} \varepsilon_{2p} (p^2 + \alpha^2 \mu^2)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\alpha \mu}.$$

Несложные алгебраические преобразования дают

$$I_{\text{st}} = \frac{(2\pi)^3}{m_2} \left\{ \int_0^\infty \frac{dp p}{\varepsilon_{1p} (p^2 + \alpha^2 \mu^2)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\alpha \mu} - \int_0^\infty \frac{dp p}{\varepsilon_{1p} \varepsilon_{2p} (\varepsilon_{2p} + m_2)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\alpha \mu} \right\}. \quad (39)$$

Первый интеграл членов, пропорциональных $\ln \beta^{-1}$, не содержит, его основной вклад равен

$$I_s^1 \cong \frac{4\pi^4}{m_1 m_2} \ln \alpha^{-1}.$$

Из работ [13, 14] следует, что подобные вклады компенсируются в сумме диаграмм. Во втором интеграле из (39) перейдем к безразмерной переменной с помощью замены $p = p' m_2$:

$$I_s^2 = -\frac{(2\pi)^3}{m_2^2} \int_0^\infty \frac{dp p}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1} (\sqrt{p^2 + 1} + 1)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\gamma}, \quad (40)$$

где $\gamma = \alpha \mu / m_2$.

Рассмотрим следующие интервалы изменения переменной интегрирования p : $0 \leq p \leq \gamma$; $\gamma \leq p \leq \beta$; $\beta \leq p \leq 1$ и $1 \leq p < \infty$. При $1 \leq p < \infty$ интеграл I_s^2 может содержать лишь целочисленные степени малых m_1/m_2 и α .

Далее последовательно оценим лидирующие вклады интегралов

$$\int_0^\gamma \frac{dp p}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1} (\sqrt{p^2 + 1} + 1)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\gamma} \approx \frac{1}{2\beta} \int_0^\gamma dp p \operatorname{arctg} \frac{p}{\gamma} \approx \frac{\gamma^2}{6\beta}, \quad (41)$$

$$\int_\gamma^\beta \frac{dp p}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1} (\sqrt{p^2 + 1} + 1)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\gamma} \approx \frac{1}{2\beta} \int_0^\gamma dp p \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{p} \right) \approx \frac{\pi}{4\beta} (\beta^2 - \gamma^2) - \frac{\gamma}{2\beta} (\beta - \gamma). \quad (42)$$

Как видно из (41) и (42), интервалы $0 \leq p \leq \gamma$ и $\gamma \leq p \leq \beta$ вкладов, пропорциональных $\ln \beta^{-1}$, не содержат. Наконец, по аналогии с вычислением интеграла (35) получим

$$\int_\beta^1 \frac{dp p}{\sqrt{p^2 + \beta^2} \sqrt{p^2 + 1} (\sqrt{p^2 + 1} + 1)} \operatorname{arctg} \frac{p}{\gamma} \approx \frac{1}{2} \int_0^\gamma dp \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{p} \right) \approx \frac{\pi}{4\beta} (1 - \beta) - \frac{\gamma}{2} \ln \beta^{-1}. \quad (43)$$

Таким образом, исследовавшийся различными методами стандартный интеграл I_{st} (38) содержит логарифмический по массовому коэффициенту m_1/m_2 вклад.

Учитывая поправку (36), можно сделать вывод о том, что поправки, пропорциональные $\ln \beta^{-1}$, следует вычислять в любых порядках теории возмущений по постоянной тонкой структуры α .

Вычисление поправок, имеющих нетривиальную зависимость от массового параметра m_1/m_2 , является актуальной задачей, так как в последнее время благодаря применению методов бездоплеровской двухфотонной спектроскопии было получено внушительное увеличение точности экспериментальных данных [15].

Согласно вышеизложенному вклад в величину тонкого сдвига S -уровней энергии водородоподобного атома, учитывающий эффекты отдачи, подобные указанным в (27), с учетом новых данных [9, 12, 16–21] можно записать в виде

$$\Delta \tilde{E} = \frac{(Z\alpha)^5 \mu^3}{\pi m_1 m_2 n^3} \left\{ \frac{2}{3} \delta_{l_0} \ln(Z\alpha)^{-1} - \frac{8}{3} \ln[k_0(n)] - \frac{1}{9} \delta_{l_0} - \frac{7}{3} a_n + \beta \ln \beta^{-1} [\beta C_\beta + \beta^2 C_{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta} C_{\alpha/\beta} + \alpha C_\alpha + \alpha C_{\alpha\beta} \ln \beta^{-1}] + \alpha \sqrt{\beta} C_{\sqrt{\beta}} + \alpha \beta \sqrt{\beta} C_{\beta\sqrt{\beta}} \right\}, \quad (44)$$

где

$$C_\beta = 2 - \frac{\sqrt{2}}{4} \approx 1,646,$$

$$C_{\beta^2} = -\frac{11}{8\sqrt{2}} \approx -0,972,$$

$$C_{\alpha/\beta} = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi} [\ln(1 + \sqrt{2}) - \sqrt{2}] \approx 0,480,$$

$$C_{\alpha} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{17}{9} + \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3}{2} (1 + 2\sqrt{2}) \ln(1 + \sqrt{2}) + 6 \ln 2 \right] \approx 0,539,$$

$$C_{\alpha\beta} = \frac{1}{\pi} - \frac{2}{\pi^2} \approx 0,116,$$

$$C_{\sqrt{\beta}} = \frac{\pi}{4} \approx 0,785,$$

$$C_{\beta\sqrt{\beta}} = -\frac{3}{16} \approx 0,187.$$

В заключение, необходимо отметить, что квазипотенциальный подход является исключительно эффективным методом описания связанных состояний в квантовой электродинамике. Он совмещает простоту и наглядность трехмерного формализма нерелятивистской квантовой механики с ковариантным аппаратом квантовой теории поля. Этот подход открывает новые возможности для повышения точности расчета величины тонкого сдвига уровней энергии водородоподобных атомов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фаустов Р. Н. Квазипотенциальный метод в задаче об уровнях энергии позитрония : Сообщение – Р-1572. Дубна : Изд-во ОИЯИ, 1964. 24 с.
2. Тюхтяев Ю. Н. Учет эффектов связанности в позитронии // Теоретическая и математическая физика. 1978. Т. 36, № 2. С. 264–270.
3. Нюнько Н. Е., Тюхтяев Ю. Н. Квазипотенциальный подход к расчету диаграмм однофотонного обмена с поляризационным оператором // Теоретическая и математическая физика. 1972. Т. 12, № 1. С. 56–63.
4. Нюнько Н. Е., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н. Исследование некоторых логарифмических вкладов $\sim \alpha^6 \ln \alpha$ в сверхтонкое расщепление основного уровня позитрония // Ядерная физика. 1979. Т. 30, вып. 2(8). С. 457–464.
5. Fell R. N. Order $\alpha^4 \ln \alpha^{-1} f_{\text{RYD}}$ Correction to the $n = 1$ and $n = 2$ Energy Levels of Positronium // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68, № 1. P. 25–28.
6. Mohr P. CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 2010 // Rev. Modern Phys. 2012. Vol. 84, № 4. P. 1527–1605.
7. Eides M., Grotch H., Shelyuto V. A. Theory of Light Hydrogenlike Atoms // Physics Reports. 2001. Vol. 342, № 2. P. 63–261.
8. Salpeter E. E. Mass Corrections to the Fine Structure of Hydrogen-Like Atoms // Phys. Rev. 1952. Vol. 87, № 2. P. 328–343.
9. Fulton T., Martin P. C. Two-Body System in Quantum Electrodynamics. Energy Levels of Positronium // Phys. Rev. 1954. Vol. 95, № 3. P. 811–822.
10. Grotch H., Yennie D. R. Effective Potential Model for Calculating Nuclear Corrections to the Energy Levels of Hydrogen // Rev. of Modern Phys. 1969. Vol. 41, № 2. P. 350–374.

11. *Нюнько Н. Е., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* Влияние движения ядра на тонкую структуру водорода : Сообщение – P2-7493. Дубна : Изд-во ОИЯИ, 1973. 16 с.
12. *Бойкова Н. А., Клещевская С. В., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* К вопросу о логарифмических по отношению масс частиц вкладов в тонкий сдвиг S -уровней энергии водородоподобных атомов в пятом порядке по константе тонкой структуры // *Ядерная физика*. 2004. Т. 67, № 3. С. 548–556.
13. *Bodwin G. T., Yenie D. R.* Hyperfine Splitting in Positronium and Muonium // *Physics Reports (Section C of Physics Letters)*. 1978. Vol. 43, № 6. P. 267–303.
14. *Fell R. N.* Single Transverse Photon Contribution to the $2S$ Energy Level of Positronium. Waltham : Brandeis University, 1992. 40 p.
15. *Parthey C. G., Matveev A., Alnis J., Bernhardt B., Beyer A., Holzwarth R., Maistrou A., Pohl R., Predehl K., Udem T., Wilken T., Kolachevsky N., Abgrall M., Rovera D., Salomon C., Laurent P., Hänsch T. W.* Improved Measurement of the Hydrogen $1S$ – $2S$ Transition Frequency // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, № 20. P. 203001-1–203001-5.
16. *Бойкова Н. А., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* О вкладах порядка $\alpha^6 \ln(m_1/m_2)$ в тонкий сдвиг S -уровней энергии мюония // *Ядерная физика*. 1998. Т. 61, № 5. С. 866–870.
17. *Бойкова Н. А., Клещевская С. В., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* Исследование логарифмических по отношению масс электрона и мюона вкладов в сдвиг S уровней энергии мюония // *Ядерная физика*. 2003. Т. 66, № 5. С. 925–933.
18. *Бойкова Н. А., Клещевская С. В., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* К вопросу о влиянии движения ядра на тонкую структуру водородоподобного атома с различными массами частиц // *Теоретическая и математическая физика*. 2006. Т. 149, № 3. С. 325–338.
19. *Бойкова О. А., Клещевская С. В., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н.* Особенности квазипотенциального подхода к исследованию высших по константе тонкой структуры поправок к тонким сдвигам уровней энергии водорода // *Ядерная физика*. 2010. Т. 73, № 6. С. 1024–1032.
20. *Churochkina S. V.* Higher in the mass ratio contributions to the fine shift of S energy levels in the hydrogen-like atoms // *Тр. XVIII междунар. науч. конф. молодых учен. и спец. к 105-летию Н. Н. Боголюбова (ОМУС-2014)*. Дубна : ОИЯИ, 2014. С. 279–283.
21. *Удалова А. А., Чурочкина С. В.* Логарифмические по отношению масс частиц поправки в тонкий сдвиг S уровней энергии водородоподобных атомов от диаграммы параллельного обмена одним кулоновским и одним поперечным фотонами // *Когерентная оптика и оптическая спектроскопия : XVIII междунар. молодежная науч. шк., 27–29 октября 2014 г. : сб. ст.* Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2014. С. 194–197.

УДК 004.4

КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА НАДВИЖКИ НЕРАЗРЕЗНЫХ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТОВ

В. И. Наянов, Ю. В. Ноянов

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: YVN@inbox.ru

Описывается система компьютерного слежения за напряженно-деформируемым состоянием опор и пролетного строения при его движении на опору моста.

Ключевые слова: строительство мостовых переходов федерального значения, современные технологии контроля.

Computer Control of the Process of Continuous Sliding Bridge Spans

V. I. Nayanov, Yu. V. Noyanov

A system of computer monitoring the stress-strain state of support and the span when it is sliding is described.

Key words: building bridges of federal significance, control technology.

За последние десятилетия наибольшее распространение получил монтаж стальных и сталежелезобетонных мостов методом продольной надвигки мостовых пролетов. Для обеспечения безопасности надвигки и надежности мостовых конструкций во время строительства особое внимание уделяется контролю за процессом надвигки. В середине 90-х годов прошлого столетия Саратовский госуниверситет, ОАО «Волгомост» (г. Саратов) и ОАО «Гипротрансмост» (г. Москва) приступили к разработке и созданию системы тотального компьютерного контроля за процессом надвигки пролетного строения. Совершенствование системы контроля и расширение диапазона контролируемых параметров пролетного строения во время надвигки происходили в процессе строительства мостового перехода в с. Пристанное вблизи г. Саратова. В результате взаимодействия ученых университета, проектировщиков и строителей ОАО «Волгомост» были усовершенствованы многие узловые технологические моменты и предложены новые технические решения процесса продольной надвигки пролетного строения. В итоге этой деятельности была разработана и создана система компьютерного слежения за напряженно-деформированным состоянием опор и пролетного строения в процессе его надвигки.

Краткое описание системы и результаты ее использования при строительстве моста в с. Пристанное приводятся ниже. Нужно отметить, что автоматизированный контроль процесса строительства внеклассных мостов стал нормой и впоследствии применялся в различных модификациях при строительстве других мостов на Волге и Каме (в городах Астрахань, Волгоград, Казань, Ульяновск). Планируется использование компьютерного контроля и при новом строительстве внеклассных автодорожных и железнодорожных мостов в других регионах России.

Выбор основных параметров для контроля

В настоящее время при строительстве мостов применяется специальное шпренгельное устройство, позволяющее без сооружения временных опор надвигать пролетное строение длиной до 160 м. В процессе надвигки пролетного строения могут возникнуть напряжения и деформации, превышающие допустимые значения. При существующих допусках на сборку пролетных строений и установку перекаточных устройств накопленные суммарные вертикальные отклонения могут достигать величины 10–15 мм. Такие отклонения в уровнях опирания смежных балок, находящихся на од-

ной опоре, приводят к перегрузке одной из стенок пролетного строения. Для выравнивания реакций под стенками коробки в процессе надвигки пролетных строений моста через р. Волгу у с. Пристанное под перекаточными устройствами устанавливались гидравлические преобразователи (плоские домкраты грузоподъемностью 1000 т с ходом поршня до 50 мм). Эти преобразователи были объединены на опоре в единую гидравлическую систему.

Теоретические значения реакций опор, изгибающих моментов и поперечных сил для любого сечения пролетного строения определялись по моделирующей процесс надвигки программе «Роллинг», разработанной в проектом институте «Гипротрансмост». Результаты расчета содержали данные о нормативных значениях реакций, изгибающих моментов, поперечных сил, прогибов на каждом шаге надвигки пролетного строения в сечениях, назначенных проектировщиком. Кроме того, им же определялись значения критических реакций, исходя из обеспечения местной устойчивости отсеков стенок главных балок. В наиболее нагруженных сечениях (корневые участки консоли пролетного строения с наибольшим вылетом во время надвигки и стыки главных балок, имеющих переломы профиля) предусматривалось измерение напряжения по стенкам балок в зоне нижнего пояса.

Особое внимание уделялось отслеживанию динамики отклонения оголовков опор как наиболее уязвимого параметра с точки зрения опасности быстрого развития нештатной ситуации. На определенных интервалах надвигки опорные реакции могут достигать величин, сравнимых с величинами на стадии эксплуатации. Применяемые в перекаточных устройствах антифрикционные материалы обладают достаточным разбросом величины коэффициента трения скольжения, зависящего от многих факторов: температуры воздуха, удельного давления, продолжительности перерывов надвигки и т. п.

При строительстве моста в любой момент времени обеспечивался контроль за параметрами, характеризующими успешный ход монтажа: величиной усилия выталкивания, положением пролетного строения в пространстве (путем определения координат свободного конца аванбека), усилием в ветвях полиспастов шпренгельной системы, выбирающих прогиб консоли пролетного строения и гасящих колебания, длиной плети пролетного строения, выдвинутой за устой и консоли, а также за напряжением сжатия бетона в уровне объединения тела опоры с фундаментом.

Все замеры вышеприведенных параметров передавались на центральный компьютер для оперативного анализа, а при появлении нештатной ситуации для остановки надвигки на контрольном пункте управления строительством.

Структура системы компьютерного контроля

Компьютерная система контроля может функционировать при различных условиях внешней среды и параметрах работы:

– на открытом воздухе (температурный диапазон от плюс 60°С летом в металлической коробке до минус 35°С зимой) при прямом воздействии атмосферных осадков на оборудование системы;

– при наличии больших масс металла и работе мощных электроустановок;

– при большой протяженности системы (около 1500 метров).

Систему можно подразделить на три части:

1) цифровые измерительные устройства, реализующие непосредственные измерения требуемых физических величин с последующим представлением результатов измерения в некотором цифровом коде;

2) система сбора данных, выполняющая транспортировку полученных данных на центральную станцию (персональный компьютер);

3) программное обеспечение, предназначенное для управления системой сбора данных, отображения состояния производственного процесса в реальном масштабе времени, накопления и сохранения результатов измерений.

При контроле процесса продольной надвижки пролетного строения использовались измерительные устройства различного назначения:

– для определения расстояния надвижки;

– для определения реакций на опорах (по давлению в упомянутой выше гидравлической системе);

– для измерения напряжений в стенках пролетного строения, контроля напряжения сжатия бетона опор в уровне объединения тела опоры с фундаментом, определения усилия в ветвях полиспаста, выбирающего прогиб консоли пролетного строения;

– для отслеживания отклонения оголовков опор (с использованием источника лазерного излучения).

Система сбора данных – это локальная вычислительная сеть, узлами которой являются контроллеры удаленных устройств (КУУ) и один компьютер. Каждый КУУ имеет уникальный адрес, что позволяет организовать опрос датчиков следующим образом: центральная станция формирует кадр, включающий в себя адрес определенного устройства, и передает его по линии, все контроллеры удаленных устройств, включенные в сеть, принимают этот кадр, но только одно устройство опознает «свой» код и формирует ответ, включающий в себя данные поступающие в КУУ от цифрового датчика. Такой принцип работы позволяет проводить сбор данных в любой последовательности и избежать конфликтов при их транспортировке от многих узлов.

Программное обеспечение данной системы на языках программирования С и С++ состоит из нескольких взаимодействующих частей. Это драйвер (программа управления) устройством сопряжения персонального компьютера и линии, программа обработки и сохранения данных и программа графического представления данных, работающая в двух режимах (представление данных в реальном масштабе времени и просмотр сохраненных результатов). Имеются версии программного продукта, позволяющие работать в операционных системах MS-DOS и Windows.

Визуализация работы мониторинговой системы

Рассмотрим организацию вывода информации о состоянии процесса надвигки. Экран дисплея разделен на окна, и в каждом из них представлена информация о контролируемых параметрах (продвижение пролетного строения, отклонение оголовков опор, реакция опор, напряжение в стенках пролетного строения, натяжение троса в ветвях полиспаста, положение конца аванбека в плане, усилие в домкратах толкающего устройства и т. д.). Информация представлена в виде гистограмм, что позволяет руководителю надвигки быстро улавливать изменение общей картины состояния пролетного строения в любой момент времени.

В нижнем окне представлено схематическое изображение надвигаемого пролетного строения (с разбивкой на блоки и панели) и опор моста. В левом среднем окне выведены информация об отклонении оголовков опор в числовом виде и графическое представление гистограммой, которое применяется для визуального отображения большинства данных. Для каждой опоры дано предельно допустимое значение отклонения. В соседнем справа окне выведена информация по реакциям опор. Кроме данных, поступающих с измерительных устройств на каждой опоре, также выводятся изменяющиеся на каждом шаге надвигки значения предельно допустимой и теоретической реакций. В следующем окне этого ряда выводятся данные усилий в ветвях полиспаста по верховой и низовой стороне. В верхнем левом окне представлена информация о напряжении в стенках пролетного строения, при этом данные сгруппированы попарно для напряжений в верховой и низовой стенке с одинаковым удалением датчиков от конца пролетного строения с указанием расстояния. В среднем верхнем окне представляются результаты измерений сжатия бетона принимающей опоры в уровне верха фундамента в числовом и графическом форматах. В последнем окне осуществляется вывод информации о вертикальном прогибе и боковом отклонении конца аванбека. Для вертикального прогиба имеется возможность графического представления заранее введенных верхнего и нижнего предела по прогибу.

Все контролируемые параметры надвигки в реальном масштабе времени могут передаваться посредством модема в локальные сети заказчика и других участников строительства. Представленные также в виде гистограмм расчетные значения параметров, а также их предельные значения позволяют руководителю четко отследить либо нормальное, либо неблагоприятное поведение тех или иных характеристик надвигаемого пролетного строения и опор.

Поскольку такие характеристики, как отклонение оголовков опор и натяжения тросов в ветвях полиспаста могут при неблагоприятных обстоятельствах изменить свои значения в течение нескольких секунд, предусмотрены кнопки экстренного выключения толкающего устройства и тяговых лебедок. Следует заметить, что практика применения системы контроля на строительстве мостов через р. Волга в городах Саратов и Волгоград, а также моста через р. Кама у с. Сорочьи Горы (Татарстан) показала обязательность применения подобных устройств экстренного выключения.

Основные результаты применения системы компьютерного контроля

Постоянное сопровождение основных строительно-монтажных работ с помощью предложенной авторами системы компьютерного контроля позволяет в процессе надвижки пролетных строений не только своевременно получать необходимую информацию о состоянии наиболее ответственных зон и участков, но и на основе анализа полученных в реальном масштабе времени измерений вносить коррективы с целью предотвращения аварийных ситуаций (вплоть до остановки процесса надвижки), связанных с возрастанием напряжений в элементах конструкции. Анализ причин возникновения нештатных ситуаций позволяет также совершенствовать проектные решения и способы проведения работ, что в совокупности приводит к существенному удешевлению строительства.

Показателен такой пример. Во время надвижки конструкции в пролет между седьмой и восьмой опорами, когда вылет консоли составил 102,2 м, порывистый ветер со скоростью 15–20 м/с возбудил колебания пролетного строения как в вертикальной (амплитуда колебаний в этой плоскости достигала 60 см), так и в горизонтальной плоскостях. С помощью телеметрического контроля данные колебания были зафиксированы. График указанного процесса представлен на рис. 1, из него следует, что колебательный процесс носит модуляционный характер с явными участками нарастания и спада амплитуды колебаний. Это позволило сделать вывод о том, что выдвинутая консоль представляет собой колебательную систему с высокой добротностью. Следовательно, необходимо предусматривать меры для гашения колебаний консоли.

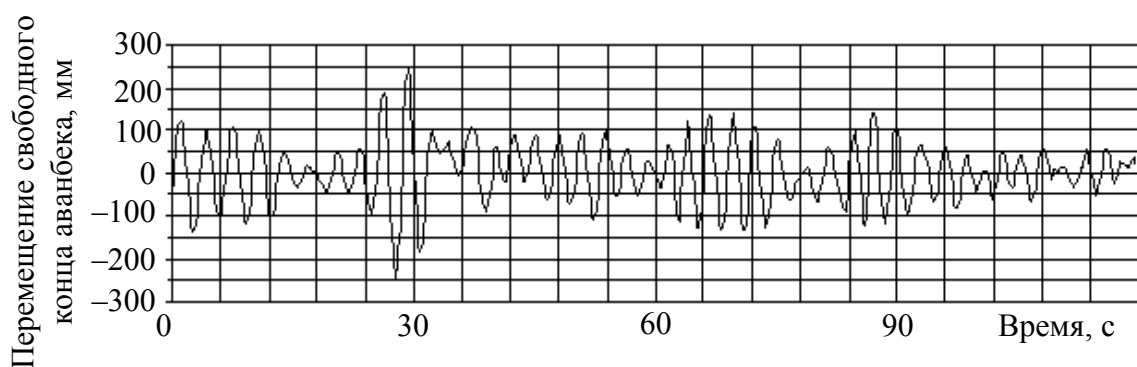


Рис. 1. График колебаний пролетного строения

Система компьютерного контроля напряженного состояния пролетного строения и опор прошла достаточную первичную проверку на работоспособность и может быть рекомендована для включения в нормативные документы по строительству мостов. Она не имеет мировых аналогов и впервые была представлена на конгрессе по мостостроению в Японии [1],

проводившемся международной ассоциацией *International Association for Bridge and Structural Engineering*. Дальнейшие этапы развития мониторинговой системы отражены в [2, 3]. Так, при строительстве моста в г. Ульяновске этой системой контролировался процесс подъема (нагрузок в траверсе) мостовых пролетов (рис. 2). Было достигнуто четырехкратное сокращение сроков строительства и экономический эффект в 1 млрд руб.



Рис. 2. Эпизод подъема второго пролета ульяновского моста (2007 г.)

В настоящее время проводится модернизация системы компьютерного контроля для использования её при сооружении внеклассных мостов в различных регионах России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chemerinsky O., Seliverstov V., Chvyrev A., Akatov V., Naynov Yu.* Controlling Methods of Bridge Launching Process // IABSE Symposium on Long-Span and High-Rise Structures. Kobe, Japan. 1998, September 2–4. Kobe : IABSE, 1998. P. 501–506.

2. *Наянов В. И., Ноянов Ю. В.* Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 86–87.

3. *Наянов В. И., Ноянов Ю. В.* Автоматизированная система мониторинга напряженного состояния мостовых конструкций в процессе строительства внеклассных мостовых переходов федерального значения в гг. Саратове, Казани, Волгограде, Астрахани и Ульяновске в режиме реального времени // Третий Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций : в 2 ч. Ч. 1. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2007. С. 105–106.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМЫ УШИРЕНИЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВНЕКЛАССНЫХ МОСТОВ

В. И. Наянов, Ю. В. Ноянов

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: YVN@inbox.ru

Описывается автоматизированный ультразвуковой комплекс, предназначенный для визуализации формы уширений буронабивных свай фундаментов мостовых опор.

Ключевые слова: строительство мостовых переходов федерального значения, современные технологии контроля.

Computer Visualization of the Broadening form of Bored Piles by Construction of Extracurricular Bridges

V. I. Nayanov, Yu. V. Noyanov

An automatic ultrasonic system designed to visualize the shape of the broadening of bored piles of foundation piers is described.

Key words: building bridges of federal significance, control technology.

За последние 15 лет в России завершено строительство (в отдельных случаях продолжается строительство второй и третьей очереди) протяженных мостовых переходов федерального значения через реки Волгу и Каму в районе Саратова, Волгограда, Казани, Ульяновска и Астрахани. При строительстве были использованы инновационные разработки, которые позволили сократить как сроки строительства, так и материальные затраты [1]. В 2002 г. за создание и внедрение нового конструктивно-технологического комплекса для сооружения опор мостов ряду специалистов (в том числе и одному из авторов настоящей статьи) была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Ниже описывается применявшийся при строительстве ультразвуковой комплекс компьютерной визуализации формы уширений буронабивных свай фундаментов мостовых опор. В основе данного метода определения формы и объема уширений буросвай лежит принцип ультразвуковой эхолокации. Спускаемая в измеряемую полость (уширение) акустическая антенна по заданной программе управляется компьютером и за полный цикл измерений продолжительностью 25 минут направленным ультразвуковым лучом сканирует все точки внутренней поверхности исследуемой полости. Полученная таким образом база данных накапливается в памяти компьютера, и по определенной программе форма уширений буронабивных столбов воспроизводится на экране дисплея через несколько минут после

окончания цикла измерений. Возможности программы пользователя позволяют рассматривать исследуемую полость в различных ракурсах с фиксированием необходимых сечений и разрезов. Кроме того, производится определение объема контролируемой выработки грунта с точностью до 5%.

Функциональная схема взаимодействия основных узлов ультразвукового эхолотатора

Комплекс по определению формы и объема полостей, заполненных водой, представляет собой управляемый компьютером ультразвуковой сканирующий эхолотатор. В его состав входят антенный комплекс, блок формирования и коммутации, персональный компьютер с интерфейсной платой и программным обеспечением (рис. 1).

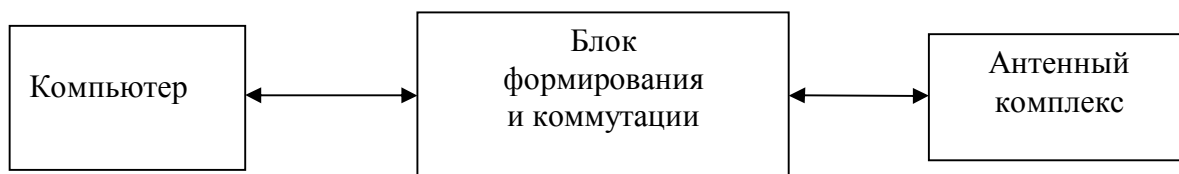


Рис. 1. Блок-схема установки

Антенный комплекс – это направленный пьезокерамический ультразвуковой преобразователь, служащий для получения сканирующего ультразвукового луча. Для получения узконаправленного луча применена система линз, диафрагм и поглотителей. Преобразователь закреплен на азимутальной установке, снабженной датчиками углов поворотов, что позволяет фиксировать его угловое положение с шагом $\pi/32$ в двух угловых координатах.

Блок формирования и коммутации включает усилитель мощности выходного зондирующего сигнала, приемный усилитель отраженного сигнала и коммутатор. На интерфейсной плате персонального компьютера имеются цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровые выходы для управления моторами азимутальной установки и входы для датчиков углов поворотов.

По программе компьютер генерирует через ЦАП канал, зондирующий амплитудно-частотно модулируемый сигнал, который, проходя через усилитель мощности и коммутатор, подается на ультразвуковой преобразователь. Коммутатор, управляемый компьютером, переключает всю систему либо в режим передачи, либо в режим приема. Электроакустический преобразователь генерирует узконаправленный ультразвуковой пучок, после чего вся система переключается в режим приема сигнала. Рассеянный на поверхности уширения сигнал с преобразователя попадает на приемный усилитель и через АЦП-канал интерфейсной платы вводится в компьютер.

Определение расстояния до поверхности производится по задержке отраженного сигнала. Такие измерения производятся во всех узлах угловой

сетки координат антенного комплекса. В итоге в компьютере создаётся файл с массивом значений расстояний от антенны до поверхности полости в угловых координатах.

Существующее программное обеспечение для данного комплекса состоит из трёх частей: программы измерений, программы для ручного или автоматического редактирования результатов и программы для просмотра результатов.

Программа измерений управляет работой всего комплекса для получения массива данных на основе отраженного сигнала. Программа редактирования результатов служит для удаления случайных выбросов, возникающих из-за внешних шумов. Программа просмотра результатов обеспечивает визуализацию исследуемого объекта на дисплее компьютера в виде проволочной модели. Эта программа дает возможность пользователю вращать рассматриваемую модель, делать различные сечения объекта плоскостью, изменять масштаб, выводить на печать содержимое экрана.

Конструктивные особенности и принципы действия системы измерений

Антенный блок. Основой акустической антенны является пьезокерамический диск, на противоположных поверхностях которого нанесены металлические электроды. При подаче на электроды переменного электрического напряжения диск возбуждает в водной среде ультразвуковые волны.

Первая задача – выбор рабочего диапазона частот излучаемых ультразвуковых волн, что связано с учетом различных факторов. Так, снижение несущей частоты сигнала приводит к существенному уменьшению поглощения звука в водной среде, заполненной производственным илом. Это является положительным фактором, поскольку измерительный комплекс должен функционировать в жестких производственных условиях. Уменьшение же рабочего частотного диапазона приводит к увеличению габаритов акустической антенны, что делает неудобной эксплуатацию устройства. Кроме того, при увеличении длины ультразвуковых волн уменьшается доля полезного отраженного от исследуемой поверхности сигнала из-за диффузного рассеяния. Именно этот тип рассеяния – от шероховатой поверхности во все стороны (а не прямое отражение) используется в описываемом приборе. Последнее обстоятельство сказывается на чувствительности (точности) измерительного комплекса в целом.

Увеличение же рабочего диапазона частот акустических волн приводит к значительному возрастанию поглощения ультразвука в глинистом растворе (реальной среде в уширениях основания буроскважин) и, как следствие, к потере работоспособности измерительного устройства. Таким образом, выбор размеров пьезоэлектрического излучателя основан на компромиссе между указанными выше факторами и является плодом математического и лабораторного моделирования.

Следующая проблема (не менее важная), которая возникала на пути создания акустической антенны, – это формирование ультразвукового луча с заданной диаграммой направленности. Дело в том, что применяемый способ зондирования контролируемой полости с целью повышения разрешающей способности прибора (выявление мелкомасштабных особенностей исследуемой внутренней поверхности уширений) требует сведения к минимуму диаметра поперечного сечения основного звукового луча для выбранного диапазона рабочих частот с центральной частотой порядка 230 кГц. Кроме того, необходимо, чтобы уровень излучения антенной боковых лепестков (побочных лучей) был подавлен по амплитуде по сравнению с основным сигналом, по крайней мере, на порядок. При несоблюдении последнего условия в процессе измерений может возникнуть неоднозначная ситуация, т. е. отраженный «напрямую» сигнал от побочного луча может превосходить по уровню полезное переизлучение при диффузном отражении основного луча, в результате чего возникает ложная информация, которая способна существенно исказить истинный рельеф исследуемой поверхности.

В результате многочисленных лабораторных исследований было найдено такое конструкторское решение:

- диаметр излучателя был специально выбран много больше его толщины с тем, чтобы на этой длине укладывалось несколько десятков длин акустических волн;

- с целью фокусировки излучаемых звуковых волн на расстоянии ~10 мм от диска помещена плосковогнутая сферическая фокусирующая линза;

- для подавления боковых лепестков диаграммы направленности акустической антенны на внешней плоской стороне фокусирующей линзы нанесен слой поглощающего ультразвук вещества.

В результате уровень боковых лепестков диаграммы направленности действительно был подавлен по напряжению почти на порядок по сравнению с основным сигналом, а диаметр акустического луча в месте наибольшей его фокусировки (область Эйри) составил не более 70–80 мм. Такой размер поперечного сечения акустического луча позволяет с достаточной достоверностью контролировать форму поверхности уширений, характерный размер которых варьируется в пределах 1–5 м.

Корпус антенны способен вращаться вокруг осей, проходящих через центр излучающего диска в двух перпендикулярных направлениях. Вращение осуществляется с помощью электродвигателей через понижающие редукторы. На осях вращения корпуса акустической антенны размещены оптические датчики положения углов поворота акустического луча как в меридиональном, так и в азимутальном направлениях. С помощью этих датчиков осуществляется компьютерное управление последовательностью вращений акустической антенны в процессе зондирования исследуемой поверхности. Поскольку антенный блок предназначен для работы на глубинах порядка 50–100 м, то с целью предотвращения попадания влаги внутрь

электродвигателей и оптических датчиков они заполняются прозрачным трансформаторным маслом. Подобное конструктивное решение полностью себя оправдало и в процессе эксплуатации прибора избавило от попадания влаги на все токоведущие элементы конструкции.

Блок формирования и коммутации. Из-за высокой степени затухания ультразвука в водной среде, заполняющей измеряемую полость (уширение заполнено насыщенным глинистым раствором), необходимо было увеличивать мощность зондирующего сигнала и максимально повышать чувствительность приемно-усилительного тракта. Эти требования не позволили установить все части радиотехнического тракта на интерфейсной плате внутри компьютера из-за ограничения мощности блока его питания, а также высокой степени цифровых шумов. Усилители и устройство коммутации, выполненное по диодной схеме, были реализованы в отдельном корпусе с независимым источником питания.

Программное обеспечение и интерфейсная плата. Как указывалось выше, программное обеспечение разделено на три части. Рассмотрим подробнее работу программы проведения измерения. При запуске программы считываются параметры работы из файла инициализации. К этим параметрам относятся временная длительность, начальная и конечная частота зондирующего сигнала, время приема отраженного сигнала, количество повторений зондирования для каждой точки измерения.

Размер исследуемой полости влияет на выбор значения параметра «время приёма отражённого сигнала», которое устанавливается с коэффициентом $\sim 1,5$ от максимально ожидаемого времени прохождения зондирующего сигнала (слишком большое «время приема отраженного сигнала» увеличивает вероятность ошибочной регистрации второго отражения зондирующего сигнала от стенок поверхности), а также на значение параметра «временная длительность зондирующего сигнала» (от данного параметра напрямую зависит минимальное расстояние от антенны до поверхности, которое может быть измерено). В то же время установка слишком малой «временной длительности зондирующего сигнала» приводит к плохому приему сигнала, отраженного от удаленных участков поверхности.

По уровню затухания акустического сигнала в среде, заполняющей исследуемую полость (раствор разбуриваемой породы в воде), устанавливается параметр «количество повторений зондирования». Увеличение этого параметра позволяет улучшить прием при высоком затухании сигнала, но слишком большое значение параметра ухудшает результаты при слабом затухании в среде.

Первоначальный выбор параметров для каждого конкретного случая производился по данным проектных размеров исследуемой полости (уширения основания буросваи) и виду вынимаемой породы, который позволяет оценить степень затухания. Правильность выбора параметров контролируется при проведении измерения. В случае неудовлетворительного результата измерение прерывается и возобновляется после необходимой корректировки. После инициализации проводится установка антенны в стартовую позицию.

Для управления моторами поворота антенны и получения информации с датчиков угла поворота на интерфейсной плате реализованы четыре выходных и четыре входных цифровых канала с программным обменом через порт «ввода-вывода». Далее программа начинает движение антенны в режиме сканирования. Алгоритм просмотра поверхности следующий: из низшего положения антенна поднимается на 135° , при этом каждые $5,625^\circ$ (угол выбран, как полный оборот 360° , деленный на 64) производится измерение расстояния до поверхности. По достижении 135° (24 точки измерения) останавливается движение антенны вокруг горизонтальной оси, запускается мотор для поворота вокруг вертикальной оси установки и производится поворот на $5,625^\circ$. Далее, остановив движение вокруг вертикальной оси, антенна опускается до низшего положения, также производя 24 измерения. В этом «нижнем» положении осуществляется вновь поворот вокруг вертикальной оси на $5,625^\circ$. Цикл подъемов и опусканий с поворотом в верхней и нижней точках полости продолжается, пока не произойдет полный поворот антенны вокруг вертикальной оси. Алгоритм, при котором происходят «быстрое» движение вдоль меридианов и «медленный» поворот вокруг вертикальной оси, был выбран с целью предотвращения поворота всей установки внутри исследуемой полости.

Рассмотрим подробнее процедуру измерения расстояния до стенки исследуемой полости. Программа через ЦАП-канал интерфейсной платы генерирует зондирующий сигнал согласно таблице, сформированной после инициализации по введенным параметрам. Обмен по ЦАП- и АЦП-каналам интерфейсной платы реализован через *DMA*-контроллер и проводится в 16-битном режиме. Цифроаналоговый преобразователь имеет разрядность 8 бит, а один бит старшего байта обмена используется для формирования сигнала «прием-передача». Во время прохождения зондирующего импульса, закодированного в младшем байте, этот бит установлен в «1» и сигнализирует устройству коммутации о режиме передачи. После окончания зондирующего импульса бит направления установлен в «0» и система переходит в режим приема.

Одновременно с выходным ЦАП-каналом начинает работать входной АЦП-канал (разрядность 12 бит). Общая длительность обмена определяется параметрами инициализации и равно произведению времени приема отраженного сигнала на количество повторений зондирования. В случае нескольких повторений зондирующий сигнал и бит передачи присутствуют в таблице нужное количество раз. Так как запрос по *DMA*-каналу инициализируется интерфейсной платой и синхронизирован установленным на ней кварцевым генератором 2 МГц, полученный в результате измерения массив значений рассматривается как функция отраженного сигнала от времени. Для повышения соотношения сигнал/шум и точности измерения производится операция свертки функции отраженного сигнала с зондирующим. Полученная функция огибающего фильтра анализируется на предмет максимального пика, и определяется время задержки отраженного сигнала. Это

позволяет определить расстояние до исследуемой поверхности. Таким образом, в результате сканирования накапливается массив расстояний от антенны до поверхности уширения в угловых координатах. Во время измерений на экране отображаются форма зондирующего импульса, отраженный сигнал, функция огибающей согласованного фильтра с указанием выбранного пика, а также расстояние до поверхности для каждого измерения.

Общее количество точек измерения достигает 1500, при этом не все измеренные расстояния являются истинными. Возможны ошибки, вызванные помехами, слишком большим затуханием в среде, прямым отражением зондирующего луча в сторону от антенны. Тем не менее большое количество точек измерения позволяет уверенно восстановить форму поверхности при 50% истинных показаний.

Для редактирования полученных результатов (удаления ошибочных точек, сглаживания поверхности) применяется программа из пакета программного обеспечения. В состав пакета также входит программа визуализации результатов измерения, которая позволяет пользователю просматривать поверхность с возможностью поворота последней, производить сечение ее плоскостью под различными углами.

Характер визуализации поверхности зависит от мощности применяемой графической системы: простая прорисовка, полутоновое изображение, трехмерная анимация (файлы в формате пакета *Autodesk 3D Studio* или библиотеки *OpenGL*).

Основное достоинство ультразвукового контроля обусловлено способностью звуковых волн распространяться в водной среде, заполненной производственным илом (шламом), без существенного поглощения, что делает этот метод наиболее предпочтительным по сравнению с другими способами контроля. В методе применяется компьютерная корреляционная обработка сигнала с целью существенного повышения соотношения сигнал/шум отраженного сигнала и точности производимых измерений.

Рассматриваемый измерительный комплекс был апробирован ОАО «Волгомост» на строительстве внеклассных мостов в городах Саратове, Ульяновске, Волгограде, Казани, Астрахани и показал отличные результаты [2].

В настоящее время планируется строительство внеклассных мостовых сооружений в других регионах России, что потребует совершенствования технических средств и технологий при их строительстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Харебава Ж. А., Фанин С. П., Овчинников И. Г., Раткин В. В.* Внеклассные автодорожные мосты Нижневолжского региона. Саратов : Наука, 2008. 360 с.
2. *Наянов В. И., Ноянов Ю. В.* Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 86–87.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРА С РАСШИРЕННЫМ НАБОРОМ
КОМАНД МАНИПУЛЯЦИИ БИТАМИ ДАННЫХ
НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРЫ OpenRisc1200**

С. И. Назаров, А. В. Ляшенко, Л. С. Сотов*, А. Л. Хвалин*

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

*Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@info.sgu.ru

В работе представлены разработка и реализация на базе архитектуры OpenRisc1200 микропроцессора ОРВМ с расширенным набором команд манипуляции битами данных. ОРВМ – 32-битный RISC микропроцессор, основанный на наборе команд ORBIS32. Производительность микропроцессора увеличивается от 2 до 10 раз благодаря возможности выполнять специальные инструкции побитовой обработки. Первые прототипы были разработаны на базе ПЛИС Xilinx XC6LX45. Показано, что по сравнению с существующими микропроцессорами у разработанного есть преимущества, заключающиеся в расширенной функциональности, улучшенной работе и пониженной сложности аппаратных средств.

Ключевые слова: RISC-микропроцессор, инструкция перестановок, инструкции группирования и размещения битов, многоуровневая коммутационная сеть, процессор OpenRisc1200.

**The Design and Implementation of the Advanced Bit Manipulation
Microprocessor ORBM Based on the OpenRisc1200 Architecture**

S. I. Nazarov, A. V. Lyashenko, L. S. Sotov, A. L. Khvalin

The design and implementation of the advanced bit manipulation microprocessor ORBM based on the OpenRisc1200 architecture is presented. ORBM is a 32 bit processor based on the ORBIS32 instruction set. The microprocessor performance is increased from two to ten times because microprocessor can execute special instructions of bit manipulation. The first prototypes were designed on the Xilinx XC6LX45 FPGA. It is shown that in comparison with existing microprocessors the developed microprocessor has advantages including expanded functionality, the improved performance and the lowered hardware complexity.

Key words: RISC-microprocessor, permutation instruction, subword extract instruction, subword deposit instruction, multistage interconnection network, OpenRisc1200 architecture.

С расширением области применения средств вычислительной техники все чаще возникают задачи, связанные с формированием перестановок или манипуляций битами данных машинного слова [1]. Битовые перестановки сложны для программной реализации. В связи с этим в последние годы проводятся интенсивные исследования в области разработки устройств, ускоряющих обработку битов данных.

В работе [2] был предложен способ структурного синтеза устройств разбиения строки входных данных для реализации инструкций манипуляции битами данных. Устройства манипуляции битами данных просты при последовательной обработке машинного слова [3], однако при разработке устройств, выполняющих манипуляции с битами машинного слова параллельно, проблемой является достаточно высокая аппаратурная сложность блока декодирования битов управления переключателями [4, 5]. Аналогичная проблема возникает и при других подходах к разработке устройства, основанных, например, на использовании многоуровневой коммутационной сети *butterfly* [6]. В работе [7] показано, что при осуществлении логических и циклических сдвигов битов данных на базе обратной топологии сети *butterfly* удастся существенно упростить декодер битов управления и увеличить его быстродействие. При этом для построения универсального модуля манипуляции битами требуется две сети *butterfly* и *ibutterfly*, реализующие прямые и обратные преобразования. В работах [8–11] предпринят ряд шагов по упрощению и повышению быстродействия устройств, осуществляющих манипуляции битами данных, а в работе [12] описана практическая реализация универсального устройства манипуляции битами данных.

В данной статье описаны результаты исследований по созданию процессорной системы на основе открытых аппаратурных решений и разработанного авторами уникального модуля для ускоренной манипуляции битами данных. Для разработки и моделирования использовалась программа Xilinx ISE [13]. Применяемый в микропроцессоре универсальный модуль ускоренной манипуляции битами данных описан в работах [12, 14–16]. Особенности функционирования некоторых узлов модуля подробно обсуждены в [17–19].

Для тестирования устройства перестановки битов по его описанию, приведенному в [14–16], была составлена имитационная модель на языках Verilog и SystemC [20, 21].

Наименование программного модуля перестановки битов данных – VM_32. Входом модуля является 32-разрядная шина X, на которую подаются данные. Выходом модуля является 32-разрядная шина, поименованная как Y.

Перестановка разрядов в представлении X осуществляется в соответствии с набором однобитовых указателей, описание которых приведено в работах [2, 12, 22, 23]. Конкретику перестановок определяют также входные данные, подаваемые:

- на 16-битовые шины (управление матрицей перестановок) C1, C2, C3, C4, C5;
- на 5-разрядную шину (задание числа сдвигов) A;
- на 32-разрядную шину (задание маскирования разрядов) F.

Для тестирования функций логического и циклического сдвигов на языке Verilog HDL была написана и отлажена программа, включенная в

проект с наименованием *bm_32*. Данный проект синтезирует электронную схему, на вход которой последовательно методом циклического перебора подаются 32-разрядные данные и конкретные управляющие сигналы.

В проекте *bm_32* реализован алгоритм идентификации разрядов, обеспечивающий простоту и наглядность результатов работы сдвигового устройства *BM_32*. В соответствии с этим алгоритмом на вход модуля перестановок подаются последовательно 5 чисел, расположенных в таблице друг под другом, в двоичном и шестнадцатиричном форматах. Это чтение иллюстрируется в таблице.

Таблица

Тестовые данные для проверки команд логического сдвига в модуле *BM_32*

Номер двоичного разряда	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
Число 1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Число 2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
Число 3	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Число 4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Число 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Номер двоичного разряда	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Шестнадцатиричный формат чисел
Число 1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	AAAAAAAA
Число 2	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	CCCCCCCC
Число 3	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	F0F0F0F0
Число 4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	FF00FF00
Число 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FFFF0000

Нумерация разрядов в таблице указана в верхней строке в десятичном исчислении, а образуемые двоичные разряды этой нумерации указаны в 5 строках под ней. Числа, которые образуют эти 5 строк в шестнадцатиричной системе исчисления, указаны в правом столбце таблицы. Анализируя таблицу можно заключить, что столбцы образуют числа длиной 5 бит, которые можно интерпретировать как порядковый номер двоичного разряда в таблице.

Числа подобраны так, что, применяя одну и ту же команду сдвига ко всем 5 числам и выводя данные в таблице, можно проверить правильность выполнения операции сдвига.

В силу универсальности модуль перестановок *BM_32* обеспечивает все реализуемые в обычных процессорах виды сдвигов, а также произвольные перестановки.

Выбор процессорного ядра

Для реализации ОРБМ необходимо было сделать выбор процессорного ядра. При этом особенно полезными оказываются системы с откры-

тыми исходными текстами, размещенные в Интернете. Они позволяют использовать уже созданные и проверенные решения в области проектирования RISC-микроспроцессора.

В качестве базового решения был выбран процессор OpenRisc [24], так как в интернет-сайтах представлена вся необходимая информация для разработки. Эту информацию представляет компания OpenCores, на интернет-сайтах которой [25] можно найти все нужные программы или ссылки на них и исходные тексты последних моделей процессорных систем с открытой архитектурой, получивших название OpenRisc 1000.

Перефразируя намеченную выше цель, можно сказать, что конкретной областью наших интересов было проведение необходимых изменений в существующих текстах процессора открытой архитектуры OR1200 и создание дополнений к ним в виде новых необходимых элементов, ускоряющих и расширяющих проведение всех возможных перестановок битов в машинном слове.

Для определенности остановимся на 32-разрядном исполнении машинных слов процессора. Процессор OR1200 имеет гарвардскую архитектуру, что означает выделение разных блоков памяти для хранения инструкций и хранения данных. Все узлы процессора, включая внутреннюю память, написаны на языке Verilog HDL.

В качестве исходного проекта процессора OR1200 был взят проект ORSoC, представленный на сайте [25]. Для программы симулятора ISim фирмы Xilinx из всего проекта ORSoC, который представляет собой обширный набор файлов не только на языке Verilog HDL, но и на языке C, требуются только папки из раздела `orpsocv2\rtl\verilog\or1200`.

Из HDL (Hardware Description Language) описания процессора OR1200, которому соответствует файл верхнего уровня `or1200_top`, следует, что он состоит из 13 блоков, определенным образом соединенных между собой через порты входа и выхода, и содержащих внутри себя цепи обработки сигналов. Каждый блок представляет собой модуль, в котором в иерархическом порядке могут содержаться новые модули. Все входы/выходы модулей, а также сигналы, цепи их приема/передачи, обработки и преобразования и необходимые константы поименованы. С точки зрения файла верхнего уровня они имеют унифицированный характер. Особые константы, имеющие назначение параметров настройки, а также определяющие ту или иную условную трансляцию, в проекте вынесены в отдельный файл с именем `or1200_defines.v`, который содержится в разделе `orpsocv2\rtl\verilog\include`. Изменяя константы из этого файла, пользователь может настраивать выполняемые процессором команды, указывать особые свойства, изменяющие конфигурацию, упрощающие и ускоряющие его работу.

Для обеспечения обработки новых команд манипуляции битами данных изменения, в первую очередь, вносятся в модуль центрального процессорного устройства (ЦПУ). В папке RTL этому устройству соответствует файл `or1200_cpu`.

Как файл верхнего уровня, так и связанные с ним файлы, обеспечивающие его поведенческое описание процессора, расположены в отмеченной выше папке RTL. Модуль ЦПУ ядра OR1200, описываемый в тексте файла верхнего уровня, структурирован и объединяет в себе 13 функциональных подмодулей, работающих одновременно. С точки зрения внутреннего протокола связи внутри этих модулей и связи между ними унифицированы и представляют собой выработку и анализ определенных сигналов в соответствующих цепях, что необходимо учитывать. Для правильной обработки внутренних сигналов процессора не следует нарушать принятые в нем правила сопряжения. Данное обстоятельство составляет основную сложность внесения изменений в тексты.

Ввиду важности унифицированных элементов ЦПУ перечислим файлы, содержащие их точные описания на языке Verilog HDL:

- or1200_genpc (Generate PC);
- or1200_if (модуль выбора инструкций (Instruction fetch));
- or1200_ctrl (блок внутренних преобразований исполняемых инструкций);
- or1200_rf (блок регистров общего назначения внутри ЦПУ);
- or1200_operandmuxes (модуль мультиплексирования двух регистровых операндов чтения файла (Mux for two register file read operands));
- or1200_alu (арифметико-логическое устройство (АЛУ));
- or1200_mult_mac (модуль умножения верхнего уровня (Top level multiplier and MAC $32 \times 32 = 64 + 64$));
- or1200_sprs (модуль декодирования SPR адреса и доступа к регистрам SPR (Decoding of SPR addresses and access to SPRs));
- or1200_lsu (модуль, реализующий интерфейс обмена данными CPU и DC (Load/Store unit - Interface between CPU and DC));
- or1200_wbmux (модуль записи выходных данных конвейера CPU (CPU's write-back stage of the pipeline));
- or1200_freeze (модуль генерации сигналов фиксации и остановок внутри процессора (Generates all freezes and stalls inside RISC));
- or1200_except (модуль обработки исключений внутри CPU (Handles all OR1K exceptions inside CPU block));
- or1200_cfg (VR, UPR и регистры конфигурации (VR, UPR and Configuration Registers)).

Исполнительным звеном команд процессора является арифметико-логическое устройство (АЛУ). Остальные звенья обеспечивают формирование правильных, точных по назначению, времени и месту всех необходимых сигналов команд, их операндов и последующую обработку результата.

Команды сдвига в процессоре OR1200

Процессор OR1200 имеет унифицированную кодировку системы команд. Код размещается побитно в одном машинном слове. В ходе выборки

и декодирования команды все ее составляющие находят свое место на соответствующих цепях, значения сигналов на которых должны быть достоверны при наступлении фронта каждого тактового импульса `posedge clk`. Логически звенья обработки команд процессора «читают» в двоичном формате эти значения, в соответствии с которыми в АЛУ осуществляется выбор того или иного действия обработки.

Однако изначально система распознавания команд настроена на совершенно иной формат, причем для отдельной команды может быть предусмотрена своя дополнительная идентификация разрядов.

Так, для обозначения команд, осуществляющих операции сдвига «shift» в OR1200, предусмотрены поля, образуемые следующими «штатными» разрядами:

- [31:26] – общее поле кода команды, которое должно содержать значения 'h2E или 'h38, в зависимости от способа указания величины сдвига;

- [25:21] – указатель на регистр `rD`, содержащий результат;

- [20:16] – указатель на регистр `rA`, содержащий операнд;

- [15:11] – указатель на регистр `rB`, который не используется, если код команды 'h2E;

- [10:8] – не используемые три двоичных разряда;

- [7:6] – поле дополнительного кода, уточняющего команду, длиной 3 двоичных разряда;

- [5:0] – константа сдвига либо число 'h8, если код команды 'h38.

В поле дополнительных кодов можно указать одну из следующих 4 команд сдвига:

- Shift Left Logical (логический сдвиг влево);

- Shift Right Logical (логический сдвиг вправо);

- Shift Right Arithmetic (арифметический сдвиг вправо);

- Rotate Right (циклический сдвиг вправо).

Модуль «ctrl» ЦПУ считывает поля инструкций [31:26] в регистр «alu_or», а поля [9:6] в регистр «alu_or2». Далее модуль ctrl транслирует биты указанных регистров на внутренние цепи ЦПУ с одноименными названиями. Сам модуль АЛУ внутренних регистров не имеет и все свои действия по исполнению инструкций осуществляет в соответствии с сигналами входных цепей.

Коды команд сдвига назначаются соответствующими записями пользователя в файле определений `or1200_defines.v`.

Всем командам сдвига на линиях «alu_or» соответствует общее целевое значение `5'b0_1000`, а конкретным операциям сдвига на линиях «alu_or2» соответствуют значения `4'd0`, `4'd1`, `4'd2`, `4'd3`.

Модуль `operandmuxes`, расположенный в ЦПУ, по соответствующим указателям в исходном коде команды процессора формирует, используя другие общедоступные ресурсы ЦПУ, истинные значения аргументов команды, выставляя их на линиях `operand_a` и `operand_b`. К этим общедоступным теперь линиям подключены внутренние линии `a` и `b`, расположенные в АЛУ.

Для отработки вопросов работы новых инородных модулей в составе ЦПУ процессора OR1200, а также для будущего сравнения особенностей работы прежнего процессора и модифицированного нами была составлена тестовая программа, реализующая тот же алгоритм идентификации разрядов после исполнения штатных команд сдвига, который применялся ранее для тестирования логических сдвигов данных машинного слова в модуле VM_32 в проекте bm_32. Отличия в реализации нового проекта от проекта bm_32 состоят в том, что все необходимые линии и формируемые сигналы взяты из уже реализованного ЦПУ процессора OR1200. Новый проект имеет название «TestALU», и ему соответствует отдельный директорий с тем же именем.

Текст демонстрационной программы «TestALU» не приводится, чтобы не перегружать статью. Эту программу легко составить, используя текст демонстрационной программы работы процессора OR1200 в новой конфигурации, со встроенным в него устройством перестановок.

В блоке АЛУ операции сдвига запрограммированы посредством «штатных» операторов сдвига языка Verilog HDL ($a \gg b$ и $a \ll b$), использующих свои библиотечные схемы. На этапе исследований изменить логику работы этих команд внутри принципиальной схемы процессора нам не представляется целесообразным. Для предлагаемых пользователю инструментов работы с процессором библиотечные схемы отработки сдвигов Verilog HDL являются «черным ящиком».

Для изменения работы процессора с его прежней схемой манипуляциями сдвига можно перепрограммировать в новые, «нештатные» операции сдвига либо исключить их целиком, подключив новый узел внутри ЦПУ. Но в любом случае, поскольку все узлы процессора работают параллельно, необходимо добавить новый, 14-й, по счету модуль в ЦПУ, и при обращении к нему лучше использовать новые команды. К тому же на одном и том же вновь собранном процессоре OR1200 лучше иметь возможность проверить действия разных команд сдвига.

Новое содержание команды пользователя «cust5»

Для своей работы новый модуль должен будет использовать необходимые и уже «приготовленные» процессором линии с циркулирующими в них общими «штатными» сигналами. Для кодировки нового набора команд сдвига и перестановок предлагается воспользоваться предоставленной OpenRisc возможностью расширения системы команд процессора.

В силу универсальности устройство перестановок VM_32 обеспечивает все уже реализованные в процессоре виды сдвигов, а также произвольные перестановки битов данных. Переделок и дополнений этот модуль не требует, но для его совместной работы с ЦПУ необходимы реализация новых связей, реагирование на новые сигналы, в частности, в имеющихся

штатных узлах следует провести изменения. Технически их целесообразно свести к минимуму. Для этого предлагается использовать уже реализованный и присутствующий внутри ядра OR1200 интерфейс классов дополнительных пользовательских команд, содержащих в своем названии слово `cust` (`custom`). Наиболее подходящим классом пользовательских команд, представляющим на сегодняшний день самые широкие возможности учета полезной информации для передачи ее модулю `VM_32`, служат команды `cust5`. На языке ассемблера они имеют вид

l.cust5 rD, rA, rB, L, K

Разряды машинного кода этой команды (с 31-го по 11-й) служат стандартным целям: размещению кода команды, формируемого впоследствии на линиях процессора `alu_or`, и указанию запрограммированных ранее регистров общего назначения. Регистр `rA` можно использовать для размещения входных данных. Регистр `rD` – для выходных данных. Регистр `rB` – для размещения битов маски `F`. Поле `K` (разряды 4:0 инструкции) – для указания величины сдвига, а поле `L` (разряды 10:5 инструкции) – для указания дополнительных кодов команд перестановок. Им соответствуют внутренние линии ЦПУ.

В проекте ORSoC процессор OR1200 уже использует 2 младших разряда поля `L` команд “`cust5`”. Они применяются для осуществления операции «вставки» младшего байта регистра `rB`, в качестве указателя одного из 4 мест в 32-разрядных данных регистра `rA`. Регистр `rD` в этой операции используется по своему унифицированному назначению, т. е. для записи результата.

Таким образом, разряды `L[5:2]` являются свободными и их можно использовать как независимо, так и в комбинации с двумя младшими разрядами. Возможность комбинированного использования следует из текста АЛУ, где в исполнении команд участвуют не отдельные разряды `L`, а числа, которые они образуют, распределяемые далее оператором «`casez`» в описании модуля.

Для наших целей, поскольку коды 0, 1, 2, 3 заняты, выбраны следующие за ними числа:

- 4 (сдвиг логический вправо (`shr`));
- 5 (сдвиг логический влево (`shl`));
- 6 (сдвиг циклический вправо (`rotr`));
- 7 (сдвиг циклический влево (`rotl`)).

Таким образом, разряд `L[2]` в общем формате команд может служить признаком команд «классического» сдвига.

Далее следуют команды работы с матрицей перестановок. Коды этих команд начинаются с 8, т. е. одновременно признаком их исполнения является установленный разряд `L[3]`:

- 8 («`rex`» – `parallel extract`);
- 9 («`bsn`» – `baseline`);
- 10 («`pdep`» – `parallel deposit`).

Модуль ЦПУ, описываемый файлом «tr1» (декодер инструкций процессора), преобразует участвующие в командах поля и данные в общедоступные остальным модулям цепи с действующими сигналами на них. При этом:

- данные поля L помещаются во внутренний регистр с именем «cust5_op»;
- данные поля K – в «cust5_limm»;
- значение из регистра rA – в «operand_a»;
- значение из регистра rB – в «operand_b».

Новые связи процессора OR1200 с модулем перестановок VM_32

Поскольку модуль VM_32 будет управляться числами и поэтому имеет формируемые управляющие сигналы, для него необходимо сделать соответствующие цепи преобразований, на которые следует подавать сформированные процессором значения.

Адаптированный к процессору модуль перестановок в рассматриваемом техническом проекте назван именем «REP», и его текст размещается в файле or1200_rep. В целом модуль REP представляет собой «обвязку» модуля VM_32 внутренними связями ЦПУ ядра OR1200.

Исполнительная логическая часть модуля REP является продолжением АЛУ с внутренними входными портами герmг (приемник режима работы VM_32), герsr (приемник величины сдвига), герfг (приемник значения маски \bar{F}), герip (приемник преобразуемых данных) и одним выходным портом герout для передачи АЛУ результата выполненного преобразования.

Логическая часть модуля, кроме операторов непрерывного присваивания (assign), никаких других операторов не содержит, что соответствует «требованиям» АЛУ. Тем не менее для изменения функции cust5 и приема результатов от модуля REP в модуле alu.v требуется провести изменения. Ввиду отсутствия лицензионного разрешения новый модуль АЛУ обозначен как alu_r.v.

Далее приводятся все остальные изменения, необходимые для обеспечения работы VM_32, реализуемые в других модулях ЦПУ процессора OR1200.

Реализация доступа к перепрограммируемой матрице перестановок

Взаимодействующей частью ЦПУ при работе модуля vm_32 является блок памяти, связанный, в свою очередь, с блоком обработки обращений к спецрегистрам. Описание этого блока является содержанием файла sprs.v. Эта часть «обвязки» модуля VM_32 отрабатывает смену условий работы модуля VM_32 с коммутационной матрицей внутри себя.

Константы управления матрицей C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 , необходимы для задания условий работы модуля и не охвачены форматом команды cust5. В принципе они могут нести долговременный, не часто меняемый характер. Поэтому для обеспечения гибкости использования модуля VM_32 для разных промежутков времени данные условия должны храниться в регистрах. Чтобы освободить при этом регистры общего назначения для решения за-

дач вычислительного характера, регистры VM_32 должны быть регистрами специального назначения, расположенными, в случае встраивания модуля REP в ЦПУ OR1200, вместе с модулем VM_32. В тексте модуля указанные регистры обозначены как герс1, герс2, герс3, герс4 и герс5.

Для задания значения этим спецрегистрам, а также чтения с них информации в системе команд OR1200 имеется 2 команды l.mtspr и l.mfspr, которые осуществляют свою работу при указании режима SM (0-й разряд) в регистре супервизора SR. Команд l.mtspr имеет формат l.mtspr rA, rB, K. По этой команде процессор должен передать содержимое регистра общего назначения rB в регистр специального назначения, адрес которого определяется операцией логического «ИЛИ» значения регистра rA и константы K, для которой в поле представления команды отведено 16 разрядов. В общем случае адрес каждого спецрегистра может быть определен множественным путем.

Аналогично для команды l.mfspr – l.mfspr rD, rA, K. По этой команде процессор должен принять и записать содержимое регистра специального назначения в регистр общего назначения rD. Адрес регистра специального назначения является результатом бинарной операции логического «ИЛИ» значения регистра rA и константы K, для которой в поле представления команды отведено 16 разрядов. В порядке дополнения отметим, что константа K в разных командах размещается в разных разрядах, а при K = 0 точный адрес спецрегистра может указываться содержимым регистра rA.

В структуре OpenRisk1000 каждой группе спецрегистров отведены свои номера от 0 до 31. В адресном поле (регистр rA) номер группы занимает места с 15 по 11 разряды, оставляя место индексу внутри себя от 0 до 1535. Это удобно ввиду организации структурно распределенных независимых звеньев как в процессоре, так и во внешних устройствах.

Первые номера групп от 0 до 11 в OR1200 уже заняты. Для дальнейшего усовершенствования процессора предназначены группы спецрегистров с номерами до 23 включительно. Поэтому для обращения к спецрегистрам можно использовать группу с номером 24 и индексом от 0 до 4, поскольку она новая и ничем иным, в том числе никакими обязательствами, не занята.

Этот номер и индекс являются определяемыми и легко сменяемыми параметрами, в связи с чем их всегда можно сменить при «перенастройке» модуля REP. Например, номер группы можно взять 0, а индекс любым числом от 1024 до 1535. Такие атрибуты приняты для обозначения регистров GPR0-GPR511 в SPR пространстве.

Декодером машинных слов, представляющих инструкции процессора OR1200, является отдельный модуль процессора, описываемый файлом «ctrl.v», на языке Verilog HDL. Выходными сигналами этого модуля, участвующими в дальнейшей работе процессора, являются:

- значение регистра rA, представленное 32-битовым сигналом «ore-
rand_a»;
- значение регистра rB, представленное 32-битовым сигналом «ore-
rand_b»;

– значение константы K, представленное 16-битовым сигналом «ex_simm»;

– 1-битовые парные сигналы «ex_spr_read» и «ex_spr_write», идентифицирующие своей совокупностью инструкции mtspr/mfspr.

При подаче этих сигналов на соответствующие входы «штатного» подмодуля процессора, описываемого файлом «sprs.v», они преобразуются в требуемые каждым сторонним модулем обработки спецсигналов следующими связными цепями:

– «spr_cs» (сигнал обращения к блоку спецрегистров);

– «spr_we» (сигнал записи в спецрегистр);

– «spr_addr» (полный адрес спецрегистра);

– «spr_dat_o» (данные, которые следует разместить в спецрегистре).

Для соблюдения принципа структурного распределения ЦПУ, для передачи данных из блока спецрегистров нового модуля REP необходимо изменить внутреннее содержимое файла «sprs.v».

Порт приема данных с регистров спецблока во внутреннем формате блока SPRS выглядят как

spr_dat_<имя блока>.

Таким образом, добавленный в SPRS входной порт должен иметь имя spr_dat_REP. Принятые по нему данные затем могут быть сняты с выходного порта блока SPRS с именем «to_wbmix» и переданы далее по цепи связи ЦПУ с именем «sprs_dataout». Ввиду отсутствия лицензионного разрешения новый файл модуля SPRS обозначен как «sprs_r.v».

Общие константы, определяющие состав процессора при компиляции проекта

Открытая архитектура процессора OR1200 предполагает выбор пользователем тех или иных возможностей скомпилированной им системы, сообразно достигаемым целям своего проекта. Этот выбор осуществляется введением в список включенных определений параметров, расположенных в файле or1200_defines.v и имеющих вид

`define OR1200_<имя блока>_IMPLEMENTED.

Например:

– `define OR1200_MULT_IMPLEMENTED;

– `define OR1200_MAC_IMPLEMENTED;

– `define OR1200_PM_IMPLEMENTED;

– `define OR1200_DU_IMPLEMENTED;

– `define OR1200_PIC_IMPLEMENTED;

– `define OR1200_TT_IMPLEMENTED.

К этому списку в рамках проекта следует добавить параметр

```
`define OR1200_REP_IMPLEMENTED.
```

Поскольку проект предполагает использование класса команд `cust5`, следует разблокировать АЛУ, убрав символы комментария “//” перед записью

```
OR1200_ALUOP_CUST5
```

в файле “`or1200_defines.v`”.

Для работы с модулем REP авторами статьи составлен новый файл определений параметров “`or1200_defines.v`”.

Макет процессора OR1200 с новыми функциями перестановки битов

Для отладки и демонстрации работоспособности построенных в проекте модулей необходимо собрать процессор OR1200 в новой конфигурации и составить демонстрационную программу.

Полный процесс компиляции такого проекта с созданием всех имитационных моделей трудоемкий и будет повторяться каждый раз при обращении к новым вариантам проекта. Поэтому в целях сокращения времени отладки и устранения возможных ошибок в проектировании процесс моделирования предлагается на первых этапах произвести на укороченном макете OR1200, имитирующем его работу только в части модуля `BM_32`.

Для создания и демонстрации работы такого макета участие всего процессора не требуется.

Новая тестовая программа, помимо укороченного процессора, содержит укороченные модели памяти данных `DMMU` в виде набора «рабочих» регистров. Память команд (модуль `IMMU`) и их выборку (модуль `IF`) имитирует одна линейная схема, звенья которой размещены последовательно и разделены элементами задержки времени.

Присутствие «укороченного» макета ЦПУ сводится к описанию необходимых связей и регистров, непосредственно задействованных портами модулей АЛУ, REP и SPRS в их совместной работе. Сами указанные модули моделируются операторами вхождения модулей `alu_r`, `rep` и `sprs_r`.

Для задания конкретных значений внутренним спецрегистрам модуля REP необходимо использовать команду `l.mtspr rA,rB,K`. В отличие от команды чтения (`l.mtsprg rA,rB,K`) данная команда исполняется процессором в подмодуле SPRS при установленном режиме супервизора, который устанавливается разрядом `SM` (0-й разряд) специального регистра `SR` (17-й в группе системных регистров с номером 0).

В построенной демонстрационной модели для задания команд записи и чтения используются следующие эквивалентные им цепочки (физических) операторов.

Для команды `l.mtspr` эквивалентом в укороченном нами ядре ЦПУ является цепочка:

```
operand_a = 0; // ук-ть базовый адрес
operand_b=...; // ук-ть записываемые данные
ex_simm = 0;//сформировать поле команды, 32 разряда
#1; // время, необходимое для восприятия смены адреса
ex_simm[`OR1200_SPR_GROUP_BITS] = ...; //ук-ть № группы
ex_simm = ex_simm | i; //ук-ть i-й регистр
ex_spr_read =0; //ук-ть ком. записи
ex_spr_write =1;
```

Для команды «`l.mfspr`» эквивалентом в укороченном нами ядре ЦПУ является цепочка:

```
operand_a = 0; // ук-ть базовый адрес
ex_simm = 0;//ук-ть 32 разряда
#1; // для восприятия смены адреса
ex_simm[`OR1200_SPR_GROUP_BITS] = ...; //ук-ть № группы
ex_simm = ex_simm | i; //ук-ть i-й регистр
ex_spr_read =0; //ук-ть ком. чтения
ex_spr_write =1;
#1;
...=spr_dat_rep; // указать место записи считывания данных
```

Для наглядной демонстрации команды сдвига обновленного процессора на Verilog HDL была написана и совместно с обновленным процессором OR1200 синтезирована в единую электрическую схему специальная тестовая программа. В программе Xilinx ISE проект, в котором синтезируется схема, назван `Test_REPLACE`.

Тексты модели ориентированы на работу в симуляторе ISim от XILINX [13]. Программа ISim позволяет просматривать эпюры всех сигналов на всех линиях отстраиваемого макета, а также следить за всеми целевыми параметрами и результатами работы исполняемых действий в специальном рабочем окне, называемом «console». Для вывода данных в это окно в тексте отстраиваемой модели использованы операторы вывода «`$write`».

Отметим, что для иллюстрации работы новых регистров памяти C_i в них записываются значения тестовой переменной `ССС`. Для правильной работы процессора и полноты контроля в демонстрационную модель заведен сигнал `rst` («сброс»), применяемый в начале работы схемы.

Ниже приводятся выборочные фрагменты результатов работы схемы после исполнения процедуры «initial», взятые в рабочем окне стендовой программы «ISim». При этом 32-разрядная маска `F` в этом фрагменте попеременно принимает значения `-1` и `0`. Число сдвигов указанной операции следует за знаком «`#`» и указано в десятиричном исчислении.

Simulator is doing circuit initialization process.

Finished circuit initialization process.

C(0) = 00000000 C(1) = 00000000 C(2) = 00000000 C(3) = 00000000

C(4) = 00000000

F = FFFFFFFF shr # 0

31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3
2 1 0

C(0) = 00000001 C(1) = 00000001 C(2) = 00000001 C(3) = 00000001

C(4) = 00000001

F = 00000000 shr # 1

0 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4
3 2 1

C(0) = 00000002 C(1) = 00000002 C(2) = 00000002 C(3) = 00000002

C(4) = 00000002

F = FFFFFFFF shr # 2

0 0 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5
4 3 2

C(0) = 00000003 C(1) = 00000003 C(2) = 00000003 C(3) = 00000003

C(4) = 00000003

F = 00000000 shr # 3

0 0 0 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6
5 4 3

...

...

C(0) = 00000020 C(1) = 00000020 C(2) = 00000020 C(3) = 00000020

C(4) = 00000020

F = FFFFFFFF shl # 0

31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3
2 1 0

C(0) = 00000021 C(1) = 00000021 C(2) = 00000021 C(3) = 00000021

C(4) = 00000021

F = 00000000 shl # 1

30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2
1 0 0

Приведенные результаты испытаний демонстрационной модели показывают правильность работы модуля VM_32 в составе процессора OR1200 и сборки данного процессора с новыми модулями. При этом можно отметить, что простые команды сдвига от управляющих параметров C_i и F не зависят.

Таким образом, в статье описан опыт работы авторов по созданию синтезируемых процессорных систем на базе семейства OpenRisc 1000. Для разработки и моделирования использовалась программа Xilinx ISE.

Приведены подробное описание и особенности разработки 32-разрядного RISC-микропроцессора с улучшенной манипуляцией битами данных. Новые команды микропроцессора позволяют увеличить его произ-

водительность и сократить энергопотребление от 2 до 10 раз при решении задач обработки изображений, распознавания образов, кодирования, стеганографии, криптографии, обработки сигналов и т. п.

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. *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.

3. Пат. 2320000 Российская Федерация, МПК G0 6F 7/76, G0 6F 12/14. Дешифратор управляемой побитовой транспозиции информации, хранимой в персональной ЭВМ / заявители Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. ; патентообладатель Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2007105175/09 ; заявл. 13.02.2007 ; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8. – 6 с.

4. Пат. 2390052 Российская Федерация, МПК G0 6F 7/76. Дешифратор управляемой перестановки информации, хранимой в персональной ЭВМ / заявители Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. ; патентообладатель Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2008132009/09 ; заявл. 06.08.2008 ; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14. – 8 с.

5. Пат. 2390049 Российская Федерация, МПК G0 6F7/00. Параллельный дешифратор управляемой транспозиции информации, хранимой в персональной ЭВМ / заявители Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. ; патентообладатель Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2008139529/09 ; заявл. 07.10.2008 ; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 1. – 8 с.

6. *Hilewitz Y., Shi Z. J., Lee R. B.* Comparing Fast Implementations of Bit Permutation Instruction // IEEE, Signals. Systems and Computers. Vol. 2. P. 1856–1863.

7. *Hilewitz Y., Lee R.* A New Basis for Shifters in General-Purpose Processors for Existing and Advanced Bit Manipulations // IEEE Transactions on Computing. 2009. Vol. 58, № 8. P. 1035–1048.

8. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Математические модели транспозиционных преобразований // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5, № 12. С. 58–60.

9. *Соболев С. С., Харин В. Н., Сотов Л. С.* Модели устройств кросс-кластерных перестановок данных в ЭВМ // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2009. № 12. С. 51–55.

10. *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.

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

12. Пат. 2488161 Российская Федерация, МПК G0 6F 11/00. Устройство перестановок и сдвигов битов данных в микропроцессорах / заявитель Сотов Л. С. – № 2011145864/08 ; заявл. 14.11.2011 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 27 с.

13. Xilinx ISE Web Pack. URL : www.xilinx.com (дата обращения : 01.10.2014).

14. *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.

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

16. *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.

17. *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.

18. *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.

19. *Сотов Л. С., Солопов А. А., Фарафонова А. В.* Модель инволютивного транспозиционного преобразователя // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 34–46.

20. *Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Средства разработки и исследования архитектурных моделей в сапр System Studio. 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.

21. *Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Средства разработки и исследования архитектурных моделей в САПР System Studio. Ч. 2 : Основные объекты SYSTEMC и их использование // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 5 : Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники. С. 146–176.

22. *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.

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

24. *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.

25. OpenRisc processor. URL : <http://opencores.org> (дата обращения : 01.10.2014).

МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ-ЗА ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

А. Н. Анищенко, А. В. Ляшенко, П. А. Солопов, Л. С. Сотов*

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

*Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: slskit@mail.ru

В работе приведены результаты исследований побочных электромагнитных излучений персонального компьютера и его блоков в диапазоне частот от 20 до 1000 МГц. Выявлены элементы, создающие максимальное излучение, и предложена методика минимизации рисков утечки информации из-за побочных электромагнитных излучений на рабочем месте, оборудованном персональным компьютером. Показана целесообразность использования скоростных способов шифрования данных, передаваемых по шинам, имеющим значительную протяженность.

Ключевые слова: утечка информации, побочное электромагнитное излучение, быстрые перестановочные шифры, видеодисплеи, побочные каналы.

Risk Reducing of Information Leakage Due to Compromising Emanation

A. N. Anishchenko, A. V. Lyashenko, P. A. Solopov, L. S. Sotov

The results of wide band electromagnetic emission produced by computer are explained. The measurements are done from 20 MHz to 1000 MHz. We found out what parts produce maximum emission, and suggest a method to minimize risk of leakage from unintentional electromagnetic emanations produced by computer on personal work place. It is shown that good practice is to fast encrypt of data transmitting by long wires.

Key words: eavesdropping, electromagnetic computer emission, fast permutation ciphers, videodisplays, side channels.

Современные исследования показали, что не только электронно-лучевые, но и цифровые дисплеи на жидких кристаллах и активных TFT-матрицах создают достаточно побочных излучений, чтобы появилась угроза утечки информации. Результаты эксперимента по приему побочных излучений и восстановлению с расстояния 10 м текста, отображаемого на мониторе Toshiba 440CDX, представлены на рис. 1. В эксперименте использовался приемник R-1250 в диапазоне АМ.



Рис. 1. Восстановленный текст, отображаемый на мониторе Toshiba 440CDX

Одним из возможных каналов утечки информации является излучение элементов компьютера. Принимая и декодируя эти излучения, можно получить сведения обо всей информации, обрабатываемой в компьютере. Этот канал утечки информации называется ПЭМИН (побочные электромагнитные излучения и наводки). В Европе и Канаде применяется термин «compromising emanation» – компрометирующее излучение. В Америке применяется термин «TEMPEST».

Современные достижения в области технологии производства радиоприемных устройств позволили создавать очень миниатюрные чувствительные приемники. Успешно внедряется многоканальный прием сигналов с фильтрацией как по различным направлениям, так и по различным частотам, с последующей их корреляционной обработкой. Это позволило значительно увеличить дальность перехвата информации.

Особенно бурное развитие ПЭМИН-технологии получили в конце 80–начале 90-х годов. Это связано как с осознанием широкой общественной опасностью ПЭМИН-угроз, так и с широким развитием криптографии. Применение при передаче информации стойких алгоритмов шифрования зачастую не позволяет дешифровать перехваченное сообщение. В таких условиях ПЭМИН-атака может быть единственным способом получения хотя бы части информации до того, как она будет зашифрована.

Одно из первых сообщений, появившееся в открытой печати и связанное с понятием ПЭМИН, принадлежит голландскому инженеру Вим ван Эку (Wim van Eck), опубликовавшему в 1985 г. статью «Электромагнитное излучение видеодисплейных модулей: Риск перехвата?» Статья посвящена потенциальным методам перехвата композитного сигнала видеомониторов. В марте 1985 г. на выставке Securcom-85 в Каннах ван Эк продемонстрировал оборудование для перехвата излучений монитора. Эксперимент показал, что перехват возможен с помощью слегка доработанного обычного телевизионного приемника.

Опасность утечки информации по ПЭМИ также существует при использовании шифрования информации. При анализе излучений шифровальных машин было замечено, что наряду с основным сигналом присутствует и другой очень слабый сигнал. Шифровальная машина, как и любая другая электрическая машина, имеет побочное электромагнитное излучение, которое модулируется информационным сигналом еще до момента его кодирования. Таким образом, путем перехвата и анализа побочных излучений шифровальной машины, не имея ключа для расшифровки кодированных сообщений, можно получать необходимую информацию.

Для обеспечения большей эффективности в систему могут внедряться специальные программы, маскирующие вывод конфиденциальной информации на монитор. Подобная технология по своей сути есть разновидность компьютерной стеганографии, т. е. метода скрытной передачи полезного сообщения в безобидных видео-, аудио-, графических- и текстовых файлах.

Особенностью технологии является использование для передачи данных канала ПЭМИН, что значительно затрудняет обнаружение самого факта несанкционированной передачи по сравнению с традиционной компьютерной стеганографией. Действительно, если для предотвращения несанкционированной передачи данных по локальной сети или сети Интернет существуют аппаратные и программные средства (FireWall, Proxy server и т. п.), то средств для обнаружения скрытой передачи данных по ПЭМИН нет, а обнаружить такое излучение в общем широкополосном спектре (более 1000 МГц) паразитных излучений ПК без знания параметров полезного сигнала весьма проблематично.

Излучение монитора – очень опасный канал утечки информации, но далеко не единственный. Излучает большинство элементов компьютера, и чаще всего такое излучение может содержать ценную информацию. Так, в частности, наиболее важной информацией является, как правило, пароль администратора локальной сети. При вводе пароля последний не отображается на экране монитора, поэтому не может быть разведан путем анализа излучений монитора или визуального наблюдения. Однако сигналы, излучаемые клавиатурой, могут быть непосредственными. При этом доступной становится вся информация, вводимая с клавиатуры, в том числе и пароль администратора сети.

Даже если излучение каких-либо элементов действительно не несет никакой информации, оно индивидуально для каждого компьютера. По индивидуальным признакам можно отследить перемещение компьютера, определить временной режим его работы.

Работающий компьютер излучает на всех частотах. Однако у многих вызывает сомнение тот факт, что перехватив излучение, можно получить какую-либо полезную информацию. Содержание документов, с которыми работают сотрудники, становится легко доступным, если заинтересованное лицо может видеть изображение экрана монитора. Огромный интерес представляют также документы, которые распечатываются на принтере.

Наиболее известен перехват излучения мониторов. Во-первых, для нормальной работы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) монитора необходимы высокие уровни сигналов, вследствие чего монитор является самым «громким» излучающим элементом. Во-вторых, для дешифрования перехваченных сигналов монитора не требуется сложной обработки. Для отображения информации на мониторе перехваченный сигнал пригоден вообще без дополнительной обработки. Кроме того, изображение на экране монитора и, следовательно, излучаемые им сигналы многократно повторяются. В профессиональной аппаратуре это используется для накопления сигналов и соответствующего увеличения дальности разведки.

Что же касается перехвата информации за счет излучения принтеров, клавиатуры, то такой перехват возможен в ряде случаев даже с меньшими затратами. Информация в данных устройствах передается последовательным кодом, все параметры этого кода стандартизированы и хорошо известны.

Исследование ПЭМИН-монитора

Для исследования использовался монитор SAMSUNG Sync Master 551 S на ЭЛТ. Исследования проводились в диапазоне частот 28,07–28,45 МГц. Амплитуда ПЭМИН лежала в диапазоне 57,43–92,62 дБм. Для определения диапазона исследуемых частот необходимо знать максимальную разрешающую способность монитора, частоту регенерации или обновления и ширину полосы.

Максимальная разрешающая способность – одна из основных характеристик монитора, которую указывает каждый изготовитель. Так, исследуемый 15-дюймовый монитор с теневой маской и шагом точек 0,24 мм имеет максимальную действительную разрешающую способность 1024×768 точек. Рекомендуемая разрешающая способность исследуемого монитора 800×600 точек.

Частота регенерации или обновления (кадровой развертки для CRT-мониторов) экрана – это параметр, определяющий, как часто изображение на экране заново перерисовывается. Частота регенерации измеряется в герцах (Гц, Hz), где один Гц соответствует одному циклу в секунду. Например, частота регенерации монитора в 100 Гц означает, что изображение обновляется 100 раз в секунду. При максимальной разрешающей способности 1024×768 частота регенерации составляет 68 Гц, а при рекомендованной разрешающей способности 800×600 частота регенерации составляет 85 Гц.

Частота горизонтальной развертки монитора показывает, какое предельное число горизонтальных строк на экране монитора может прочертить электронный луч за одну секунду. Соответственно чем выше это значение, тем выше частота регенерации при заданной разрешающей способности монитора. Предельная частота строк является критичным параметром при разработке CRT-монитора. В таких мониторах используются магнитные системы отклонения электронного луча, представляющие собой обмотки с довольно большой индуктивностью. Амплитуда импульсов перенапряжения на катушках строчной развертки возрастает с частотой строк, в связи с чем этот узел оказывается одним из самых напряженных мест конструкции и одним из главных источников помех в широком диапазоне частот. Мощность, потребляемая узлами строчной развертки, также является одним из серьезных факторов, учитываемых при проектировании мониторов.

Ширина полосы пропускания частот (bandwidth) измеряется в мегагерцах (МГц, MHz) и является одной из основных характеристик монитора. Очень часто на коробке от монитора указывается только ширина полосы пропускания частот. Иногда еще и диапазон горизонтальной частотной развертки. Впрочем, как правило, в руководстве к монитору можно найти и дополнительную информацию. Но даже зная только ширину полосы пропускания монитора, можно определить достаточно точно, сможем ли мы работать в требуемом разрешении при необходимой частоте регенерации. Ширина полосы пропускания характеризует, какой может быть минимальная длительность импульса, соответствующего отображению одиночной точки на строке изображения.

Ширина полосы пропускания зависит от количества пикселей по вертикали и горизонтали, а также от частоты регенерации экрана. Предположим, что Y обозначает число пикселей по вертикали, X – число пикселей по горизонтали, а R – величину частоты регенерации экрана. Чтобы учесть дополнительное время на синхронизацию по вертикали, умножим Y на коэффициент 1,05. Время, необходимое для горизонтальной синхронизации, соответствует примерно 30% от времени сканирования, поэтому используем коэффициент 1,3. В результате получим формулу для расчета ширины полосы пропускания монитора с рекомендованной разрешающей способностью

$$1,05 \cdot Y \cdot 1,3 \cdot X \cdot R = \text{_____ МГц.}$$

Таким образом, для разрешения 800 на 600 пикселей с частотой регенерации 85 Гц получим

$$1,05 \cdot 800 \cdot 1,3 \cdot 600 \cdot 85 = 55,692 \text{ МГц,}$$

а для разрешения 1024 на 768 пикселей с частотой регенерации 68 Гц получим

$$1,05 \cdot 768 \cdot 1,3 \cdot 1024 \cdot 68 = 72,996 \text{ МГц.}$$

Теперь поделим получившиеся значения на 2, что соответствует инверсии сигнала от точки к точке и получим следующее:

- при рекомендованной разрешающей способности

$$55,692/2 = 27,846 \text{ МГц;}$$

- при максимальной разрешающей способности

$$72,996/2 = 36,498 \text{ МГц.}$$

Таким образом, определялась полоса частот, в которой исследовалось излучение монитора.

Для исследования использовалась установка, блок-схема которой представлена на рис. 2.

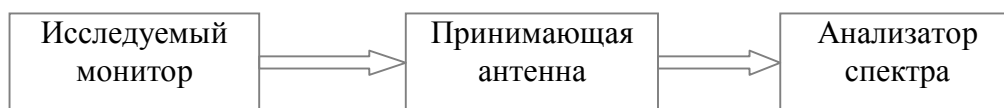


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки

В эксперименте использовалась принимающая антенна ACCORD 5-0 с частотным диапазоном 0,009–2000,0 МГц, анализатор спектра Agilent E4403B с диапазоном частот 0,009–3000 МГц и тестовая программа ЗЕБРА с периодом смены тестовых изображений 500 мс.

Порядок выполнения исследований

В тестовой программе устанавливаются параметры с периодом смены тестовых изображений 500 мс. С помощью принимающей антенны считывается сигнал и передается на анализатор спектра, который обрабатывает сигнал и выдает его в графическом виде на экран.

Частоты, на которых были обнаружены излучения, лежат в диапазоне частот от 27,8 до 28,45 МГц, при этом измерения проводились как перед монитором, так и за ним на расстоянии 1 м. В области перед монитором сигнал обнаружился на 5 частотах. На каждой частоте фиксировался минимальный и максимальный уровень излучения. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни излучения в области перед монитором

Частота, МГц	Минимум, дБм	Максимум, дБм
28,072336	82,49	90,49
28,095512	84,06	91,03
28,126254	75,13	90,36
28,156016	85,22	90,98
28,180192	75,33	90,82

Всплески излучения возникали из-за смены тестовых изображений.

В области за монитором были зафиксированы излучения на 40 частотах. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни излучения в области за монитором

Частота, МГц	Минимум, дБм	Максимум, дБм
27,803875	81,04	89,75
27,857393	83,42	91,43
27,880085	81,13	90,34
27,910750	78,32	91,39
27,941750	81,11	92,78
27,952497	82,03	90,43
27,964984	75,43	90,36
27,972226	76,11	89,23

Окончание табл. 2

Частота, МГц	Минимум, дБм	Максимум, дБм
27,987835	81,62	91,78
28,002936	78,32	90,43
28,013660	82,36	90,52
28,018512	72,15	90,87
28,033577	76,42	90,32
28,041492	79,21	90,61
28,049535	81,32	91,73
28,064750	74,57	90,48
28,072500	69,74	88,34
28,095250	88,89	90,15
28,103163	79,62	91,69
28,115289	81,42	90,28
28,125965	57,43	90,48
28,148899	79,03	90,35
28,156875	68,43	90,43
28,179500	68,24	90,69
28,187500	75,28	90,74
28,202534	82,45	91,62
28,210538	78,02	90,17
28,218276	77,53	92,62
28,233351	76,96	90,46
28,248959	79,14	90,11
28,264125	80,68	91,35
28,280000	80,58	91,56
28,287850	70,02	90,48
28,310709	82,12	90,75
28,341198	79,06	90,14
28,361500	83,02	91,34
28,394625	81,43	90,46
28,402875	81,49	90,03
28,448250	79,07	89,45

Ниже, на рис. 3 и 4, представлены фотографии, сделанные с экрана спектроанализатора, типичные для принимаемого излучения.

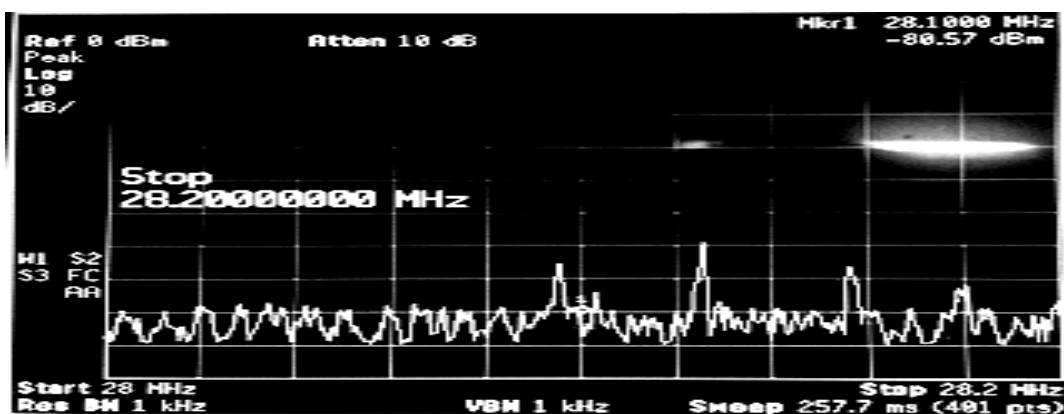


Рис. 3. Излучение в области перед монитором в диапазоне от 28 до 28,2 МГц

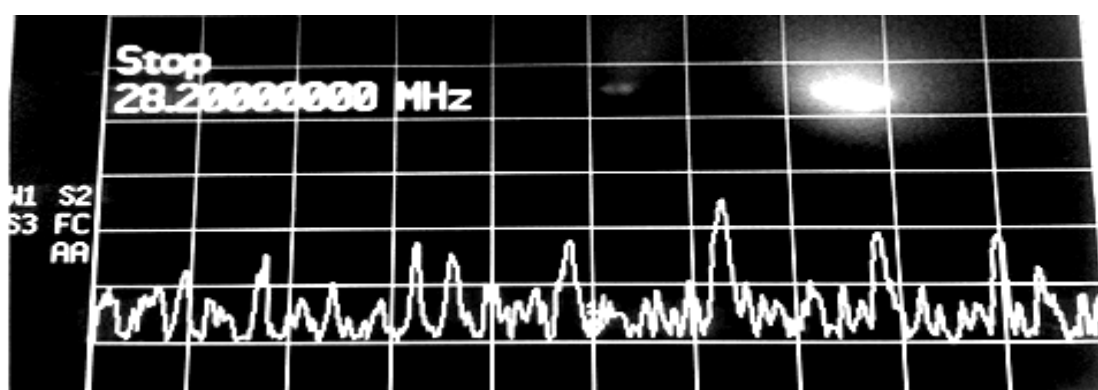


Рис. 2. Излучение в области за монитором в диапазоне от 28 до 28,2 МГц

Анализируя результаты измерений, можно сделать вывод, что интенсивность излучения монитора на расстоянии 1 м достаточна для приема и расшифровки информации. Таким образом, риск утеки информации из-за ПЭМИН достаточно высокий, и для обеспечения защиты необходимо предпринимать меры, рассмотренные ниже.

Методы защиты информации от ПЭМИН

Известны два основных метода защиты – активный и пассивный. Первый предполагает применение специальных широкополосных передатчиков помех [1–4]. Этот метод хорош тем, что устраняется не только угроза утечки информации по каналам побочного излучения компьютера, но и многие другие угрозы [5]. Как правило, становятся невозможными также применение закладных подслушивающих устройств [6] и разведка с использованием излучения всех других устройств, расположенных в защищаемом помещении. Но этот метод имеет и недостатки. Во-первых, достаточно мощный источник излучения не полезен для здоровья. Во-вторых, наличие маскирующего излучения свидетельствует, что в данном помещении обрабатывается секретная информация. Применяя активный метод,

нужно иметь в виду, что уровень создаваемого источником шума излучения может существенно изменяться. В одной точке пространства уровень излучения источника помех может превышать уровень излучения компьютера, а в другой точке или на другой частоте это может не обеспечиваться. Следовательно, после установки источников шума необходимо проведение измерений по всему периметру охраняемой зоны и для всех частот. Процедуру проверки следует повторять всякий раз, когда изменилось расположение или количество компьютеров.

Пассивный метод заключается в экранировании источника излучения, размещении его в экранированном шкафу или в экранировании помещения целиком. Современные технологии экранирования основаны на нанесении различных специальных материалов на внутреннюю поверхность корпуса устройства, излучающего ПЭМИН. Экранирование компьютера даже с применением современных технологий – сложный процесс. В излучении одного элемента преобладает электрическая составляющая, а в излучении другого – магнитная, следовательно, необходимо применять разные материалы. У одного монитора экран плоский, у другого цилиндрический, а у третьего с двумя радиусами кривизны. Поэтому экранировку необходимо осуществлять в несколько этапов. Сначала нужно провести исследование собранного компьютера. Определяются частоты и уровни излучения по всем составляющим компьютера. Затем идут этапы анализа конструктивного исполнения компьютера, разработки технических требований, выбора методов защиты, разработки технологических решений и конструкторской документации для данного конкретного изделия. После этого изделие поступает собственно в производство, где и выполняются работы по защите всех элементов компьютера. Далее в обязательном порядке проводятся испытания, позволяющие подтвердить эффективность принятых решений. Если испытания прошли успешно, заказчику выдается документ, дающий уверенность, что компьютер защищен от утечки информации по каналам побочного радиоизлучения.

В данной работе предлагается модификация активного метода защиты, которая заключается в шифровании данных, передаваемых между модулями обработки информации. Шифрование информации предлагается комбинировать с встраиванием в систему обработки конфиденциальной информации маломощных генераторов шума, что позволяет уменьшить их мощность и сократить уровень маскирующего излучения до уровня фоновых шумов. Места встраивания таких генераторов должны располагаться в наиболее уязвимых с точки зрения ПЭМИН областях аппаратуры. Такой подход позволяет разрабатывать изначально защищенные от ПЭМИН электронные блоки, в которых не требуется использование внешних генераторов шума [3, 7]. В работах [1, 8, 9] предлагаются варианты таких встраиваемых генераторов шума, выполненных только на цифровых логических элементах. Предложенные генераторы имеют равномерную функцию рас-

пределения вероятностей генерируемой последовательности [3]. Надежность генераторов обусловлена грубостью модельных отображений с хаотической динамикой и наличием встроенных средств контроля режимов колебаний [10].

Для криптографической защиты от утечки через каналы ПЭМИН целесообразно использовать скоростные шифры, основанные на перестановках [11] или комбинации подстановок и перестановок [12]. При использовании только перестановок проблему защиты информации от утечки можно рассматривать в рамках предложенной авторами в работах [5, 6, 13, 14] концепции преобразования форматов представления данных [15] в доверенных и недоверенных подсистемах обработки информации. Техническая реализация такой системы обсуждалась в работах [16–19].

Особое значение в этой связи имеет использование микропроцессоров с возможностью быстрого преобразования форматов представления данных [20–22], так как это позволяет преобразовать формат данных в рабочий, не зашифрованный формат только внутри процессора при необходимости провести обработку. В остальных случаях данные находятся в формате хранения, и их утечка не несет угрозы утечки информации, в том числе по каналу ПЭМИН. В работах [23–26] предпринят ряд шагов по упрощению и повышению быстродействия устройств, осуществляющих преобразование форматов данных, а в работах [27, 28] описана практическая реализация универсального преобразования форматов данных. Особенности работы некоторых модулей подробно обсуждены в [2, 29].

Таким образом, в работе приведены результаты исследований побочных электромагнитных излучений персонального компьютера и его блоков в диапазоне частот от 20 до 1000 МГц. Показано, что наиболее сильные излучения по каналу ПЭМИН наблюдаются от монитора, что создает угрозу утечки информации. Отмечено, что недостатками активного блокирования канала ПЭМИН внешними генераторами шумов являются сложность конфигурирования системы подавления, вредность для здоровья и возможность отслеживания вычислительной техники, в которой обрабатывается секретная информация. Для устранения перечисленных недостатков предлагается шифровать данные, передаваемые по каналам передачи, и встраивать маломощные генераторы шума в системы обработки конфиденциальной информации, что позволит уменьшить их мощность и сократить ее до уровня фоновых шумов. Проводится обзор технических средств и методик предотвращения утечки информации с использованием технологии преобразования форматов данных.

Показано также, что комбинирование методов преобразования форматов данных и генераторов шума позволяет блокировать утечку информации по ПЭМИН, при этом практически не увеличивая излучения блокирующих шумов и не привлекая тем самым внимания к системе обработки конфиденциальной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хвалин А. Л., Сотов Л. С., Россошанский А. В. Цифровой формирователь случайных сигналов на базе сдвиговых регистров // Радиотехника. 2014. № 10. С. 68–73.
2. 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.
3. Сотов Л. С., Харин В. Н. Цифровой генератор подкачки энтропии на базе отображения Арнольда // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 6. С. 57–66.
4. Сотов Л. С., Харин В. Н. Использование генераторов динамического хаоса в системах информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2009. № 2. С. 32–37.
5. 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.
6. 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.
7. Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. К вопросу об архитектуре аналого-цифровых систем генерации случайных сигналов // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. 2007. Т. 2. С. 85–87.
8. Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н. Алгоритм работы и модель функционального генератора перестановок // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 41–46.
9. Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н. Устройство функционального генератора перестановок // Моделирование систем и процессов. 2011, № 1–2. С. 59–64.
10. Сотов Л. С., Харин В. Н., Хвалин А. Л. Детекторы режимов функционирования генераторов случайных сигналов // Автоматика и телемеханика. 2010. № 5. С. 166–170.
11. Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Гуц Н. Д., Изотов Б. В. Криптография : скоростные шифры. СПб. : Изд-во БХВ-Петербург, 2002. 496 с.
12. 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.
13. Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. Модуль сервера форматирования в распределенных реляционных СУБД с повышенным уровнем ИБ // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. 2006. Т. 1. С. 182–184.
14. 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.
15. 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.
16. Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. Аппаратный акселератор сервера форматирования данных // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. 2007. Т. 1. С. 134–136.

17. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Модуль генерации формирующих сред в распределенных реляционных СУБД // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. 2006. Т. 1. С. 179–182.

18. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Структура подсистемы стохастической генерации дескрипторов форматов // Аспирант и соискатель. 2009. № 4. С. 86–88.

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

20. *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.

21. *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.

22. *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.

23. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Математические модели транспозиционных преобразований // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5, № 12. С. 58–60.

24. *Соболев С. С., Харин В. Н., Сотов Л. С.* Модели устройств кросс-кластерных перестановок данных в ЭВМ // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2009. № 12. С. 51–55.

25. *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.

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

27. *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.

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

29. *Сотов Л. С., Солопов А. А., Фарафонова А. В.* Модель инволютивного транспозиционного преобразователя // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 34–46.

АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ МИНИАТЮРНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. А. Игнатьев, Г. М. Проскуряков*, А. В. Васильев

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

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

Представлены результаты решения задачи ориентации вращающихся подвижных объектов на основе использования разработанных алгоритмов обработки комплексной информации, получаемой от трехосных блоков магнитометров, гироскопов, акселерометров и таймера. Предложена схема миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов, реализуемая в виде микропроцессорной измерительно-вычислительной платы.

Ключевые слова: задача ориентации, трехосный блок, магнитометр, акселерометр, гироскоп, таймер, начальная выставка, хронометрирование, магнитометрические измерения.

Algorithms Miniature Orientation System Rotating Moving Objects

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

Presents the results of the task orientation of the rotating moving objects based on the use of the developed algorithms for the processing of complex information obtained from triaxial blocks magnetometers, gyroscopes, accelerometers and timer. The proposed scheme miniature orientation system rotating moving objects, implemented as a microprocessor-based measuring and computing circuit board.

Key words: task orientation, triaxial block, magnetometer, accelerometer, gyroscope, timer, initial setting, timekeeping, magnetometric measurements.

Вращающиеся подвижные объекты (ВПО) занимают особое место среди множества морских, наземных, подземных и воздушных аппаратов. К числу таких ВПО следует отнести малогабаритные управляемые снаряды систем высокоточного оружия, подземные снаряды, применяемые в буровой скважине при проведении бурения, долговременные космические аппараты в режиме их принудительной закрутки (орбитальные станции, пилотируемые и грузовые космические корабли, искусственные спутники Земли для связи, метеорологии, мониторинга и наблюдений из космоса и др.). Угловые скорости ω_0 принудительного вращения (качания или сканирования) таких ВПО могут составлять величины от долей герц до единиц и даже десятков герц.

Анализ существующей научно-технической литературы [1–6] показывает, что для решения задачи автономной ориентации ВПО в настоящее время в основном используется информация от инерциальных датчиков

(гироскопов и акселерометров). Вместе с тем достаточно привлекательным и многообещающим вариантом построения миниатюрной системы ориентации (МСО) для ВПО является схемотехническое решение на основе самостоятельного использования магнитометрической информации.

В [7] доказывается факт принципиальной невозможности решения задачи ориентации подвижного объекта на основе использования только магнитометрической информации, получаемой от трехосного блока магнитометров (ТБМ), и применения алгоритмов ее обработки, синтезируемых путем обращения уравнений Пуассона, описывающих формирование выходных сигналов ТБМ на подвижных объектах (ПО). Этот факт связан с вырождением алгоритма ориентации, сформированного на основе уравнения Пуассона, так как детерминант соответствующего уравнения всегда обращается в нуль [7]. Однако данный принципиально важный факт не всегда принимается во внимание, в частности, в патенте [8].

Однако можно показать, что если использовать не чисто магнитометрическую, а расширенную магнито-, тахо-, хроно-, акселерометрическую информацию, получаемую от ТБМ, трехосного блока акселерометров (ТБА), трехосного блока гироскопов (ТБГ) и таймера, то задача ориентации ВПО становится корректно и однозначно решаемой в условиях функциональной избыточности информации [9–15].

Для любого ВПО можно выделить два принципиально разных режима работы и системы ориентации, выполняемых последовательно в два этапа:

- режим начальной выставки (1-й этап);
- режим автономной работы (2-й этап).

В режиме **начальной выставки** объект находится практически в неподвижном относительно Земли состоянии. С помощью блоков ТБА и ТБМ, входящих в состав МСО, производятся магнитометрические и гравиметрические измерения, на основе информации которых определяется матрица ориентации A

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_3^3, \quad (1)$$

где A_γ , A_ϑ , A_ψ – матрицы углов вращения (γ), тангажа (ϑ) и курса (ψ); a_{ij} ($i, j = \overline{1, 3}$) – направляющие косинусы углов ориентации ВПО. Причем

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\vartheta \cdot \cos\psi, & a_{12} &= \sin\vartheta, & a_{13} &= -\cos\vartheta \cdot \sin\psi, \\ a_{21} &= \sin\psi \cdot \sin\gamma - \cos\psi \cdot \sin\vartheta \cdot \cos\gamma, & a_{22} &= \cos\vartheta \cdot \cos\gamma, & a_{23} &= \cos\psi \cdot \sin\gamma + \sin\psi \cdot \sin\vartheta \cdot \cos\gamma, \\ a_{31} &= \sin\psi \cdot \cos\gamma + \cos\psi \cdot \sin\vartheta \cdot \sin\gamma, & a_{32} &= -\cos\vartheta \cdot \sin\gamma, & a_{33} &= \cos\psi \cdot \cos\gamma - \sin\psi \cdot \sin\vartheta \cdot \sin\gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Решая систему уравнений, описывающих показания ТБА и ТБМ с учетом соотношения (1), получим **алгоритм начальной выставки** ВПО (алгоритм магнитоакселерометрического аналитического горизонт-компасирования):

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{(T_{xg} \cdot F_{gT}^{xyg} - T_{zg} \cdot F_{gT}^{yz})}{D}, & a_{12} &= -g_x/g, \\
a_{13} &= \frac{(T_{zg} \cdot F_{gT}^{xyg} + T_{xg} \cdot F_{gT}^{yz})}{D}, \\
a_{21} &= \frac{(T_{xg} \cdot F_{gT}^{yyg} - T_{zg} \cdot F_{gT}^{zx})}{D}, & a_{22} &= -g_y/g, \\
a_{23} &= \frac{(T_{zg} \cdot F_{gT}^{yyg} + T_{xg} \cdot F_{gT}^{zy})}{D}, \\
a_{31} &= \frac{(T_{xg} \cdot F_{gT}^{zyg} - T_{zg} \cdot F_{gT}^{xy})}{D}, & a_{32} &= -g_z/g, \\
a_{33} &= \frac{(T_{zg} \cdot F_{gT}^{zyg} + T_{xg} \cdot F_{gT}^{xy})}{D}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Причем

$$\begin{aligned}
F_{gT}^{xyg} &= g_x \cdot T_{yg} + g \cdot \tilde{T}_x, \\
F_{gT}^{yz} &= g_y \cdot \tilde{T}_z - g_z \cdot \tilde{T}_y, \\
F_{gT}^{yyg} &= g_y \cdot T_{yg} + g \cdot \tilde{T}_y, \\
F_{gT}^{zx} &= g_z \cdot \tilde{T}_x - g_x \cdot \tilde{T}_z, \\
F_{gT}^{zy} &= g_z \cdot \tilde{T}_y - g_y \cdot \tilde{T}_x, \\
F_{gT}^{zyg} &= g_z \cdot T_{yg} + g \cdot \tilde{T}_z, \\
F_{gT}^{xy} &= g_x \cdot \tilde{T}_y - g_y \cdot \tilde{T}_x, \\
D &= g \cdot T_g^2 = g \cdot (T_{xg}^2 + T_{zg}^2).
\end{aligned} \tag{4}$$

Аналогичным образом могут быть построены алгоритмы аналитического горизонт-компасирования объекта на основе использования магнито-, тахометрической или тахо-, акселерометрической информации, получаемой от пар блоков ТБМ–ТБГ или ТБГ–ТБА.

Направляющие косинусы a_{ij} ($i, j = \overline{1, 3}$) должны удовлетворять условиям коллинеарности и ортогональности осей, а также условиям связанности, невырожденности и нормированности матрицы ориентации A (**алгоритмы контроля и нормировки направляющих косинусов**).

Алгоритмы начальной выставки позволяют вычислить функции синусов и косинусов углов ориентации $(\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0)$ основания в этом режиме через направляющие косинусы a_{ij} ($i, j = \overline{1, 3}$) в условиях функциональной избыточности информации:

– для канала курса

$$\begin{aligned}
\sin \psi_0 &= a_{13} / (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2} = a_{13} / (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{1/2}, \\
\cos \psi_0 &= a_{11} / (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{1/2} = a_{11} / (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2};
\end{aligned} \tag{5}$$

– для канала вращения

$$\begin{aligned}\sin \gamma_0 &= -a_{32} / (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2} = a_{22} / (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{1/2}, \\ \cos \gamma_0 &= a_{22} / (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2} = a_{22} / (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{1/2}, \\ \cos \gamma_0 &= (a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1) / 2;\end{aligned}\quad (6)$$

– для канала тангажа

$$\begin{aligned}\sin \vartheta_0 &= a_{12}, \\ \cos \vartheta_0 &= (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{1/2} = (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Контроль правильности выполнения вычислений проводится по **алгоритму контроля и нормировки** тригонометрических функций.

В результате выполнения операции начальной выставки оказываются известными те начальные значения углов ориентации ψ_0 , ϑ_0 , γ_0 , с которыми ВПО и его МСО переходят к работе в основном режиме – **режиме автономной работы**, в котором происходит принудительное раскручивание ВПО до угловой скорости ω_0 вокруг продольной оси X (рис. 1).

В общем случае ТБМ может быть установлен на ВПО так, что оси ортогональной магнитометрической системы координат $m = X_m Y_m Z_m$, совпадающие с осями чувствительностей магнитометров, будут повернуты относительно осей подвижной системы координат $n = XYZ$ на углы монтажа α_m , β_m , σ_m .

В этом случае показания ТБМ (T_{xm} , T_{ym} , T_{zm}) описываются векторно-матричным уравнением Пуассона с учетом матрицы монтажа M

$$\mathbf{T}_m = [T_{xm} \ T_{ym} \ T_{zm}]^T = M \cdot [(S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ} + \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}], \quad (8)$$

где $\mathbf{T}_{МПЗ}$, $\mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}$ – векторы напряженности магнитного поля Земли и постоянной составляющей поля объекта; \mathbf{T}_m – вектор напряженности результирующего магнитного поля, соответствующего показаниям ТБМ; A , M – матрицы ориентации ВПО и монтажа на нем ТБМ (3×3); E , S – единичная матрица и матрица (3×3) коэффициентов Пуассона; T_B , T_G , T_{xg} , T_{zg} – составляющие вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$; \tilde{T}_x , \tilde{T}_y , \tilde{T}_z – приведенные показания ТБМ. Причем

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_{МПЗ} &= [T_{xg} \ T_{yg} \ T_{zg}]^T, \\ \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi} &= [P \ Q \ R]^T,\end{aligned}\quad (9)$$

где P , Q , R – составляющие вектора $\mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}$.

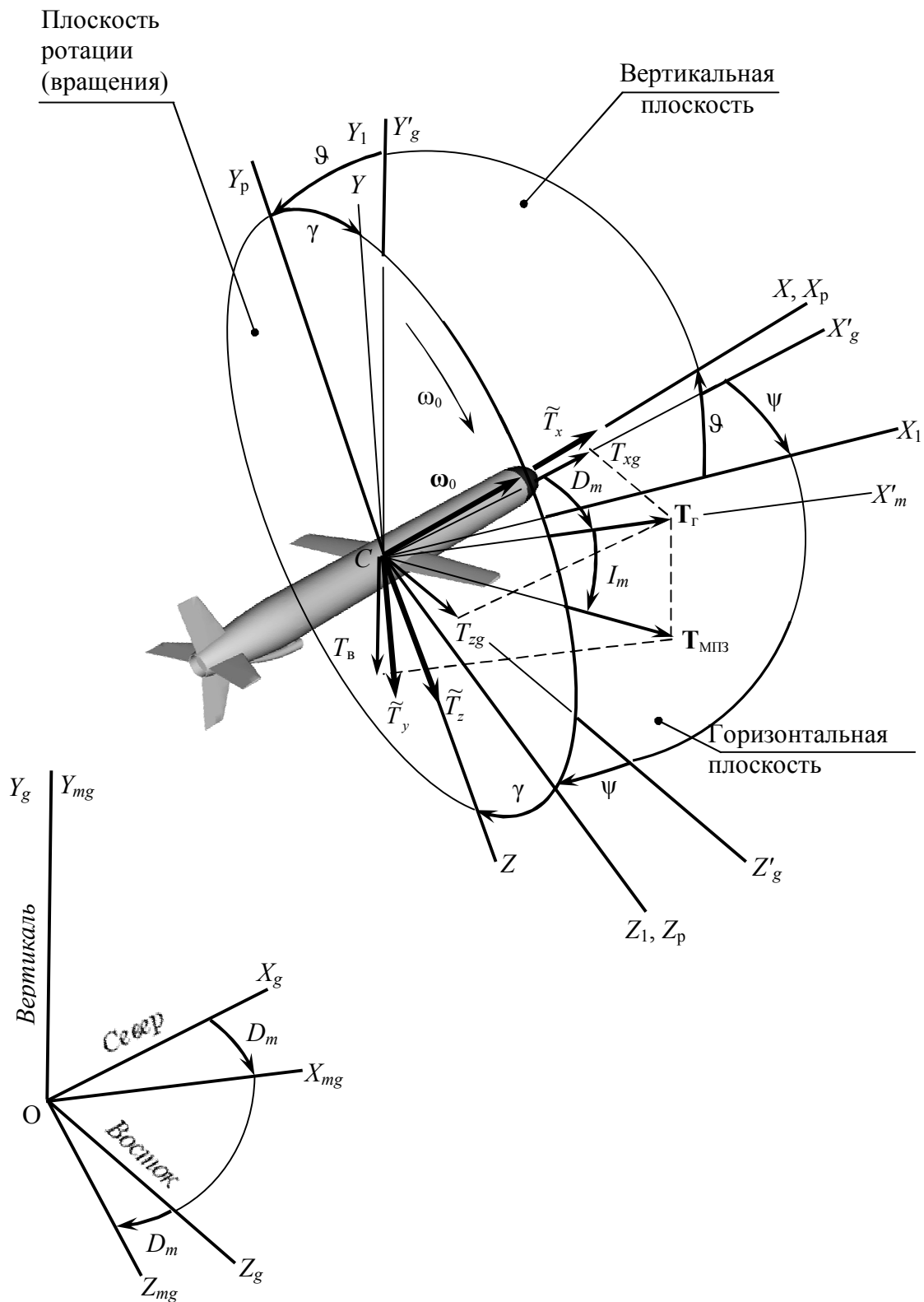


Рис. 1. Схема систем координат для ВПО: $X_g Y_g Z_g$ – географическая (s); $X_{mg} Y_{mg} Z_{mg}$ – геомагнитная; $X_1 Y_1 Z_1, X'_m Y'_m Z'_m, X'_g Y'_g Z'_g$ – промежуточные; $X_p Y_p Z_p$ – резалева; $D_m; I_m$ – углы магнитного склонения и наклонения; C – центр масс объекта

Вращение объекта с угловой скоростью ω_0 вокруг продольной оси X с учетом произвольной ее ориентации в пространстве, определяемой углами истинного (ψ), магнитного (Φ) курсов и тангажа (ϑ), приводит к магнито-механической амплитудно-фазо-частотной модуляции сигналов магнитометров $T_{xm}(\omega_0 t)$, $T_{ym}(\omega_0 t)$, $T_{zm}(\omega_0 t)$ (рис. 2). Причем в параметрах этих гармонических сигналов содержится косвенная информация об углах ориентации ВПО в пространстве (ψ , ϑ , γ).

Для формирования и использования основных алгоритмов ориентации, обеспечивающих вычисление параметров ориентации ВПО по сигналам ТБМ, необходимо предварительно провести преобразование магнитометрической информации путем масштабирования, ортогонализации сигналов ТБМ, а также приведения их к немагнитному основанию.

Параллельно магнитометрическому каналу измерений (от ТБМ) в МСО могут быть организованы тахометрический (от ТБГ) и хронометрический (от таймера) каналы. Хронометрический канал измерений работает дискретно с циклом, имеющим период, совпадающий с полупериодом вращения ВПО ($T_0/2$). В пределах текущего полуоборота таймер в хронометрическом канале измерений запускается по сигналам магнитометрического канала в тот момент, когда сигнал Y -магнитометра достигнет своего экстремального значения ($+A_y$; $-A_y$) (см. рис. 2).

При этом процесс хронометрирования с помощью таймера, подсчитывающего хроноимпульсы (N , N_0), сводится к определению периода вращения T_0 и текущего времени t по **алгоритму хронометрирования**:

$$T_0 = N_0 \cdot \tau, \quad t = N \cdot \tau, \quad (10)$$

где N_0 , N – числа хроноимпульсов генератора, подсчитанных счетчиком за период вращения T_0 и за текущее время t ; τ – цена одного хроноимпульса.

Тогда угловая скорость вращения ВПО рассчитывается по формуле

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}. \quad (11)$$

Значение угловой скорости ω_0 вращения ВПО, подсчитанное на предыдущем полуобороте, распространяется на следующий полуоборот, на котором эта угловая скорость вновь уточняется для последующего полуоборота.

Приближенное значение угла вращения $\tilde{\gamma}$ ВПО вычисляется на основе информации тахометрического ($\omega_x = \omega_0$) или хронометрического (ω_0 , T_0 , t , N , N_0) каналов измерений:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma} &= \omega_x \cdot t, \\ T_0 &= \omega_0^{-1}, \\ t &= \frac{N}{N_0} \cdot \pi. \end{aligned} \quad (12)$$

График изменения приближенного значения угла вращения $\tilde{\gamma}(t)$ может быть представлен в виде прямой линии $OABCD$ ($\tilde{\gamma} = \omega_0 \cdot t$) или в виде периодической пилообразной линии с периодом, равным $T_0/2$ (см. рис. 2).

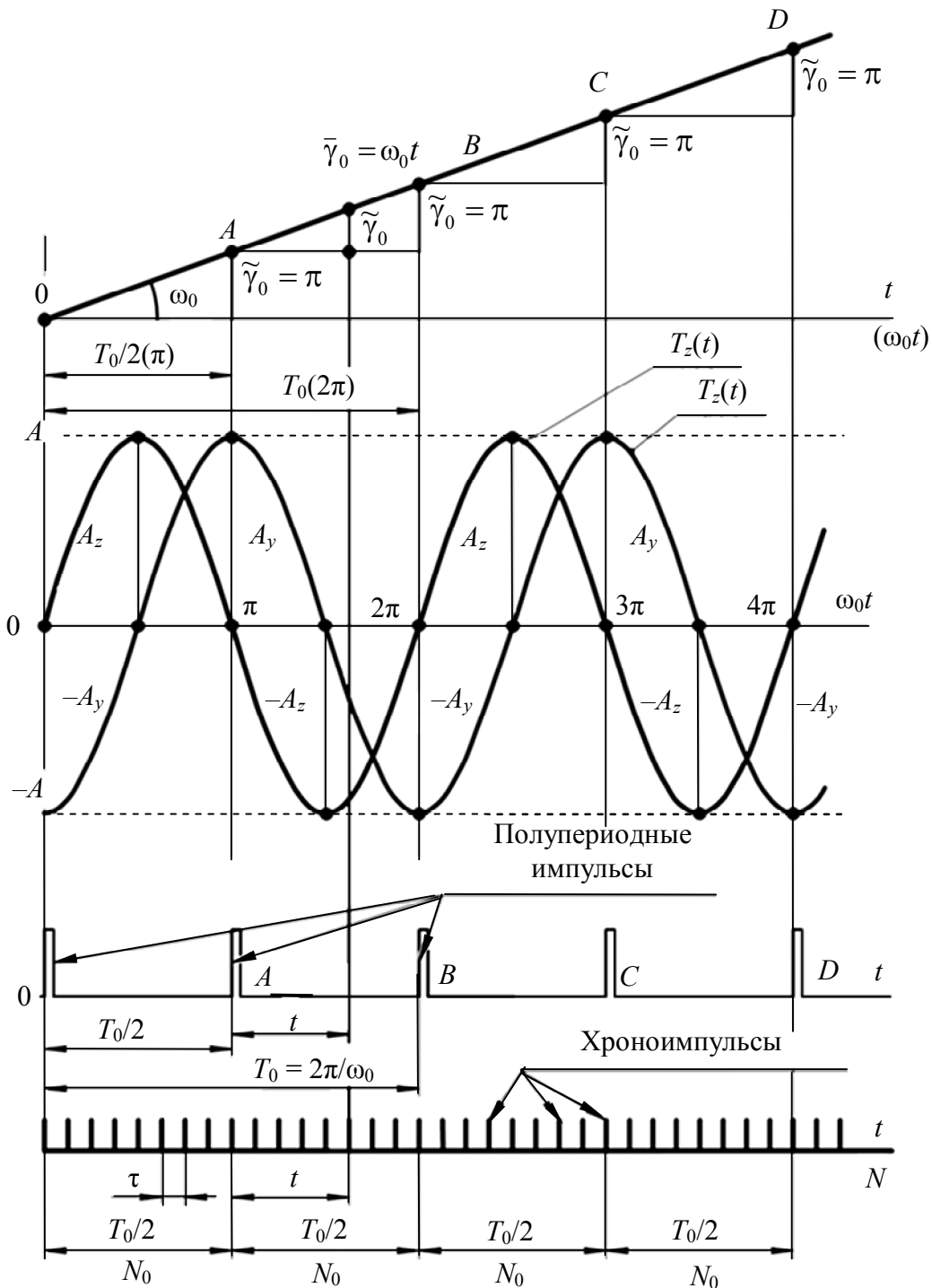


Рис. 2. Схема формирования сигналов системы ориентации

Схема взаимного положения векторов угловой скорости вращения ω_0 ВПО и $\mathbf{T}_{МПЗ}$ с учетом произвольной ориентации объекта представлена на рис. 3.

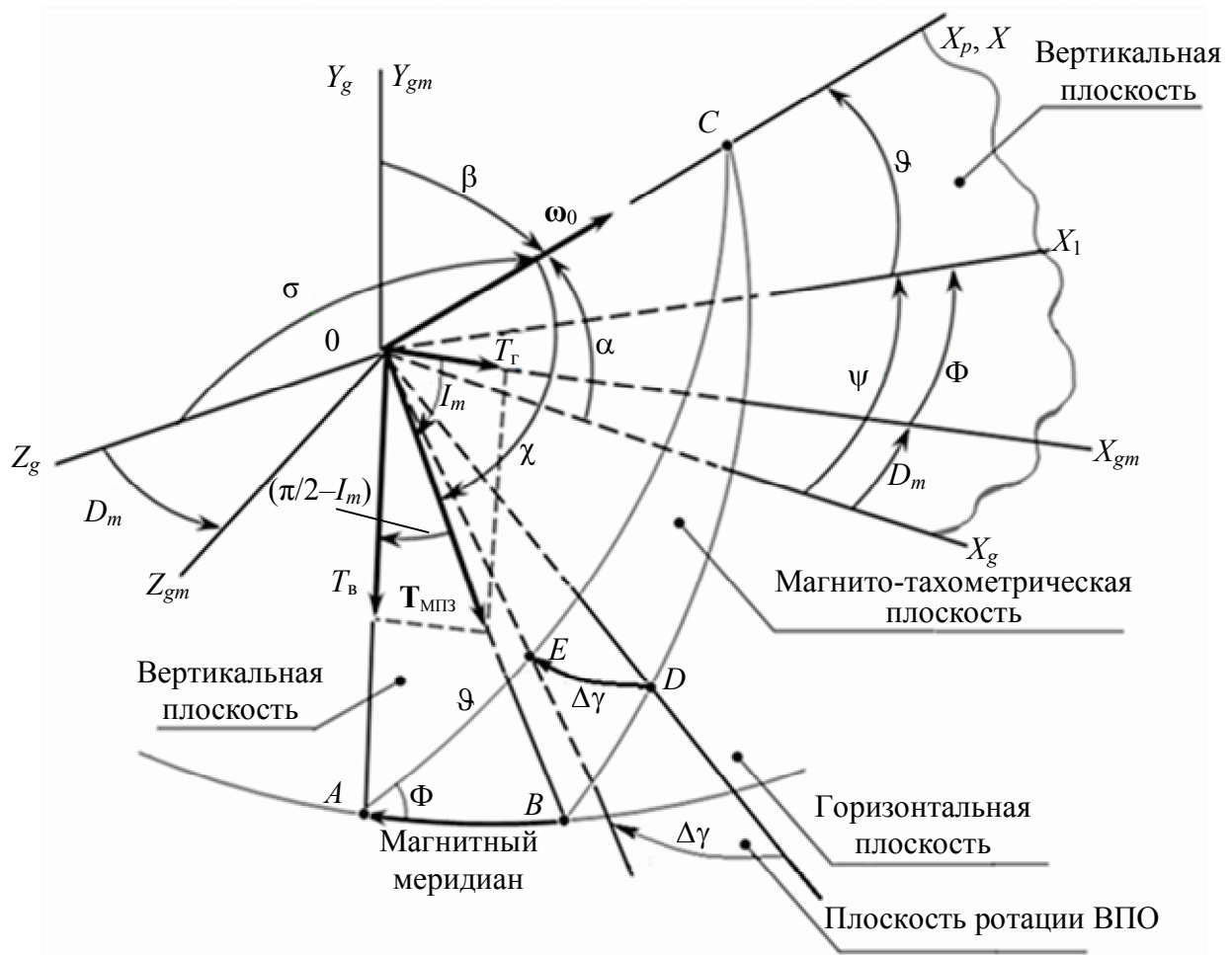


Рис. 3. Схема для определения угла поправки $\Delta\gamma$

С учетом приведения показаний ТБМ к немагнитному объекту ($\tilde{\mathbf{T}} = [\tilde{T}_x \quad \tilde{T}_y \quad \tilde{T}_z]^T$) на основании уравнения (8) можно установить, что

$$\tilde{\mathbf{T}}_{МПЗ}^n = \tilde{\mathbf{T}} = [\tilde{T}_x \quad \tilde{T}_y \quad \tilde{T}_z]^T. \quad (13)$$

где верхний индекс n обозначает подвижную систему координат.

Тогда модуль вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$ равен

$$T_{МПЗ} = (\tilde{T}_x^2 + \tilde{T}_y^2 + \tilde{T}_z^2)^{1/2}. \quad (14)$$

Угол χ между векторами $\boldsymbol{\omega}_0$ и $\mathbf{T}_{МПЗ}$ можно определить из соотношений:

$$\sin \chi = \frac{|\boldsymbol{\omega}_0^s \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^s|}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0} = \frac{|\boldsymbol{\omega}_0^n \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^n|}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0}, \quad (15)$$

$$\cos \chi = \frac{(\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^s \cdot \boldsymbol{\omega}_0^s)}{T_{\text{МПЗ}} \cdot \omega_0} = \frac{(\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^n \cdot \boldsymbol{\omega}_0^n)}{T_{\text{МПЗ}} \cdot \omega_0}, \quad (16)$$

где верхний индекс s обозначает неподвижную систему координат.

Из общих выражений (15) и (16), в частности, можно получить формулы для функций $\sin \chi$ и $\cos \chi$:

$$\sin \chi = \frac{(\tilde{T}_y^2 + \tilde{T}_z^2)^{1/2}}{T_{\text{МПЗ}}}, \quad (17)$$

$$\cos \chi = \frac{\tilde{T}_x}{T_{\text{МПЗ}}}. \quad (18)$$

Условиями непопадания осей чувствительности ТБМ в мертвую зону, когда направления векторов $\boldsymbol{\omega}_0$ и $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ совпадают, являются неравенства:

$$\begin{aligned} \sin \chi &\neq 0, \\ \cos \chi &\neq 1. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом проявления на практике у ТБМ порога чувствительности ($\Delta T_{\text{порог}}$) мертвая зона ТБМ характеризуется узким конусом с углом полураствора, равным

$$\chi_{\min} = \frac{\Delta T_{\text{порог}}}{T_{\text{МПЗ}}}. \quad (20)$$

Тогда условия (19) могут быть конкретизированы:

$$\chi > \chi_{\min}. \quad (21)$$

К концу предыдущего полуоборота ВПО становятся известными углы ориентации продольной оси X объекта в пространстве, определяемые в результате выполнения операции **начальной выставки** (ψ_0, ϑ_0) или вычислений по алгоритмам **автономной ориентации** объекта (ψ_1, ϑ_1).

При этом магнитный курс ВПО рассчитывается по формуле

$$\Phi = \psi - D_m. \quad (22)$$

Из решения сферического треугольника ABC (см. рис. 3) можно получить формулы для вычисления поправки $\Delta \gamma$ к приближенному значению угла вращения $\tilde{\gamma}$, найденному тахометрическим или хронометрическим путем:

$$\begin{aligned}
\Delta\gamma_1 &= \arcsin\left(\frac{\sin\Phi \cdot \cos I_m}{\sin\chi}\right), \\
\Delta\gamma_2 &= \arcsin\left(\frac{\sin\Phi \cdot \sin 2I_m \cdot \cos\vartheta}{\sin^2 I_m + \sin^2\Phi \cdot \cos^2 I_m \cdot \cos^2\vartheta}\right), \\
\Delta\gamma_3 &= \arccos\left(\frac{\sin I_m + \sin\vartheta \cdot \cos\chi}{\cos\vartheta \cdot \sin\chi}\right).
\end{aligned} \tag{23}$$

Оценка поправки равна

$$\Delta\hat{\gamma} = \text{med}(\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \Delta\gamma_3) = \left(\overline{\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \Delta\gamma_3}\right). \tag{24}$$

Текущее значение угла вращения γ определяется по формуле

$$\gamma = \tilde{\gamma} + \Delta\hat{\gamma} = \omega_0 \cdot t + \Delta\hat{\gamma}. \tag{25}$$

Подставляя в уравнение (8) соотношения (6) и решая систему трех нелинейных уравнений относительно $\sin\psi$ и $\cos\vartheta$, получим

$$\begin{aligned}
\sin\psi &= \frac{b_1}{a_1} \left(1 \pm \left(1 - 4 \frac{a_1 \cdot c_1}{b_1} \right)^{1/2} \right), \\
\cos\vartheta &= \frac{b_2}{a_2} \left(1 \pm \left(1 - 4 \frac{a_2 \cdot c_2}{b_2} \right)^{1/2} \right),
\end{aligned} \tag{26}$$

Причем

$$\begin{aligned}
a_1 &= T_{xg}^2 \cdot (\sin^2\gamma - \cos^2\gamma) + T_{zg}^2, \\
b_1 &= (\tilde{T}_y \cdot \sin\gamma + \tilde{T}_z \cdot \cos\gamma) \cdot (\sin^2\gamma - \cos^2\gamma) \cdot T_{xg}, \\
c_1 &= (\tilde{T}_y \cdot \sin\gamma + \tilde{T}_z \cdot \cos\gamma)^2 - T_{zg}^2, \\
a_2 &= (T_{xg} \cdot \cos\psi + T_{zg} \cdot \sin\psi)^2 + T_{yg}^2, \\
b_2 &= (T_{xg} \cdot \cos\psi + T_{zg} \cdot \sin\psi) \cdot \tilde{T}_x, \\
c_2 &= \tilde{T}_x^2 - T_{yg}^2.
\end{aligned} \tag{27}$$

Следует иметь в виду, что решение задачи, связанной с вычислением углов ψ и ϑ по формулам (26) и (27), сопряжено с возможным проявлением вычислительной неустойчивости решения, что характеризует плохую обусловленность решения (класс некорректных задач).

Проверкой правильности определения углов ориентации $(\psi, \vartheta, \gamma)$ ВПО по алгоритмам (25)–(27) могут стать условия нормировки тригонометрических функций, а также их соответствие численным значениям амплитуд, смещений и фаз гармонических сигналов ТБМ.

Выражения (26) используются для вычисления углов ψ и ϑ на каждом полуобороте при условии работы ВПО **в режиме пространственной стабилизации** ($\psi = \text{const}$, $\vartheta = \text{const}$).

В режиме управления объект маневрирует в пространстве, что связано с быстрым изменением углов курса ψ и тангажа ϑ при переходе от одного полуоборота к другому ($\psi = \text{var}$, $\vartheta = \text{var}$). Поэтому условия о неизменности углов ψ и ϑ в пределах нескольких полупериодов не может быть принято и использовано в алгоритмах обработки информации ($\psi \neq \text{const}$, $\vartheta \neq \text{const}$). В этом режиме используется условие о вариабельности углов ψ и ϑ с учетом малости их отклонений ($\Delta\psi \approx 0$; $\Delta\vartheta \approx 0$) за каждый полупериод:

$$\begin{aligned}\psi &= \psi_0 + \Delta\psi, \\ \vartheta &= \vartheta_0 + \Delta\vartheta,\end{aligned}\tag{28}$$

где ψ_0 и ϑ_0 – углы курса и тангажа, значения которых найдены в конце предыдущего полуоборота.

С учетом соотношений (6) и (28) на основе уравнения (8) можно получить векторно-матричное уравнение, описывающее работу магнитометрического канала измерений МСО в вариациях (отклонениях):

$$\begin{pmatrix} \Delta\tilde{T}_x \\ \Delta\tilde{T}_y \\ \Delta\tilde{T}_z \end{pmatrix} = (S + E)^{-1} \cdot M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} k_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta T_{xm} \\ \Delta T_{ym} \\ \Delta T_{zm} \end{pmatrix} = A(\psi_0, \vartheta_0, \gamma, \Delta\psi, \Delta\vartheta) \cdot \begin{pmatrix} T_{xg} \\ T_{yg} \\ T_{zg} \end{pmatrix}, \tag{29}$$

где $\Delta\tilde{T}_x$, $\Delta\tilde{T}_y$, $\Delta\tilde{T}_z$ – приведенные значения вариаций показаний ТБМ в трехграннике n ; k_x , k_y , k_z – масштабные коэффициенты каналов измерения ТБМ; ΔT_{xm} , ΔT_{ym} , ΔT_{zm} – первичные значения вариаций показаний ТБМ в трехграннике n .

Из решения линеаризованных уравнений, получаемых из уравнения (29), можно вывести формулы для вычисления вариаций $\Delta\psi$ и $\Delta\vartheta$, характеризующих изменения углов курса ψ и тангажа ϑ в пределах текущего полуоборота, в течение которого ВПО маневрирует, относительно тех значений углов ψ_0 и ϑ_0 , которые были зафиксированы в конце предыдущего полуоборота:

$$\begin{aligned}
\Delta\psi_1 &= \frac{F_{xz} \cdot (\Delta\tilde{T}_{yz} \cdot \sin\vartheta_0 - \Delta\tilde{T}_x \cdot \cos\vartheta_0 + F_{xz}) - T_{xg} \cdot (\Delta\tilde{T}_{yz} \cdot \cos\vartheta_0 - \Delta\tilde{T}_x \cdot \sin\vartheta_0 - T_{yg})}{\det H_1}, \\
\Delta\psi_2 &= \frac{(\Delta\tilde{T}_{xy} - F_{zx}) \cdot (F_{xz} \cdot \sin\vartheta_0 - T_{yg} \cdot \cos\vartheta_0)}{\det H_2}, \\
\Delta\psi_3 &= \frac{(\Delta\tilde{T}_{zy} - F_{zx}) \cdot (F_{xz} \cdot \cos\vartheta_0 + T_{yg} \cdot \sin\vartheta_0)}{\det H_3}, \\
\Delta\vartheta_1 &= \frac{F_{zx} \cdot [(\Delta\tilde{T}_{yz} \cdot \cos\vartheta_0 + \Delta\tilde{T}_x \cdot \sin\vartheta_0) - T_{yg}]}{\det H_1}, \\
\Delta\vartheta_2 &= \frac{(\Delta\tilde{T}_{zy} \cdot F_{zx} - T_{yg}^2) \cdot \cos\vartheta_0 + (\Delta\tilde{T}_x - T_{yg} \cdot \sin\vartheta_0) \cdot F_{xz}}{\det H_2}, \\
\Delta\vartheta_3 &= \frac{(T_{yg}^2 - \Delta\tilde{T}_{zy} \cdot F_{zx}) \cdot \sin\vartheta_0 + (\Delta\tilde{T}_{yz} - T_{yg} \cdot \cos\vartheta_0) \cdot F_{xz}}{\det H_3}.
\end{aligned} \tag{30}$$

Причем

$$\begin{aligned}
\det H_1 &= 0,5 \cdot (T_{xg}^2 - T_{zg}^2) \cdot \sin 2\psi_0 - T_{xg} \cdot T_{zg} \cdot \cos 2\psi_0 \neq 0, \\
\det H_2 &= F_{xz} \cdot (T_{yg} \cdot \cos\vartheta_0 - F_{zx} \cdot \sin\vartheta_0) \neq 0, \\
\det H_3 &= F_{xz} \cdot (T_{yg} \cdot \sin\vartheta_0 + F_{zx} \cdot \cos\vartheta_0) \neq 0,
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
F_{xz} &= T_{xg} \cdot \cos\psi_0 + T_{zg} \cdot \sin\psi_0, \\
F_{zx} &= T_{zg} \cdot \cos\psi_0 - T_{xg} \cdot \sin\psi_0, \\
\Delta\tilde{T}_{yz} &= \Delta\tilde{T}_y \cdot \cos\gamma - \Delta\tilde{T}_z \cdot \sin\gamma, \\
\Delta\tilde{T}_{zy} &= \Delta\tilde{T}_y \cdot \sin\gamma + \Delta\tilde{T}_z \cdot \cos\gamma.
\end{aligned} \tag{32}$$

Решение обратной задачи бортовой магнитометрии, основанное на использовании формул (30)–(32), характеризуется большой степенью вычислительной устойчивости алгоритмов в отклонениях.

Алгоритмы вычисления вариаций углов курса ψ и тангажа ϑ позволяют оценить эти вариации (отклонения) в условиях избыточности информации:

$$\begin{aligned}
\Delta\hat{\psi} &= \text{med}(\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \Delta\psi_3) = \overline{(\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \Delta\psi_3)}, \\
\Delta\hat{\vartheta} &= \text{med}(\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \Delta\vartheta_3) = \overline{(\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \Delta\vartheta_3)}.
\end{aligned} \tag{33}$$

Текущие значения углов ориентации продольной оси ВПО (ψ , ϑ) вычисляются на основании выражений (28) с учетом подстановки

$$\begin{aligned}
\Delta\psi &= \Delta\hat{\psi}, \\
\Delta\vartheta &= \Delta\hat{\vartheta}.
\end{aligned}$$

Признаком сохранения продольной осью X ВПО своей первоначальной ориентации (ψ_0, ϑ_0) является условие

$$\Delta\hat{\psi} \approx \Delta\hat{\vartheta} \approx 0. \quad (34)$$

Если условие (34) не выполняется, то используют алгоритмы автономной ориентации ВПО на основе формул (28)–(33).

Формирование функциональной избыточности информации, проявляемое на каждом полуобороте объекта и на каждом шаге вычислений в МСО за счет использования алгоритмов обработки комплексной информации, получаемой по магнитометрическому, акселерометрическому, тахометрическому и хронометрическому каналам измерений, способствует условиям обеспечения свойства самопроверяемости и отказоустойчивости каналов МСО, а также повышению показателей точности, надежности и долговечности бортовой системы и всего комплекса в целом.

Разработанные алгоритмы функционирования системы ориентации ВПО позволяют в дальнейшем решать задачи практической реализации этой системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белобрагин В. И., Зайцев В. Д., Распопов В. Я., Горин В. И., Горин А. А., Дмитриев В. А., Сорокин В. И., Ермолов С. П. Опыт разработки гироскопов для вращающихся по крену изделий // Материалы XII С.-Петербур. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2005. С. 183–194.
2. Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалауев Р. Р. Малогабаритная система ориентации // Датчики и системы. 2004. № 8. С. 2–5.
3. Пат. 2256881 Российская Федерация, МПК G01C21/16. Способ определения параметров ориентации и навигации и БИНС для быстровращающихся объектов / заявители Ачильдиев В. М., Мезенцев А. П., Решетников В. И., Сысоев И. В., Терешкин А. И. (RU) ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова». Заявл. 27.09.2004 ; опубл. 20.07.2005.
4. Калихман Д. М. Прецизионные управляемые стенды. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2008. 296 с.
5. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 280 с.
6. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н Красильникова, Г. Г Серебрякова. М. : Физматлит, 2005. 280 с.
7. Силкин А. А. Синтез и анализ алгоритмов определения пространственной ориентации беспилотной аэродинамической платформы по измерениям магнитного поля Земли : дис. ... канд. техн. наук. М., 2002. 80 с.
8. Пат. 2020111 Российская Федерация, МПК B64C13/18. Устройство для определения углового положения летательного аппарата по магнитному полю Земли / заявитель Военный инженерно-космический институт им. А. Ф. Можайского ; патентообладатели Гурьев И. С., Беляков Л. Г. ; заявл. 29.03.1991 ; опубл. 30.09.1994.

9. Царев И. В., Шило В. В. Разработка магнитометрического измерителя текущего положения ПЗРК // Материалы XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2005. С. 215–217.

10. 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, 2014. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и нанозлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 93–103.

11. Белоглазов И. Н., Джанджгаева Г. И., Чичин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. М. : Наука, 1985. 328 с.

12. Пат. 1822248 Российская Федерация, МПК G 01 C 17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А., Сауров В. Д. ; патентообладатель Конструкторское бюро промышленной автоматики. – № 4873869 ; заявл. 17.08.1990 ; опубл. 05.08.1993.

13. Пат. 1633930 Российская Федерация, МПК G 01 C 17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители Проскуряков Г. М., Сауров В. Д., Скрипкин А. А. ; патентообладатель Конструкторское бюро промышленной автоматики. – № 4722359 ; заявл. 24.07.1989 ; опубл. 27.09.1993.

14. Магнито-акселерометрические системы ориентации фирм США Honeywell, ST, Analog Device. URL : <http://www.honeywell.com>, www.st.com, www.analog.com (дата обращения : 15.10.2014).

15. Отечественные миниатюрные системы ориентации STA, STB для беспилотных летательных аппаратов. URL : <http://www.ruav.ru> (дата обращения : 15.10.2014).

УДК 531.38

АЛГОРИТМЫ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ УПРАВЛЯЕМОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ПОДВИЖНОМ ОБЪЕКТЕ

Г. М. Проскуряков*, А. А. Игнатъев, Т. А. Спиридонова, Д. М. Спиридонов

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

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

В статье представлены результаты разработки математического и алгоритмического обеспечения системы автономной ориентации мобильной платформы и автоматического наведения ее в режиме начальной выставки. Эти алгоритмы позволяют решать задачи калибровки метрологических характеристик трехосных блоков магнитометров и акселерометров, алгоритмической юстировки осей данных блоков и идентификации магнитных полей внутренних и внешних источников, а также служить исходным материалом для дальнейшей разработки программного обеспечения системы ориентации и управления платформой.

Ключевые слова: начальная выставка, калибровка, юстировка, идентификация, алгоритм, блок акселерометров, блок магнитометров, ориентация, магнитное поле и поле тяжести Земли.

Algorithms Initial Alignment Self Orientation Management Platform on Mobile Objects

G. M. Proskurjakov, A. A. Ignatiev, T. A. Spiridonova, D. M. Spiridonov

The article presents the results of mathematical and algorithmic support of autonomous orientation of the mobile platform and its automatic guidance to the initial exhibition. These algorithms are used to solve the problems of calibration of metrological characteristics of tri-axial accelerometers and magnetometers blocks, algorithmic adjustment axes of these units and identification of magnetic fields of internal and external sources, as well as serve as the starting material for the further development of the software system orientation and platform management.

Key words: initial alignment, calibration, alignment, identification algorithm, a block of accelerometers, magnetometers block, orientation, magnetic field and the Earth's gravitational field.

Космические технологии более чем за полувековой период своего развития прочно вошли в нашу повседневную жизнь и оказали существенное влияние на развитие ведущих отраслей практической деятельности человека (телевидение и связь, навигацию и ориентацию, наблюдения из космоса, контроль и мониторинг, военную и геологическую разведку, патрулирование и поиск и др.). Дальнейшее улучшение космических технологий и космической техники предполагает совершенствование и развитие сегментов комплексов как космических, так и наземных.

Одной из задач взаимодействия сегментов таких комплексов является обеспечение автономной ориентации и автоматического наведения наземных стационарных и мобильных платформ (антенн, оптических головок, сканирующих инфракрасных датчиков, актинометрической аппаратуры, лазерных измерителей и пр.) на удаленные в пространстве ориентиры (спутники, звезды, наземные и воздушные цели, приводные радиостанции).

Существующие в настоящее время методики и технологии решения этой проблемы имеют ряд ограничений и недостатков (низкая надежность и недостаточная точность, ограниченная отказоустойчивость и отсутствие автономности, низкий уровень повторяемости и воспроизводимости).

В настоящей статье предложены краткие теоретические основы работы геомагнитной системы ориентации и управления мобильной платформой в режиме автономного автоматического наведения ее на удаленный ориентир, в частности схемотехническое решение, математическое и алгоритмическое обеспечение (способы, принципы действия, модели, алгоритмы), а также технология выполнения работ по начальной выставке.

Предположим, что для сформулированной задачи выполняются следующие условия:

- магнитное поле Земли (МПЗ) и поле тяжести Земли (ПТЗ) являются стационарными;
- ориентация мобильной платформы и ее автоматическое наведение выполняются в режиме остановки носителя;

– магнитные помехи для трехосного блока магнитометров, обусловленные влиянием внутренних и внешних источников, носят постоянный стационарный характер;

– технологические погрешности сборки блоков магнитометров и акселерометров, а также погрешности монтажа модуля на носителе имеют стационарный характер.

Анализ показывает, что задача автономной ориентации носителя мобильной системы с помощью бесплатформенного измерительного модуля (БИМ) магнито-акселерометрического типа и последующего наведения платформы на удаленный ориентир с помощью автоматизированного электропривода является **многомерной, многосвязанной и многофакторной**.

Основная информация (магнито-навигационно-акселерометрическая) формируется с помощью модуля системы ориентации и управления платформой (БИМ), в состав которого входят три базовых блока: трехосный блок акселерометров (ТБА), трехосный блок магнитометров (ТБМ) и приемная аппаратура спутниковой навигационной системы (АП СНС). Математическая модель, описывающая формирование выходных сигналов базовых блоков БИМ, может быть представлена в виде системы векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^m &= B_m \cdot M \cdot [(S + E) \cdot A \cdot (\mathbf{T}_{МПЗ}^S + \mathbf{T}_{МПП}) + \mathbf{T}_{МПО}^П], \\ \mathbf{g}^m &= B_a \cdot M \cdot A \cdot (\mathbf{g}^S + \ddot{\mathbf{r}}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{АП} = [\varphi \ \lambda \ r]^T = \mathbf{r},$$

$$\mathbf{u}_m = \text{diag}(\gamma_x \ \gamma_y \ \gamma_z) \cdot \mathbf{T}^m + \Delta \mathbf{u}_m, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_a = \text{diag}(k_x \ k_y \ k_z) \cdot \mathbf{g}^m + \Delta \mathbf{u}_a, \quad (3)$$

где \mathbf{T}^m , \mathbf{g}^m – векторы напряженности нормальных полей МПЗ-Н и ПТЗ-Н, заданные в осях подвижного трехгранника $m = XYZ$, связанного с носителем (соответствуют показаниям ТБМ и ТБА); $\mathbf{x}_{АП}$ – показания (выходные сигналы) АП СНС; A – матрица ориентации носителя; M – матрица монтажа (установки) БИМ на носителе; B_m , B_a – матрицы сборки ТБМ и ТБА; S – матрица коэффициентов Пуассона для носителя; $\mathbf{T}_{МПЗ}^S$, \mathbf{g}^S – векторы напряженности МПЗ-Н и ПТЗ-Н, заданные в осях неподвижной системы координат $s = NHE$ (ГОСТ 20058-80); $\mathbf{T}_{МПО}^П$ – вектор напряженности постоянной составляющей магнитного поля объекта (носителя) в точке установки ТБМ; $\mathbf{T}_{МПП}$ – вектор напряженности магнитного поля внешних помех и аномалий (МПП) в точке установки ТБМ; $\ddot{\mathbf{r}}$ – переносная составляющая вектора напряженности ПТЗ; \mathbf{r} – радиус-вектор точки местоположения носителя с платформой; φ , λ , r – сферические координаты радиус-вектора \mathbf{r} (географическая широта, долгота и радиус); \mathbf{u}_m , \mathbf{u}_a – векторы аддитивных погрешностей ТБМ и ТБА (нулевых сигналов блоков); γ_x , γ_y , γ_z , k_x , k_y , k_z –

масштабные коэффициенты каналов измерений ТБМ и ТБА; $\Delta\gamma_x, \Delta\gamma_y, \Delta\gamma_z, \Delta k_x, \Delta k_y, \Delta k_z$ – мультипликативные погрешности ТБМ и ТБА (нестабильности масштабных коэффициентов блоков).

Уравнения (2) и (3) описывают метрологические характеристики ТБМ и ТБА соответственно. Причем

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^m &= [T_x \ T_y \ T_z]^T, & \mathbf{g}^m &= [g_x \ g_y \ g_z]^T, \\ \mathbf{u}_m &= [u_{xm} \ u_{ym} \ u_{zm}]^T, & \mathbf{u}_a &= [u_{xa} \ u_{ya} \ u_{za}]^T, \\ \mathbf{T}_{МПЗ}^S &= [T_N \ T_H \ T_E]^T, & \mathbf{T}_{МПП} &= [P_{\Pi} \ Q_{\Pi} \ R_{\Pi}]^T, \\ \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi} &= [P \ Q \ R]^T, & \mathbf{g}^S &= [g_N \ g_H \ 0]^T \approx [0 \ -g \ 0]^T, \end{aligned} \quad (4)$$

$$A = A_{\gamma} \cdot A_{\vartheta} \cdot A_{\psi} = [a_{ij}]_3^3, \quad (5)$$

$$S = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $A_{\gamma}, A_{\vartheta}, A_{\psi}$ – матрицы углов крена (γ), тангажа (ϑ) и курса (ψ); a_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы матрицы A ; a, b, \dots, h, k – коэффициенты Пуассона; E – единичная матрица.

Система ориентации и управления мобильной платформой работает в двух режимах:

- начальной выставки;
- ориентации и наведения платформы на удаленный ориентир.

В настоящей статье рассматривается задача математического и алгоритмического обеспечения работы системы ориентации и управления платформой в режиме **начальной выставки**.

В содержание подготовительной операции начальной выставки системы ориентации и управления платформой входит решение следующих задач:

- определение параметров нормального магнитного поля Земли (МПЗ-Н) в точке развертывания мобильного комплекса $\mathbf{T}_{МПЗ}^S$;
- определение параметров нормального поля тяжести Земли (ПТЗ-Н) в этой точке (\mathbf{g}^S);
- проведение лабораторной метрологической калибровки и юстировки БИМ ($\mathbf{u}_m, \mathbf{u}_a, B_m, B_a$);
- эталонная магнитная калибровка трехосного блока магнитометров (ТБМ) на носителе платформы ($S, \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}$);

- юстировка БИМ на носителе (M);
- идентификация на носителе внешних магнитных помех и аномалий магнитного поля для ТБМ $T_{МПЗ}$;
- приведение к немагнитному эталонному основанию и нормирование показаний БИМ (\tilde{T}, \tilde{g}) .

В основу предлагаемых в настоящей работе способов, алгоритмов и схем решения поставленных задач положен принцип формирования, использования и обработки комплексной многомерной многосвязной информации. Реализация этого принципа, в первую очередь, зависит от информационных и метрологических возможностей доступных средств измерений.

Параметры МПЗ-Н в точке наблюдения (в точке развертывания мобильного комплекса) с координатами (φ, λ, r) могут быть рассчитаны в проекциях на оси неподвижного трехгранника s по модели IGRF [1, 2].

На основе стандартной модели фигуры Земли в виде эллипсоида вращения (WGM-84 или ПС-90) можно вычислить северную g_N и вертикальную g_H составляющие вектора напряженности g^S ПТЗ-Н на оси неподвижного трехгранника s [3, 4].

Лабораторная метрологическая калибровка и юстировка блоков ТБМ и ТБА сводятся к определению параметров их метрологических характеристик (масштабных коэффициентов и нулевых сигналов), а также их технологических геометрических погрешностей сборки, обусловленных неортогональностью осей чувствительности.

В соответствии с выражениями (2) и (3) метрологические калибровки ТБМ и ТБА проводятся в лабораторных условиях путем измерения входных (T^m, g^m) и выходных (u_m, u_a) сигналов каналов измерений с использованием технологии поворотов блоков на эталонные углы относительно базовых плоскостей (магнитного меридиана и горизонта) и базовых направлений (на магнитный север и вертикаль). В результате выполнения операций метрологических калибровок БИМ становятся известными параметры метрологических характеристик (2) и (3) блоков.

Влияние технологических геометрических факторов, обусловленных углами неортогональностей осей чувствительности магнитометров и акселерометров на показания ТБМ (T^m, u_m) и ТБА (g^m, u_a) , учитывается с помощью матриц сборки и юстировки блоков. В соответствии со схемой, принятой при юстировке блоков для отсчета углов неортогональности $(\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z)$ осей чувствительных элементов, можно написать обобщенное линейное выражение для матрицы юстировки [5]:

$$B \approx \begin{bmatrix} 1 & \alpha_x & -\beta_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \beta_z & -\alpha_z & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Конкретные численные значения углов неортогональности ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$) как элементов матриц юстировки B_m и B_a носят строго индивидуальный характер для каждого блока (ТБМ и ТБА). Они должны быть введены в технические паспорта этих блоков наряду с параметрами метрологических характеристик.

После проведения в лабораторных условиях метрологической калибровки и юстировки блоков ТБМ и ТБА модуль БИМ может быть установлен на мобильный носитель. Однако любой носитель обладает собственными магнитными свойствами, характеризуемыми матрицей S и вектором $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi}$. Для проведения идентификации магнитных свойств носителя предположим, что проведена серия модельных экспериментов. В ходе выполнения таких экспериментов обеспечиваются измерения показаний ТБМ (\mathbf{T}_i^m) и ТБА (\mathbf{g}_i^m) для каждого i -го положения ($i = \overline{1, n}, n \geq 4$) носителя, фиксируемого при маневрировании объекта с регистрацией углов его пространственной эволюции ($\psi_i, \vartheta_i, \gamma_i$). Причем

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_i^m &= [T_{xi} \ T_{yi} \ T_{zi}]^T, \\ \mathbf{g}_i^m &= [g_{xi} \ g_{yi} \ g_{zi}]^T, \\ A_i &= A_{\gamma_i} \cdot A_{\vartheta_i} \cdot A_{\psi_i}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^S &= \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^H, \\ \mathbf{T}_{\text{МПП}} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

На этапе решения задачи идентификации магнитных свойств носителя (эталонной магнитной калибровки ТБМ) сначала пренебрежем влиянием погрешности монтажа ($\alpha \approx \beta \approx \sigma \approx 0$) на показания ТБМ, т. е. $M \approx E$. Тогда на основании уравнения Пуассона в системе (1) для каждого i -го эксперимента можно записать [5, 6]:

$$\mathbf{T}_i^m = B_{mi} [(S + E) \cdot A_i \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^H + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi}], \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq 4. \quad (11)$$

С учетом соотношений (9) и (10) на основе систем уравнений (11) сформируем расширенную линейную систему уравнений $3n$ -степени, которую запишем в компактной векторно-матричной форме [6]:

$$\mathbf{x} = N \cdot \mathbf{y}, \quad (12)$$

где \mathbf{x} – вектор входной информации, формируемой на основе показаний ТБМ; N – матрица идентификации (12×12); \mathbf{y} – вектор выходной информации (вектор идентифицируемых параметров). Причем

$$\mathbf{x} = [\tilde{T}_{x1} \ \tilde{T}_{x2} \ \tilde{T}_{x3} \ \tilde{T}_{x4} \ \tilde{T}_{y1} \ \tilde{T}_{y2} \ \tilde{T}_{y3} \ \tilde{T}_{xy4} \ \tilde{T}_{z1} \ \tilde{T}_{z2} \ \tilde{T}_{z3} \ \tilde{T}_{xz4}]^T, \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = [(a+1) \ b \ c \ P \ d \ (e+1) \ f \ Q \ g \ h \ (k+1) \ R]^T. \quad (14)$$

Решение векторно-матричного уравнения идентификации (12) позволяет сформировать в общем виде алгоритмы магнитной идентификации параметров носителя [6]:

$$\mathbf{y} = N^{-1} \cdot \mathbf{x}. \quad (15)$$

Для того чтобы решение уравнения (15) существовало и было единственным и устойчивым, необходимо, чтобы матрица N была несингулярной:

$$\det N \neq 0, \quad (16)$$

$$\text{cond } N = \|N\| \cdot \|N^{-1}\| \rightarrow \min. \quad (17)$$

На этапе объектовой юстировки БИМ с учетом выполненной лабораторной юстировки блоков можно привести к редуцированному виду первые два уравнения системы (1), соответствующему условию приведения показаний блоков ТБМ и ТБА к ортогональному неискаженному приборному базису:

$$\begin{aligned} M \cdot [(S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^S + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}] &= \tilde{\mathbf{T}} = B_M^{-1} \cdot \mathbf{T}^m, \\ M \cdot A \cdot \mathbf{g}^S &= \tilde{\mathbf{g}} = B_a^{-1} \cdot \mathbf{g}^m. \end{aligned} \quad (18)$$

После установки (монтажа) БИМ на носителе на его показания будут оказывать влияние не только магнитные поля самого носителя, но и погрешности установки модуля на носителе. Эти погрешности носят геометрический стационарный характер и могут быть учтены с помощью матрицы монтажа M , элементы которой формируются в соответствии с принятой схемой Эйлера–Крылова [7]. С учетом малости погрешностей монтажа (α , β , σ) матрица M может быть линеаризована и приведена к диагональному кососимметричному виду [5, 7, 8]:

$$M \approx \begin{bmatrix} 1 & \beta & -\alpha \\ -\beta & 1 & \sigma \\ \alpha & -\sigma & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_0 &= (S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^S + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}} = [T_{x0} \ T_{y0} \ T_{z0}]^T, \\ \mathbf{g}_0 &= A \cdot \mathbf{g}_S = [g_{x0} \ g_{y0} \ g_{z0}]^T, \end{aligned} \quad (20)$$

то систему уравнений (18) можно привести к развернутому виду векторно-матричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} -T_{z0} & T_{y0} & 0 \\ 0 & -T_{x0} & T_{z0} \\ -T_{x0} & 0 & -T_{y0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_x - T_{x0} \\ \tilde{T}_y - T_{y0} \\ \tilde{T}_z - T_{z0} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} -g_{z0} & g_{y0} & 0 \\ 0 & -g_{x0} & g_{z0} \\ -g_{x0} & 0 & -g_{y0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{g}_x - g_{x0} \\ \tilde{g}_y - g_{y0} \\ \tilde{g}_z - g_{z0} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

На основе использования систем уравнений (21) и (22) можно путем комбинирования разнородных по физическому виду уравнений, полученных из векторно-матричных уравнений (21) и (22), сформировать $C_6^3 - 2 = 18$ вариантов решений задачи юстировки модуля БИМ на носителе. Этот факт создает условия функциональной избыточности информации, получаемой с помощью блоков ТБМ и ТБА, при решении задачи юстировки БИМ. Все многообразие 18 вариантов систем уравнений можно записать в следующем обобщенном виде:

$$\mathbf{x}_{ijk} = N_{ijk} \cdot \mathbf{y}_1 \quad (i, j, k = \overline{1,6}; i \neq j \neq k), \quad (23)$$

$$\mathbf{y}_1 = [\alpha \ \beta \ \sigma]^T. \quad (24)$$

Формирование матрицы N_{ijk} (3×3) и вектора \mathbf{x}_{ijk} зависит от выбора конкретных уравнений. При использовании БИМ, установленного на носителе в реальных условиях, будет наблюдаться влияние на показания ТБМ результирующего магнитного поля внешних помех и аномалий, учитываемых вектором $\mathbf{T}_{\text{МПП}}$. В этом случае показания ТБМ будут описываться с помощью уравнения Пуассона, записанного в более полной форме (1). Решение этого уравнения относительно неизвестного вектора $\mathbf{T}_{\text{МПП}}$ приводит к алгоритму идентификации на носителе результирующего магнитного поля всех помех и аномалий в точке установки ТБМ:

$$\mathbf{T}_{\text{МПП}} = [P_{\Pi} \ Q_{\Pi} \ R_{\Pi}]^T = A^T \cdot (S + E)^{-1} \cdot (M^{-1} \cdot B_M^{-1} \cdot \mathbf{T}^m - \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi}) - \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{H}}. \quad (25)$$

При решении задач калибровки и юстировки блоков ТБА и ТБМ и идентификации магнитных помех предполагалось, что матрица ориентации A известна. Для упрощения технологии определения направляющих косинусов a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) матрицы A может быть предложен достаточно точный и вместе с тем простой для практической реализации метод **аналитического горизонт-компасирования** (АГК) основания, предполагающий решение общей задачи пространственной ориентации в два этапа:

- аналитическое горизонтирование (АГ);
- аналитическое компасирование (АК).

Алгоритм АГ основан на обработке акселерометрической информации, получаемой от ТБА:

$$\mathbf{g}^m = [g_x \ g_y \ g_z]^T = A \cdot \mathbf{g}^S \approx A \cdot [0 \ -g \ 0]^T. \quad (26)$$

Из решения уравнения (26) находим алгоритм АГ:

$$\begin{aligned} \sin \vartheta &= a_{12} = -g_x / g, \\ \cos \vartheta &= (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{1/2} = ((g_y^2 + g_z^2) / g^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= -a_{32} / \cos \vartheta = -g_z / g \cdot \cos \vartheta, \\ \cos \gamma &= a_{22} / \cos \vartheta = g_y / g \cdot \cos \vartheta. \end{aligned} \quad (28)$$

Алгоритм АК основан на обработке навигационно-геодезической информации, получаемой с помощью спутникового навигатора, о координатах двух удаленных друг от друга точек на поверхности Земли. Истинный (географический) курс ψ линии визирования, проведенной из точки наблюдения с координатами (φ_1, λ_1) в точку расположения удаленного ориентира с координатами (φ_2, λ_2) , может быть определен по алгоритму решения обратной задачи геодезии [4]:

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \frac{\sin(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \cos \varphi_1}{((\varphi_2 - \varphi_1)^2 + (\lambda_2 - \lambda_1)^2 \cdot \cos^2 \varphi_1)^{1/2}}, \\ \cos \psi &= \left(\frac{\sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}{(\varphi_2 - \varphi_1)^2 + (\lambda_2 - \lambda_1)^2 \cdot \cos^2 \varphi_1} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (29)$$

Раскрывая произведение матриц (5), получим выражения для направляющих косинусов a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) матрицы ориентации A носителя:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \vartheta \cdot \cos \psi, \\ a_{12} &= \sin \vartheta, \\ a_{13} &= -\cos \vartheta \cdot \sin \psi, \\ a_{21} &= \sin \psi \cdot \sin \gamma - \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma, \\ a_{22} &= \cos \vartheta \cdot \cos \gamma, \\ a_{23} &= \cos \psi \cdot \sin \gamma + \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma, \\ a_{31} &= \sin \psi \cdot \cos \gamma + \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \gamma, \\ a_{32} &= -\cos \vartheta \cdot \sin \gamma, \\ a_{33} &= \cos \psi \cdot \cos \gamma - \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \gamma. \end{aligned} \quad (30)$$

Направляющие косинусы a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) должны удовлетворять условиям коллинеарности и ортогональности базовых осей, а также условиям связанности, несингулярности и нормированности матрицы ориентации A (алгоритмы контроля и нормировки направляющих косинусов).

После решения задач, определяющих содержание начальной выставки носителя, мобильной платформы и их системы ориентации, становятся известными параметры, векторы и матрицы ($\mathbf{T}_{МПЗ}^H$, \mathbf{g}_N , \mathbf{g}_H , $\mathbf{T}_{МПП}$, $\mathbf{T}_{МПО}^П$, S , B_M , B_a , M), используемые в математической модели модуля позиционирования (1). С учетом этого факта показания ТБМ и ТБА можно привести к эквивалентному немагнитному основанию с ортогональными базовыми осями связанной системы координат:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{T}} &= (S + E)^{-1} \cdot M^{-1} \cdot B_M^{-1} \cdot (\mathbf{T}^m - \mathbf{T}_{МПО}^П), \\ \hat{\mathbf{g}} &= M^{-1} \cdot B_a^{-1} \cdot \mathbf{g}^m.\end{aligned}\quad (31)$$

Тогда показания БИМ можно описать укороченной системой векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned}A \cdot (\mathbf{T}_{МПЗ}^H + \mathbf{T}_{МПП}) &= \hat{\mathbf{T}}, \\ A \cdot \mathbf{g}^S &= \hat{\mathbf{g}}.\end{aligned}\quad (32)$$

Разработанные алгоритмы начальной выставки системы ориентации мобильной платформы могут быть использованы в дальнейшем для проверки их работоспособности методами математического моделирования и натуральных испытаний, а также для разработки штатных программ функционирования системы ориентации платформы и наведения ее на удаленный ориентир.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Geomagnetic Reference Field IGRF WMM-2014. URL : <http://www.ngdc.noaa.gov.com> (дата обращения : 26.11.2014).
2. ГОСТ 25645.126-85 Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. URL : <http://www.gostinform.ru> (дата обращения : 26.11.2014).
3. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. М. : Машиностроение, 1991. 512 с.
4. Дмитриев С. П. Высокоточная морская навигация. СПб. : Судостроение, 1991. 224 с.
5. Игнатьев 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, 2015. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–130
6. Пат. 1822248 Российская Федерация, А2, МПК G01 C17/38. Способ определения курсоуказания подвижного объекта / заявители Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А., Саюров В. Д. ; патентообладатель Конструкторское бюро промавтоматики. – № 4873869 ; заявл. 17.08.1990 ; опубл. 05.08.1993.

7. *Проскуряков Г. М., Плотников П. К.* Геометрия и кинематика пространственного состояния подвижных объектов : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 2008. 156 с.

8. *Стражева И. В., Мелкумов В. С.* Векторно-матричные методы в механике полета. М. : Машиностроение, 1973. 260 с.

УДК 531.38

РАБОЧИЕ АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ УПРАВЛЯЕМОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ПОДВИЖНОМ ОБЪЕКТЕ

Г. М. Проскуряков*, А. А. Маслов, А. А. Игнатъев

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: kof@sgu.ru

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

В статье приведены алгоритмы функционирования системы позиционирования мобильной платформы в режиме автономной ориентации и автономного наведения на удаленный ориентир. На основе аналитической механики, теории графов и матричного аппарата получены соотношения, характеризующие ориентацию платформы относительно неподвижного и мобильного трехгранников, а также алгоритмы автономного автоматического управления платформой.

Полученные алгоритмы могут быть положены в основу дальнейших исследований, а также разработок схмотехнических решений и программного обеспечения бортовой системы ориентации.

Ключевые слова: ориентация, позиционирование, управление, платформа, носитель, ориентир, матрица, трехгранник, направляющий косинус.

Working Algorithms of Controlled Platform self Orientation on Mobile Objects

G. M. Proskuryakov, A. A. Maslov, A. A. Ignatiev

The article says, operating algorithms of mobile platform positioning system in autonomous orientation and autonomous guidance mode to a remote reference point are developed. Based on the principles of analytical mechanics, graph theory and matrix unit, the basic relationships received that characterize the orientation of the platform relative to the fixed and mobile trihedrons, as well as algorithms for autonomous automatic control of the platform.

The resulting algorithms can be the basis of further research and development circuit solutions and software onboard attitude control system.

Key words: orientation, positioning, control, platform, reference point, satellites, matrix, trihedron, direction cosines.

Проблема автономной ориентации мобильной платформы и ее автоматического наведения на удаленный ориентир часто возникает в различных практических областях, связанных с использованием космических технологий.

В настоящей статье представлены результаты разработки математического и алгоритмического обеспечения работы системы автономной ориентации, предназначенной для автоматического наведения мобильной платформы на удаленный ориентир (звезду, спутник, воздушную или наземную цель и пр.). Содержание проблемы ориентации-наведения платформы на удаленный ориентир представлено в виде схемы взаимодействия (графа) девяти основных задач на рис. 1. С теоретической точки зрения эта проблема сводится к оценке относительного углового положения и согласования отсчетных систем координат [1, 2].

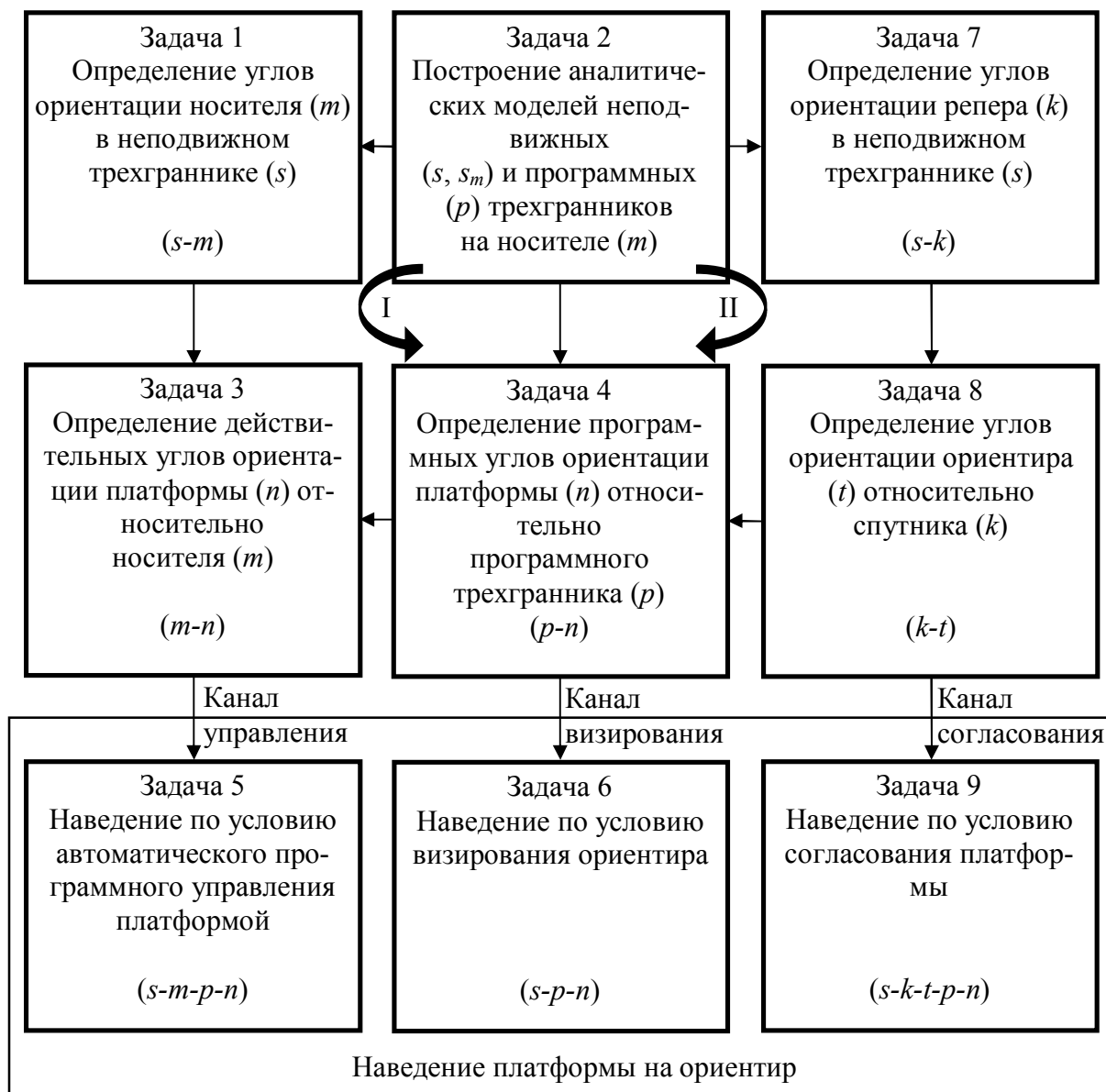


Рис. 1. Схема соотношений задач автономной ориентации и наведения платформы

Введем в рассмотрение следующие отсчетные системы координат (трехгранники):

s – неподвижная географическая система координат NHE , неподвижный стационарный географический трехгранник (ГОСТ 20058-80);

s_m – неподвижная геомагнитная система координат N_mHE_m , неподвижный стационарный геомагнитный трехгранник;

p – промежуточная система координат $X_pY_pZ_p$, программный трехгранник;

m – подвижная система координат $X_nY_nZ_n$, связанная с носителем, мобильный трехгранник;

n – подвижная система координат XYZ , связанная с платформой, платформенный трехгранник;

k – подвижная система координат $X_kY_kZ_k$, связанная с репером, реперный трехгранник;

t – подвижная система координат $X_tY_tZ_t$, связанная со взаимодействующей платформой, активный трехгранник.

Схема геометрического и кинематического взаимодействия между собой введенных трехгранников (граф систем координат) представлена на рис. 2.

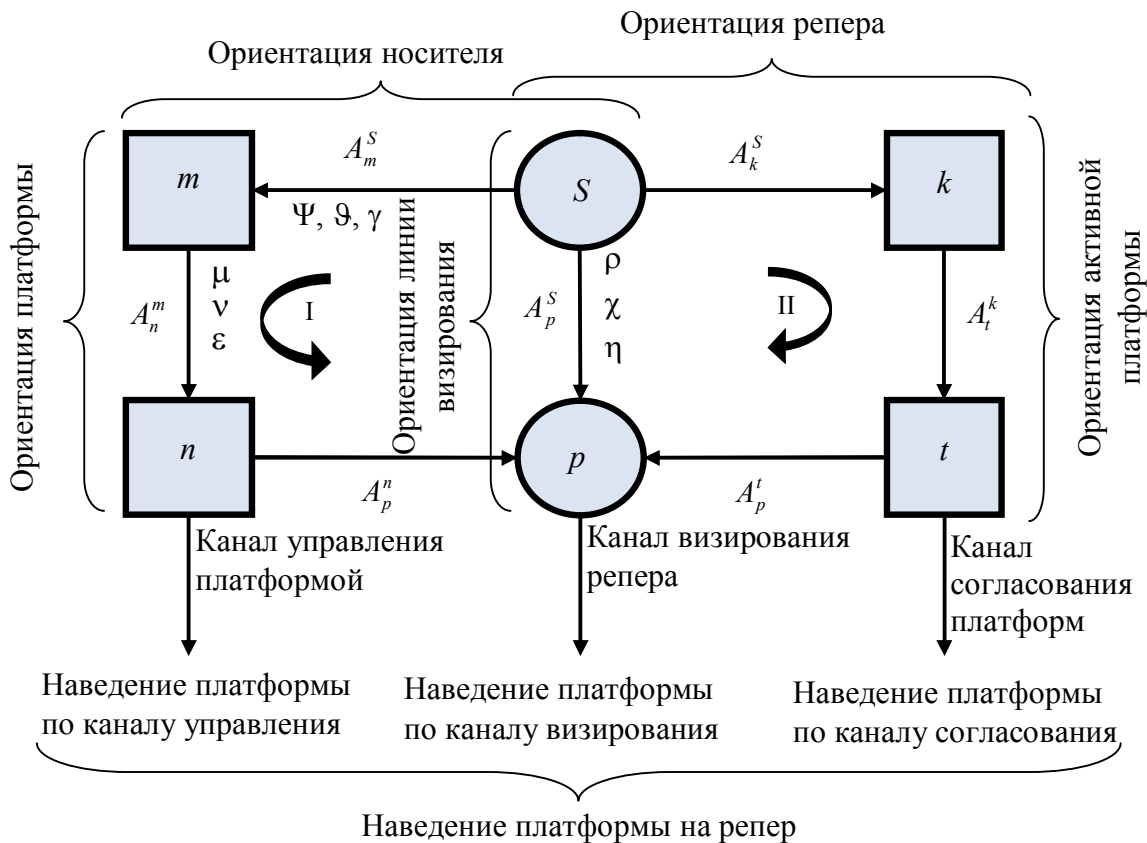


Рис. 2. Граф систем координат

С точки зрения аналитической механики общая проблема ориентации-наведения платформы на репер и ее составные части могут быть сформулированы как задача Эйлера–Лагранжа (задача ориентации в пространстве твердого тела с одной неподвижной точкой). Для математического описания (формализации) сформулированной проблемы «носитель–платформа–репер» воспользуемся векторно-матричным аппаратом преоб-

разования систем координат (трехгранников). В соответствии с этим подходом на основании графа трехгранников (см. рис. 2) можно написать для контуров I и II следующие матричные уравнения [1]:

–для контура I

$$A_p^S = A_p^n \cdot A_n^m \cdot A_m^S, \quad (1)$$

–для контура II

$$A_p^S = A_p^t \cdot A_t^k \cdot A_k^S, \quad (2)$$

где $A_p^S, A_m^S, A_n^m, A_p^n, A_k^S, A_t^k, A_p^t$ – матрицы преобразования координат из одних трехгранников (обозначенных верхними индексами) в другие (обозначенные нижними индексами).

Решение задачи автономной ориентации платформы и автоматического наведения ее на репер предполагает использование в составе системы ориентации бесплатформенного измерительного модуля (БИМ) магнитоакселерометрического типа, включающего в свой состав трехосные блоки акселерометров (ТБА), магнитометров (ТБМ) и приемную аппаратуру спутниковой навигационной системы (АП СНС).

Предположим, что для БИМ выполнен весь цикл начальной выставки системы ориентации, в результате которого обеспечена калибровка метрологических характеристик ТБА и ТБМ и аналитическая юстировка базовых осей блоков, а также проведена идентификация магнитных полей внешних и внутренних источников помех [2].

При переходе системы ориентации платформы к выполнению основного рабочего режима автоматического наведения ее на репер, прежде всего, возникает задача 1 (см. рис. 1) – определение углов ориентации мобильного трехгранника m относительно неподвижного трехгранника s . Для решения этой задачи предлагается использовать метод **аналитического горизонт-компасирования** (АГК), который объединяет два метода: аналитическое горизонтирование (АГ) и аналитическое компасирование (АК).

Алгоритмы АГ системы связаны с обработкой автономной акселерометрической информации [2]. Алгоритмы АК – с обработкой автономной магнитометрической информации, получаемой от ТБМ, они могут быть реализованы двумя способами [3]: девиационным и бездевиационным.

Девиационные алгоритмы АК предполагают не только приведение показаний ТБМ $\mathbf{T}^m = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ к немагнитному основанию с ортогональными базовыми осями $\tilde{\mathbf{T}} = [\tilde{T}_x \ \tilde{T}_y \ \tilde{T}_z]^T$ [2], но и приведение вектора $\tilde{\mathbf{T}}$ к горизонтальному основанию [3]. На основании результатов приведения показаний ТБМ к горизонтальному немагнитному основанию можно написать:

$$\begin{aligned}
T_{Nm} &= (\lambda_1 + B_1 \cos(\Phi) - C_1 \sin(\Phi) + D_1 \cos(2\Phi) - E_1 \sin(2\Phi)) \cdot T_r, \\
T_H &= (F_1 + G_1 \cos(\Phi) + H_1 \sin(\Phi)) \cdot T_r, \\
T_{Em} &= (A_1 + B_1 \sin(\Phi) + C_1 \cos(\Phi) + D_1 \sin(2\Phi) + E_1 \cos(2\Phi)) \cdot T_r,
\end{aligned} \tag{3}$$

где T_{Nm} , T_H , T_{Em} – проекции на оси геомагнитной горизонтальной системы координат вектора приведенных показаний ТБМ; λ_1 – коэффициент направляющей магнитной силы МПЗ; $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1$ – коэффициенты девиаций; Φ – магнитный курс носителя; T_r – горизонтальная составляющая вектора МПЗ.

С учетом приведения показаний ТБМ к горизонтальному немагнитному основанию можно написать [3]:

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= 1 + 0,5[a \cos^2(\vartheta) + k(\sin^2(\vartheta) \cos^2(\gamma) + \sin^2(\gamma)) + e(\sin^2(\vartheta) \sin^2(\gamma) + \cos^2(\gamma))] + \\
&\quad + 0,25[(b+d) \sin(\gamma) - (c+g) \cos(\gamma)] \sin(2\vartheta) + (h+f) \sin(2\gamma) \cos^2(\gamma), \\
A_1 &= 0,5[(h-f) \sin(\vartheta) - ((c-g) \sin(\gamma) + (b+d) \cos(\gamma)) \cos(\vartheta)], \\
B_1 &= [0,5(a - k \cos^2(\gamma) - e \sin^2(\gamma) + 0,5(h+f) \sin(2\gamma)) \sin(2\vartheta) + \\
&\quad + (c \cos^2(\vartheta) - g \sin^2(\vartheta)) \cos(\gamma) - (b \cos^2(\vartheta) - d \sin^2(\vartheta) \sin(\gamma))] \operatorname{tg}(J_m) + \\
&\quad + [P \cos(\vartheta) - (R \cos(\gamma) - Q \sin(\gamma)) \sin(\vartheta)] / T_r, \\
C_1 &= [(d \cos(\gamma) + g \sin(\gamma)) \sin(\vartheta) + (f \cos^2(\gamma) - h \sin^2(\gamma)) \cos(\vartheta) + \\
&\quad + 0,5(k - e) \cos(\vartheta) \sin(2\gamma)] \operatorname{tg}(J_m) + (R \sin(\gamma) + Q \cos(\gamma)) / T_r, \\
D_1 &= 0,5[a \cos^2(\vartheta) + k(\sin^2(\vartheta) \cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma)) + e(\sin^2(\vartheta) \sin^2(\gamma) - \cos^2(\gamma))] + \\
&\quad + 0,25[(b+d) \sin(\gamma) - (c-g) \cos(\gamma)] \sin(2\vartheta) - (h+f)(1 + \sin^2(\vartheta)) \sin(2\gamma), \\
E_1 &= 0,5[((e-k) \sin(2\gamma) - (h+f) \cos(2\gamma) \sin(\vartheta)) + ((c+g) \sin(\gamma) + (b+d) \cos(\gamma)) \cos(\vartheta)],
\end{aligned} \tag{4}$$

где $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ – коэффициенты Пуассона; γ, ϑ – углы крена и тангажа (дифферента) носителя; J_m – угол магнитного наклона МПЗ.

Истинный курс вычисляется по формуле

$$\psi = \Phi + D_m - \delta, \tag{5}$$

где D_m – магнитное склонение в точке установки ТБМ; δ – поправка на девиацию ТБМ.

Поправка на девиацию – по формуле

$$\delta = \operatorname{arctg}\left(\frac{T_{Em}}{T_{Nm}}\right) \approx (A_1 + B_1 \sin(\Phi) + C_1 \cos(\Phi) + D_1 \sin(2\Phi) + E_1 \cos(2\Phi)) / \lambda_1. \tag{6}$$

Если в выражениях (4) положить $\vartheta \approx \gamma \approx 0$ (условие квазигоризонтальности основания), то получим упрощенные формулы, используемые в настоящее время в магнитно-компасном деле в связи с выполнением девиационных работ [5]:

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= 1 + 0,5(a + e), & C_1 &= (fT_g + Q)/T_\Gamma, \\
A_1 &= 0,5(d - b), & D_1 &= 0,5(a - e), \\
B_1 &= (cT_g +)/T_\Gamma, & E_1 &= 0,5(d + b),
\end{aligned}
\tag{7}$$

где T_v – вертикальная составляющая вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$.

Формулы (7) получены полтора века назад английским ученым А. Смитом. Многие ученые XX века (И. П. Колонг, А. Н. Крылов и др.) совершенствовали двумерную теорию магнитных измерений и довели её до нашего времени [4, 5].

Алгоритмы АК, основанные на соотношениях (3)–(6) или (7), могут быть использованы для разработки программного обеспечения **девиационного цифрового магнитного компаса** [6, 7]. Объединение алгоритмов девиационного АК и АГ позволяет сформировать девиационные алгоритмы АГК, которые могут быть положены в основу разработки программного обеспечения **девиационной цифровой магнитоакселерометрической курсовертикали** на базе использования БИМ.

Бездевиационные алгоритмы АГК предполагают совместную обработку в микроконтроллере комплексной (магнитоакселерометрической) информации, получаемой от ТБМ и ТБА. После проведения всего цикла калибровок, юстировок и идентификации магнитных полей показания блоков ТБМ и ТБА можно привести к немагнитному основанию с ортогональными приборными осями [2]:

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{T}} &= (S + E)^{-1} M^{-1} B_m^{-1} (\mathbf{T}^m - \mathbf{T}_{МПО}^\Pi), \\
\tilde{\mathbf{g}} &= M^{-1} B_a^{-1} \mathbf{g}^m,
\end{aligned}
\tag{8}$$

где $\tilde{\mathbf{T}}, \tilde{\mathbf{g}}$ – оценки векторов напряженностей результирующего магнитного поля и поля тяжести, измеренные ТБМ и ТБА и приведенные к эталонному основанию; S – матрица (3×3) коэффициентов Пуассона; E – единичная матрица (3×3); B_m, B_a, M – матрицы сборки-юстировки и монтажа ТБМ и ТБА; $\mathbf{T}^m, \mathbf{g}^m$ – первичные показания блоков, отнесенные к трехграннику m ; $\mathbf{T}_{МПО}^\Pi$ – вектор постоянной составляющей напряженности магнитного поля основания (МПО);

Тогда показания БИМ можно описать с помощью системы приведенных векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned}
A \cdot (\mathbf{T}_{МПЗ}^H + \mathbf{T}_{МПП}) &= \tilde{\mathbf{T}}, \\
A \cdot \mathbf{g}^S &= \tilde{\mathbf{g}},
\end{aligned}
\tag{9}$$

где A – матрица ориентации носителя; $\mathbf{T}_{МПЗ}^H, \mathbf{T}_{МПП}$ – векторы напряженности нормального магнитного поля Земли (МПЗ) и магнитного поля помех (МПП). Причем

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_3^3 = A_m^s, \quad (10)$$

где A_γ , A_ϑ , A_ψ – матрицы углов крена, тангажа и курса; a_{ij} – элементы матрицы A (направляющие косинусы).

Решая систему уравнений (9) с учетом ее расширения, получим **бездевиационный алгоритм АГК** на основе магнитоакселерометрической информации [2, 8]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= (T_{xg} F_{gT}^{xyg} - T_{zg} F_{gT}^{yz}) / D, \\ a_{12} &= -\tilde{g}_x / g, \\ a_{13} &= (T_{xg} F_{gT}^{xyg} + T_{zg} F_{gT}^{yz}) / D, \\ a_{21} &= (T_{xg} F_{gT}^{yyg} - T_{zg} F_{gT}^{zx}) / D, \\ a_{22} &= -\tilde{g}_y / g, \\ a_{23} &= (T_{zg} F_{gT}^{yyg} + T_{xg} F_{gT}^{zx}) / D, \\ a_{31} &= (T_{xg} F_{gT}^{zyg} - T_{zg} F_{gT}^{xy}) / D, \\ a_{32} &= -\tilde{g}_z / g, \\ a_{33} &= (T_{zg} F_{gT}^{zyg} + T_{xg} F_{gT}^{xy}) / D, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} F_{gT}^{xyg} &= \tilde{g}_x \tilde{T}_{yg} + g \tilde{T}_x, \\ F_{gT}^{yz} &= \tilde{g}_y \tilde{T}_z - \tilde{g}_z \tilde{T}_y, \\ F_{gT}^{yyg} &= \tilde{g}_y \tilde{T}_{yg} + g \tilde{T}_y, \\ F_{gT}^{zx} &= \tilde{g}_z \tilde{T}_x - \tilde{g}_x \tilde{T}_z, \\ F_{gT}^{zy} &= \tilde{g}_z \tilde{T}_y - \tilde{g}_y \tilde{T}_x, \\ F_{gT}^{zyg} &= \tilde{g}_z \tilde{T}_{yg} + g \tilde{T}_z, \\ F_{gT}^{xy} &= \tilde{g}_x \tilde{T}_y - \tilde{g}_y \tilde{T}_x, \\ D &= g T_\Gamma^2 = g(T_{xg}^2 + T_{zg}^2). \end{aligned} \quad (12)$$

Направляющие косинусы a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) должны удовлетворять условиям коллинеарности и ортогональности соответствующих осей, а также условиям связанности, невырожденности и нормированности матрицы ориентации (алгоритмы контроля и нормировки направляющих косинусов).

Бездевиационные алгоритмы АГК позволяют вычислить функции синусов и косинусов углов ориентации носителя (ψ , ϑ , γ) в этом режиме через направляющие косинусы a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) в условиях функциональной избыточности информации:

– для канала тангажа

$$\begin{aligned} \sin(\vartheta) &= a_{12}, \\ \cos(\vartheta_1) &= \sqrt{(a_{11}^2 + a_{13}^2)}, \\ \cos(\vartheta_2) &= \sqrt{(a_{22}^2 + a_{32}^2)}, \end{aligned} \quad (13)$$

– для канала курса

$$\begin{aligned}\sin(\psi) &= a_{13}/\cos(\vartheta_1) = a_{13}/\cos(\vartheta_2), \\ \cos(\psi) &= a_{11}/\cos(\vartheta_1) = a_{11}/\cos(\vartheta_2),\end{aligned}\quad (14)$$

– для канала крена

$$\begin{aligned}\sin(\gamma) &= -a_{32}/\cos(\vartheta_1) = -a_{32}/\cos(\vartheta_2), \\ \cos(\gamma) &= a_{22}/\cos(\vartheta_1) = a_{22}/\cos(\vartheta_2), \\ \cos(\gamma) &= (a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1)/2.\end{aligned}\quad (15)$$

Бездевиационные алгоритмы АГК могут быть положены в основу разработки программного обеспечения **бездевиационной цифровой магнитоакселерометрической курсовертикали**.

Контроль правильности выполнения вычислений по формулам (13)–(15) проводится по алгоритму контроля и нормировки тригонометрических функций.

Матрица преобразования координат, соответствующая переходу $s-p$ (см. рис. 2), равна:

$$A_p^s = A_\eta A_\chi A_\rho = C,$$

$$C = \begin{bmatrix} \cos(\rho)\cos(\chi) & \sin(\chi) & -\sin(\rho)\cos(\chi) \\ -\cos(\eta)\sin(\chi)\cos(\rho) + \sin(\eta)\sin(\rho) & \cos(\chi)\cos(\eta) & \cos(\eta)\sin(\rho)\sin(\chi) + \sin(\eta)\cos(\rho) \\ \sin(\eta)\sin(\chi)\cos(\rho) + \cos(\eta)\sin(\rho) & -\sin(\eta)\cos(\chi) & -\sin(\eta)\sin(\rho)\sin(\chi) + \cos(\eta)\cos(\rho) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$C = [c_{ij}]_3^3.$$

где c_{ij} – элементы матрицы C ; A_η , A_χ , A_ρ – матрицы углов ориентации η , χ , ρ трехгранника p относительно трехгранника s .

Условием точного автономного наведения платформы (трехгранник n) на репер (трехгранник k) является равенство

$$A_p^n = E, \quad (17)$$

т. е. условие совпадения трехгранников n и p ($n \rightarrow p$).

Если углы ориентации платформенного трехгранника $n = XYZ$ относительно мобильного трехгранника $m = X_H Y_H Z_H$, связанного с носителем, измеряются с помощью датчиков углов, входящих в состав электроприводов платформы, то для матрицы A_n^m можно написать:

$$A_n^m = A_\varepsilon A_\nu A_\mu = B,$$

$$B = \begin{bmatrix} \cos(\nu) \cos(\mu) & \sin(\nu) & \sin(\mu) \cos(\nu) \\ -\sin(\varepsilon) \sin(\mu) - \\ -\cos(\mu) \sin(\nu) \cos(\varepsilon) & \cos(\nu) \cos(\varepsilon) & \cos(\mu) \sin(\varepsilon) - \\ -\sin(\mu) \cos(\varepsilon) + & -\cos(\nu) \sin(\varepsilon) & \cos(\mu) \cos(\varepsilon) + \\ +\cos(\mu) \sin(\nu) \sin(\varepsilon) & & +\sin(\mu) \sin(\nu) \sin(\varepsilon) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$B = [b_{ij}]_3^3,$$

где $A_\varepsilon, A_\nu, A_\mu$ – матрицы углов ε, ν, μ программного разворота платформы, соответствующие азимутальному, вертикальному каналам электропривода и каналу вращения платформы по условию согласования; b_{ij} – элементы матрицы B .

В соответствии с выражением (11) направляющие косинусы матрицы ориентации носителя $A = A_p^s$ можно рассчитать по формулам [1, 2, 8]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos(\vartheta) \cos(\psi), \\ a_{12} &= \sin(\vartheta), \\ a_{13} &= -\cos(\vartheta) \sin(\psi), \\ a_{21} &= \sin(\psi) \sin(\gamma) - \cos(\psi) \cos(\vartheta) \cos(\gamma), \\ a_{22} &= \cos(\vartheta) \cos(\gamma), \\ a_{23} &= \cos(\psi) \sin(\gamma) + \sin(\psi) \sin(\vartheta) \cos(\gamma), \\ a_{31} &= \sin(\psi) \cos(\gamma) + \cos(\psi) \sin(\vartheta) \sin(\gamma), \\ a_{32} &= -\cos(\vartheta) \sin(\gamma), \\ a_{33} &= \cos(\psi) \cos(\gamma) - \sin(\psi) \sin(\vartheta) \sin(\gamma). \end{aligned} \quad (19)$$

Следует иметь в виду, что в основу преобразований трехгранников $s \rightarrow p, s \rightarrow m$ и $m \rightarrow n$ (см. рис. 2) положена схема Эйлера–Крылова для последовательных поворотов основания [1]. Раскрывая матричное уравнение (1) для контура I графа систем координат (см. рис. 2) с учетом соотношений (16)–(18) и в предположении выполнения настройки платформы на условия (16) точного визирования репера, получим выражения для программных направляющих косинусов матрицы $A_n^m = B = [b_{i,j}]_3^3$ через направляющие косинусы $a_{ij}, c_{i,j} (i, j = \overline{1,3})$ матриц A и C :

$$B = C \cdot A^T = C \cdot A^{-1}. \quad (20)$$

Или в развернутой матричной форме:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Углы μ , ν , ε программного управления платформой относительно корпуса носителя могут быть найдены через направляющие косинусы b_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) с использованием выражений:

– для канала вертикального управления

$$\begin{aligned} \sin(\nu) &= b_{12}, \\ \cos(\nu_1) &= \sqrt{(b_{11}^2 + b_{13}^2)}, \\ \cos(\nu_2) &= \sqrt{(b_{22}^2 + b_{32}^2)}, \end{aligned} \quad (22)$$

– для канала азимутального управления

$$\begin{aligned} \sin(\mu) &= b_{13}/\cos(\nu_1) = b_{13}/\cos(\nu_2), \\ \cos(\mu) &= b_{11}/\cos(\nu_1) = b_{11}/\cos(\nu_2), \end{aligned} \quad (23)$$

– для канала вращения платформы

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon) &= -b_{32}/\cos(\nu_1) = -b_{32}/\cos(\nu_2), \\ \cos(\varepsilon) &= b_{22}/\cos(\nu_1) = b_{22}/\cos(\nu_2), \\ \cos(\varepsilon) &= (b_{11} + b_{22} + b_{33} - 1)/2. \end{aligned} \quad (24)$$

Однако практическое использование алгоритмов (22)–(24) для определения программных углов ориентации платформы относительно носителя затруднительно из-за того, что среди углов ψ , ϑ , γ , ρ , χ , η угол η настройки платформы по условию согласования является ненаблюдаемым (т. е. является неизвестным).

Для вычисления угла η ориентации платформы относительно неподвижного трехгранника s можно воспользоваться рассмотрением контура II (см. рис. 1) и графа системы координат (см. рис. 2). Используя информацию об углах ориентации репера относительно неподвижного трехгранника s , а также об углах ориентации активной платформы t относительно корпуса репера с учетом требования точной настройки системы на условия оптимальной связи ($A'_p = E$), из уравнения (2) для контура II можно получить косвенную информацию о значениях $\sin(\eta)$ и $\cos(\eta)$.

С учетом этого алгоритмы (16)–(24) позволяют вычислить значения программных углов μ , ν , ε поворота платформы относительно носителя. Значения этих углов сравниваются в микроконтроллере с углами μ_0 , ν_0 , ε_0 фактической ориентации платформы в схеме $m \rightarrow n$ (см. рис. 2) и определяются углы рассогласования:

$$\begin{aligned}\Delta\mu &= \mu - \mu_0, \\ \Delta\nu &= \nu - \nu_0, \\ \Delta\varepsilon &= \varepsilon - \varepsilon_0.\end{aligned}\tag{25}$$

Сигналы углов рассогласования $\Delta\mu$, $\Delta\nu$, $\Delta\varepsilon$ обрабатываются в нуль в соответствующих каналах электроприводов ($\Delta\mu \rightarrow 0$, $\Delta\nu \rightarrow 0$, $\Delta\varepsilon \rightarrow 0$), за счет чего платформа автоматически наводится на репер в автономном режиме ($\mu_0 \rightarrow \mu$, $\nu_0 \rightarrow \nu$, $\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon$).

В настоящее время наведение платформы на репер проводится в два этапа:

1-й этап – выполняется режим автоматического визирования репера с помощью платформы по условию настройки каналов азимутально-вертикального управления ($\Delta\mu \rightarrow 0$, $\Delta\nu \rightarrow 0$);

2-й этап – производится автоматический поворот платформы по каналу вращения, исходя из условия согласования платформы ($\Delta\varepsilon \rightarrow 0$).

Реализация алгоритмов автоматического наведения наземной платформы на репер в соответствии со схемой автономного управления (см. рис. 1, 2) и выражениями (8)–(25) требует изменения порядка выполнения этих этапов.

Численный анализ погрешностей решения задачи автономного наведения платформы на репер в автоматическом режиме и результаты математического моделирования этой задачи показывают работоспособность разработанных алгоритмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Проскуряков Г. М., Плотников П. К.* Геометрия и кинематика пространственного состояния подвижных объектов : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 2008. 156 с.
2. *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. ст. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 90–99.
3. *Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А.* К вопросу определения магнитного курса и магнитного поля Земли на подвижном объекте // Вопросы авиационной науки и техники : Экспресс-информация. Сер. Бортовые приборы навигации, контроля и управления. 1991. Вып. 5. С. 3–16.
4. *Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А.* Полуаналитический способ выполнения девиационных работ для курсовых магнитных систем на подвижном основании // Сборник рефератов депонированных работ. Вып. 3. М. : ВИМИ, 1990. С. 3–32.
5. *Нечаев П. А., Григорьев В. В.* Магнитно-компасное дело. М. : Транспорт, 1983. 239 с.
6. Пат. 1633930 Российская Федерация, А1 G01 С17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители Проскуряков Г. М., Саюров В. Д., Скрипкин А. А. – № 4722359/10 ; заявл. 24.07.1989 ; опубли. 10.12.1995.

7. Пат. 1822248 Российская Федерация, А2 G01 C17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А., Саюров В. Д. – № 4873869/10 ; заявл. 17.08.1990 ; опубл. 20.01.1996.

8. *Игнатьев А. А., Проскуряков Г. М., Маслов А. А.* Миниатюрная курсовертикаль для квазистационарных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. ст. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 64–74.

УДК 537.622, 621.318.12, 621.318.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. А. Черкасова

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: CherkasovaOA@yandex.ru

В данной работе описаны основные принципы, применяемые при компьютерном моделировании открытых магнитных систем. Представлены результаты расчета картины магнитного поля для теоретической модели магнита с осевой симметрией. Сделан вывод об эффективности применения комплексов программ для решения подобных задач.

Ключевые слова: магнитная индукция, магнитное поле, магнит, метод конечных элементов.

Research of the Magnetic Field of the Permanent Magnet by Means of Computer Modeling

O. A. Cherkasova

In this work, the basic principles applied at computer modeling of open magnetic systems described. Results of calculation of a picture of a magnetic field for theoretical model of a magnet with axial symmetry presented. The conclusion is drawing on effectiveness of application of complexes of programs for the solution of similar tasks.

Key words: magnetic induction, magnetic field, magnet, finite element method.

С начала XX в. и по настоящее время приборостроение является основным потребителем постоянных магнитов. Спрос на магниты породил интенсивные поиски подходящих материалов и разработку методов расчета постоянных магнитов.

Появление редкоземельных магнитных (РЗМ) материалов, имеющих малый объем, приходящийся на единицу энергии, высокое значение коэрцитивной силы по намагниченности и устойчивых к воздействию размагничивающих полей ставят перед конструктором две основные задачи:

1) радикально изменить традиционные конструкции магнитных систем с учетом того, что длина магнита из РЗМ может быть сопоставима с длиной рабочего зазора, а магнит в виде толстой пленки следует размещать в непосредственной близости к рабочему зазору либо в его области;

2) эффективно использовать силы отталкивания магнитов в различных механических устройствах.

Основная задача при проектировании магнитных систем с постоянными магнитами обычно заключается в выборе формы и размеров магнита и деталей магнитной арматуры (полюсных наконечников, сердечников, ярма и т. п.), обеспечивающих оптимальное соотношение требуемых параметров. В качестве критерия оптимальности служит назначение будущей магнитной системы. Как правило, в качестве такого критерия принимают один или несколько из следующих [1]:

1) энергию в рабочем зазоре для измерительных механизмов с подвижными обмотками;

2) магнитный момент у измерительных механизмов с подвижным магнитом;

3) силу тяги для поляризованных реле, магнитных муфт, редукторов опор и фиксаторов;

4) структуру и напряженность поля в рабочем объеме в устройствах магнитной оптики.

Любой постоянный магнит представляет собой источник магнитного поля с распределенными параметрами. Поэтому строгий расчет возможен здесь только по уравнениям теории электромагнитного поля. Однако ввиду трудности применения этих уравнений к расчету магнитных систем сложной формы обычно применяют упрощенные методы либо метод конечных элементов при компьютерном моделировании [2–4].

При расчете магнитных систем измерительных приборов и средств автоматики наиболее употребительны три основных метода: отношений, размагничивающего фактора, эквивалентного соленоида. Практика показала [2–6], что перечисленные методы удобны для анализа и при выборе наилучшего соотношения параметров дают приемлемую точность. Метод отношений используют при расчете магнитов с арматурой, метод размагничивающего фактора – при расчете магнитов без арматуры в форме брусков и цилиндров, а метод эквивалентного соленоида – при расчете магнитов без арматуры, выполненных из материалов с очень высокими значениями коэрцитивной силы и энергетического произведения.

Расчет магнитной системы независимо от избранного метода требует знания магнитных характеристик применяемых материалов. В связи с этим был выбран материал КС37 [7], из которого впоследствии были спечены магниты по технологии, описанной в работе [8]. Так как целью работы является расчет распределения магнитного поля на поверхности магнита, изготовленного в форме диска из магнитотвердого материала с высокой коэрцитивной силой ($B_{Hc} \geq 540$ кА/м) и средней величиной магнитного поля ($B_r \geq 0,7$ Тл), то воспользуемся для анализа методом эквивалентного соленоида.

Метод эквивалентного соленоида основан на возможности рассматривать постоянный магнит как однослойный соленоид, имеющий очень тонкую обмотку, по которой протекает намагничивающий ток i . Линейная плотность тока при этом должна быть такой, чтобы поле эквивалентного

соленоида точно соответствовало полю данного магнита. Условием эквивалентности в данном случае будет являться равенство между магнитными моментами магнита и соленоида.

Как известно [1, 9], магнитный момент соленоида P_c равен сумме магнитных моментов всех его витков:

$$P_c = w_0 \cdot h \cdot i \cdot S = w_0 \cdot i \cdot V_c, \quad (1)$$

где w_0 – число витков на единицу длины соленоида; h – длина соленоида; S – площадь, охватываемая витком; V_c – объём соленоида.

Магнитный момент P_m магнита выражается соотношением

$$P_m = V_m \cdot M_m, \quad (2)$$

где V_m – объём магнита; M_m – намагниченность магнита.

Так как рассматриваемые модели имеют одинаковый объём, то условием эквивалентности, как было сказано выше, есть равенство соотношений (1) и (2), что позволяет рассматривать линейную плотность тока как намагниченность соленоида. Если предположить, что намагниченность соленоида – величина постоянная, то индукция в разных точках цилиндрического соленоида неодинакова: на концах она меньше, чем в середине, а в центре сечения меньше, чем на периферии. Для расчета индукции, созданной тонким соленоидом в любой точке пространства, можно использовать закон Био–Савара–Лапласа [9], в соответствии с которым элемент проводника dl с током I создает на оси эквивалентного соленоида индукцию в точке P , лежащую на оси z

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} [dl, \mathbf{r}], \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; \mathbf{r} – радиус-вектор.

Интегрируя выражение (3) по всей поверхности эквивалентного соленоида (рис. 1), получим выражения, включающие эллиптические интегралы второго рода. Используя стандартные алгоритмы их решения, получим расчетное значение индукции соленоида в общем виде

$$B_c = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot w_0}{2} (\cos \alpha - \cos \beta).$$

Тогда индукция на торце цилиндрического магнита будет определяться соотношением

$$B_T = \frac{\mu_0 \cdot M_m \cdot h}{\sqrt{4h^2 + R^2}},$$

где h – длина (высота) магнита (соленоида); R – диаметр магнита.

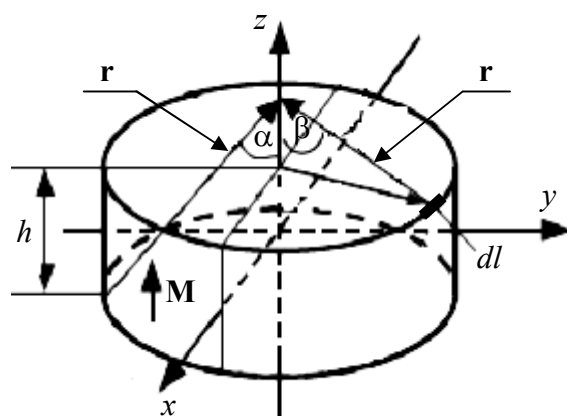


Рис. 1. Эквивалентный соленоид цилиндрического аксиально намагниченного постоянного магнита

За счет использования современных достижений вычислительной техники и математического моделирования появилась возможность рассчитывать магнитные поля численными методами. Большинство способов расчетов относится к случаю работы постоянного магнита на основной кривой размагничивания, где может быть достигнута наибольшая степень использования материала. При этом считается, что магнит намагничен до технического насыщения материала. Большое практическое значение при расчете имеет точность, даваемая им, и его трудоемкость. В этом смысле предпочтение среди численных методов можно отдать методу конечных элементов (МКЭ), так как его ошибка составляет около 7%. Поэтому в данной работе будет использоваться теоретический расчет именно с помощью данного метода.

Высокая эффективность конечно-элементных моделей, возможность на начальной стадии разработки заменить испытания опытных образцов численным экспериментом на компьютере обусловили появление мощных профессиональных программ (ANSYS, COMSOL, ELCUT), реализующих МКЭ и позволяющих рассчитывать сложные электромагнитные и электро-механические процессы в электрических машинах при минимальных допущениях.

При использовании МКЭ в общей постановке задача расчета двумерного стационарного магнитного поля с учетом нелинейных магнитных свойств выбранного материала будет сводиться к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta, \quad (4)$$

где A_z – составляющая векторного магнитного потенциала по оси z ; $\nu = 1/\mu$ – величина, обратная магнитной проницаемости среды.

Сущность МКЭ [10, 11] заключается в замене краевой задачи (4) вариационной, т. е. в разбиении расчетной области на элементы и решении вариационной задачи внутри каждого элемента. Следовательно, уравнение (4) сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала:

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^{B_X} \mathbf{v} \cdot B_X \cdot dB_X + \int_0^{B_Y} \mathbf{v} \cdot B_Y \cdot dB_Y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_Z \cdot \Delta \cdot d\Omega, \quad (5)$$

где Ω – область расчета магнитного поля.

Расчетные уравнения МКЭ получаются в результате минимизации функционала (5) в области Ω , которая предварительно разделена на произвольное число, например, треугольных элементов, причем число этих элементов, имеющих общую вершину в одной точке, их размеры и расположение никак не ограничиваются. Эти элементы покрывают всю область расчета магнитного поля и не пересекаются друг с другом.

Если в области Ω задано n вершин r треугольников и F^m представляет собой вклад треугольника m в общий функционал (5), то минимум этого функционала находят, решая систему уравнений

$$\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0, \quad (6)$$

где $m = 1, 2, \dots; r p = 1, 2, \dots, n$.

Дифференцирование по A_{zp} даст результат, отличный от нуля, только в том случае, если p является одной из вершин треугольника m и, следовательно, для каждого треугольника с вершинами i, j, k можно записать, следующие выражения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^m}{\partial A_{zi}} &= \frac{\mathbf{v}}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i^2 + b_i^2) \cdot A_{zi} + (c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zj}} &= \frac{\mathbf{v}}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zi} + (c_j^2 + b_j^2) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zk}} &= \frac{\mathbf{v}}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zi} + (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_k^2 + b_k^2) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основе выражений (7), записанных для каждого треугольника области Ω , образуется система нелинейных алгебраических уравнений (10), решение которой дает значения A_z в вершинах треугольников. Эти значения A_z обеспечивают минимум функционалу (5) и, следовательно, являются решением уравнения (4).

Необходимо рассчитать распределение магнитного поля на поверхности постоянного магнита и на некотором расстоянии от нее. Для аналитического расчета использовали программы *Elcut Professional 5.4* и *Maxwell 15.0.0*. Гармонический анализ распределений индукции и обработка результатов моделирования производились в среде *Origin 7.0*.

При построении аналитических решений для распределения магнитных полей вводились следующие допущения: задача решалась в плоской постановке, величина магнитного момента аксиального магнита принималась постоянными $M_m = \text{const}$.

В качестве объекта исследования был рассмотрен цилиндрический (дисковый) магнит из сплава КС37 [7] радиусом $r = 5$ мм и высотой $h = 5$ мм, с аксиальным намагничиванием вдоль оси z (см. рис. 1). Прежде чем начать исследование данного магнита, необходимо создать модель, которая будет состоять из опорных точек. После ввода всех опорных точек необходимо соединить их отрезками прямых линий или дугами окружности, для того чтобы модель приняла законченный вид. Так как мы имеем осесимметричный образец, то начало координат будет располагаться в центре нижнего основания цилиндра (см. рис. 1, плоскость xu). После того как модель создана, необходимо ввести свойства блоков и граничные условия [11, 12].

Исследуемый образец изготовлен из нелинейного материала [8], следовательно, необходимо ввести не менее 5 точек из кривой $B(H)$ материала КС37 для получения хорошего результата распределения поля в материале. Для этого воспользуемся данными стандарта [7]. Поскольку программы *Elcut* и *Maxwell* интерполируют между выбранными точками кривой $B(H)$, применяя кубические сплайны, то введение меньшего количества точек приведет к линейности кривой $B(H)$, так как на кривой имеются области с резкими изменениями ее формы.

Самые распространенные границы магнитных полей – границы, к которым магнитный поток параллелен (т. е. условие Дирихле), и границы, к которым поток перпендикулярен (условия Неймана), поэтому будем считать, что векторный магнитный потенциал постоянен и равен нулю.

Когда свойства модели и граничные условия заданы, можно строить сетку конечных элементов и производить расчет модели. Площадь области расчета составляет 750 мм^2 , число узлов триангуляционной сетки 210. Распределение во всей области исследования магнитного поля B представлено на рис. 2. Результаты расчета магнитной составляющей B_r на торце полюса магнита и на нескольких расстояниях от него представлены на рис. 3.

Изображение 6 кривых, расстояние между которыми 1 мм, можно увидеть на рис. 3. По мере удаления от поверхности магнита магнитная индукция падает и изменяется форма кривой. Исходя из формы кривых можно выявить наиболее однородные участки, на которых нормальная составляющая магнитной индукции будет перпендикулярна торцу магнита, что позволит говорить о равномерности распределения поля в заданной области над поверхностью полюса магнита.

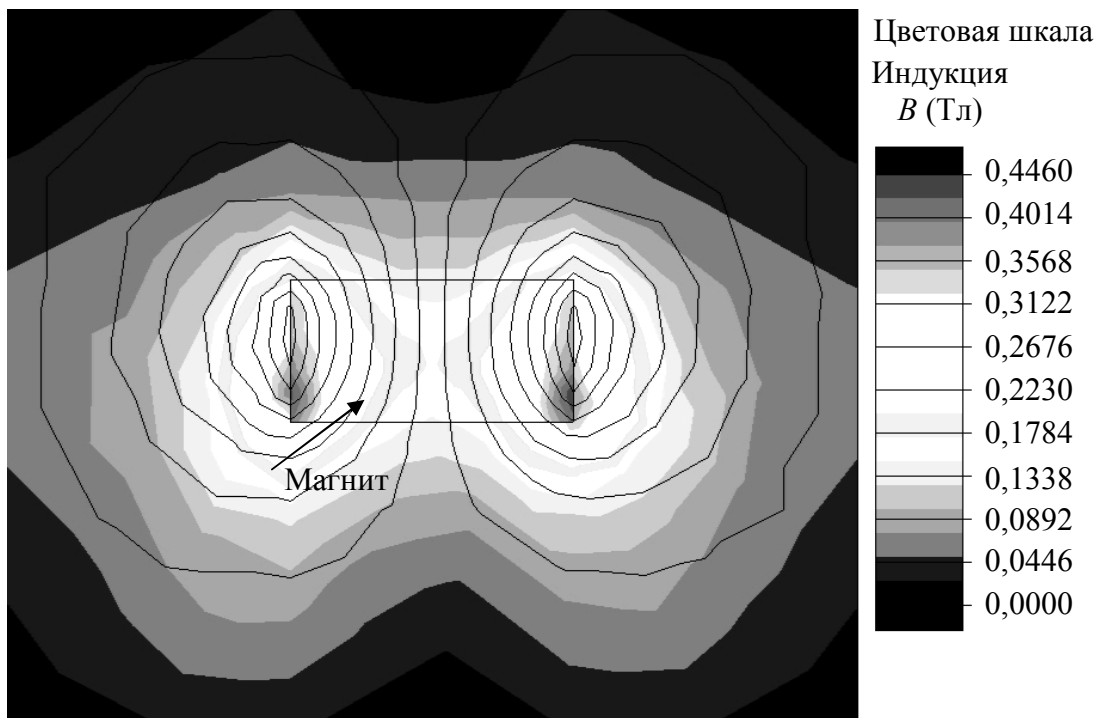


Рис. 2. Распределение магнитного поля B в постоянном магните

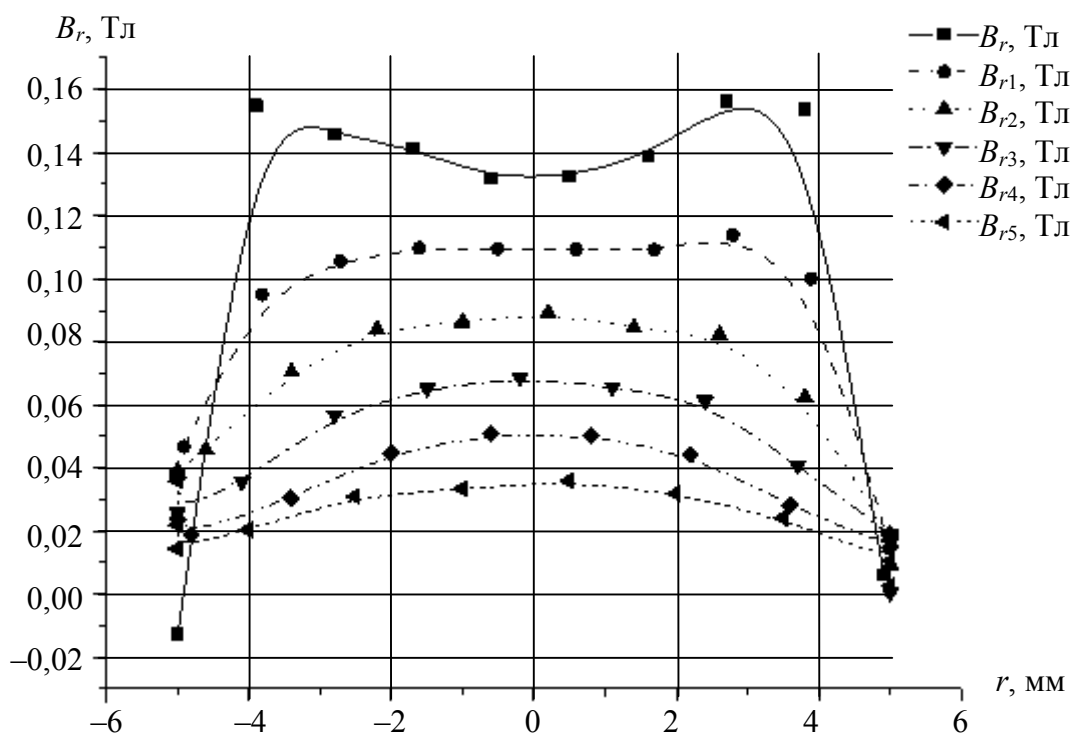


Рис. 3. Аналитическое распределение магнитной индукции B_r на поверхности постоянного магнита и на расстоянии до 5 мм от нее

В итоге видим, что наиболее однородные области будут наблюдаться на расстоянии 1 и 2 мм (см. рис. 3, кривые B_{r1} и B_{r2}), при этом однородная область будет ограничена радиусом 2 мм. Однако индукция на расстоянии 1 мм составляет 109 мТл, а на расстоянии 2 мм – 84 мТл. В нашем же случае необходимо получить однородность поля при уровне магнитной индукции ~ 30 мТл. С такой индукцией, исходя из рис. 3, подходит лишь 6-я кривая для B_{r5} , однако область однородности очень мала и составляет 1 мм, что обусловлено отклонением индукционных токов от нормали. Для получения более однородной области необходимо изменить размер моделируемого магнита либо ввести дополнительные элементы в виде термокомпенсаторов или шунтов.

При аналитическом расчете необходимо иметь полную картину размагничивающей ветви петли гистерезиса для нелинейного материала, что позволит более точно определить основные характеристики магнитов. В результате использования двух программ автоматизированного проектирования – отечественной (*Elcut*) и зарубежной (*Maxwell*) – можно сделать еще один немаловажный вывод: результаты расчета магнитного поля исследуемого образца идентичны, что говорит о достоверности расчета с использованием МКЭ.

Рассмотренная система моделирования статических электромагнитных полей *Elcut* и *Maxwell* с использованием метода конечных элементов позволяет повысить навык проектирования и инженерного анализа с различными *CAE (Computer Aided Engineering)* системами среднего уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постоянные магниты : справочник / А. Б. Альтман, Э. Е. Верниковский, А. Н. Герберг и др. ; под ред. проф. Ю. М. Мятин. М. : Энергия, 1980. 488 с.
2. Реутов Ю. Я., Пудов В. И. Компьютерный анализатор спектра магнитной индукции // Дефектоскопия. 2003. Вып. 12. С. 67–68.
3. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2006. 288 с.
4. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Семина И. А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа // Омский науч. вестн. 2010. № 1 (87). С. 110–113.
5. Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюхин А. В. Распределение намагниченности вдоль цилиндрического стержня, находящегося в продольном постоянном однородном магнитном поле // Электротехника. 2009. Вып. 8. С. 37–46.
6. Резинкина М. М. Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84, № 2. С. 1–7.
7. ГОСТ 21559-76 Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля. М. : ГКС, 1991. 20 с.

8. *Черкасова О. А.* Влияние режимов спекания на магнитные характеристики магнитов из сплава КС37 // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. ст. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 106–112.
9. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики : учеб. пособие для вузов : в 5 т. Т. 3. Электричество. 4-е изд., стереот. М. : ФИЗМАТЛИТ ; Изд-во МФТИ, 2004. 656 с.
10. *Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.* Метод конечных элементов и САПР. М. : Мир, 1989. 190 с.
11. *Копылов И. П.* Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.
12. *Тун Т. Н.* Применение полевых методов в электромагнитных расчетах электрических машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 21 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378

КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ 03.03.02 ФИЗИКА

О. А. Черкасова, С. В. Чурочкина

Саратовский государственный университет
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83
E-mail: CherkasovaOA@yandex.ru, klechshevskaya@mail.ru

Предложена схема оценки качества выпускной квалификационной работы и ее защиты на основе компетентностного подхода. Разработаны показатели оценки качества обучения.

Ключевые слова: физика, бакалавр, компетентностный подход, выпускная квалификационная работа.

Competency Approach by Analysis of Development of Educational Program for Bachelors of Physics

O. A. Cherkasova, S. V. Churochkina

The scheme of an assessment of quality of final qualification work and its protection based on competence-based approach offered. Indicators of an assessment of quality of training are developed.

Key words: physics, bachelor, competency approach, final qualification work.

В последнее время система образования в высшей школе претерпела целый ряд изменений [1, 2]. Введение новых федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) приводит к тому, что в формировании знаний и умений присутствует компетентностно ориентированный подход [3, 4]. Следовательно, особое значение приобретает научно-практическое обоснование сформулированных в стандарте [5] общепрофессиональных и профессиональных компетенций для выпускников с квалификацией «бакалавр» по направлению подготовки 03.03.02 Физика. По сути, компетентностный подход позволяет оценить готовность выпускника влиться в профессиональную среду. Кроме того, он помогает развитию у выпускников социальной мобильности и способствует их востребованности на рынке труда, а также будущей успешной профессиональной карьере.

В условиях активной модернизации высшего профессионального образования и его интеграции в европейскую систему образования важными становятся не только знания сами по себе, полученные студентами в ходе освоения дисциплин и модулей основной образовательной программы (ООП), но и практические навыки их реализации в профессиональной деятельности. Из этого следует, что в процессе обучения ООП формирует оп-

ределенный набор компетенций, который в итоге и предстоит оценить. Согласно ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика [5, п. 4.4] выпускник, освоивший программу бакалавриата, должен быть готов к приобретению следующих профессиональных навыков:

- освоению методов научных исследований;
- освоению теорий и моделей;
- участию в проведении физических исследований по заданной тематике;
- участию в обработке полученных результатов научных исследований на современном уровне;
- работе с научной литературой с использованием новых информационных технологий.

В свою очередь, вышеназванные навыки реализуются с учетом компетентностного подхода.

Компетенции являются главными категориями в реализации ФГОС ВО. Как следствие, объективная оценка результатов освоения ООП сводится к их оцениванию [6]. Так как говорить о результатах освоения можно только на государственной итоговой аттестации (ГИА), то нами была предпринята попытка оценить компетенции через призму выпускной квалификационной работы (ВКР) бакалавра-физика. Разработанная оценочная модель представлена в таблице. Отдельные аспектные характеристики ВКР магистранта рассмотрены в [7–10].

Таблица

Общие рекомендации для итогового оценивания компетенций при ГИА

Коды компетенций согласно ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Раздел ВКР и сопутствующие документы
Общекультурные компетенции		
ОК-1	Знать: основы философии Уметь: системно мыслить; формировать мировоззренческую позицию на основе полученных философских знаний; применять полученные знания в профессиональной и социальной деятельности Владеть: методами философского познания окружающего мира; культурой научного мышления	Обоснование актуальности темы ВКР (в структурном элементе «Введение»)
ОК-2	Знать: основные этапы и закономерности исторического развития общества Уметь: анализировать и оценивать исторические события и процессы; использовать в профессиональной деятельности базовые знания истории Владеть: способностью оценивать закономерности исторического развития общества для формирования гражданской позиции	Наличие общей информации о состоянии разработок и обзора литературы по выбранной теме ВКР (в структурном элементе «Введение»). Обоснование новизны выбранной темы ВКР (в структурном элементе «Введение»).

Коды компетенций согласно ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Раздел ВКР и сопутствующие документы
ОК-3	<p>Знать: основы экономических знаний в различных сферах деятельности</p> <p>Уметь: анализировать и оценивать экономическую выгоду объекта исследования</p> <p>Владеть: методами расчета эффективности исследования</p>	Выбор объекта исследования
ОК-4	<p>Знать: основы правоведения</p> <p>Уметь: применять на практике основы правовых знаний в различных сферах жизнедеятельности</p> <p>Владеть: терминологией и понятийным аппаратом правоведения</p>	Рецензия на ВКР
ОК-5	<p>Знать: по крайней мере, один иностранный язык и принципы построения грамотной устной и письменной речи</p> <p>Уметь: вступать в коммуникацию в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач межличностного и межкультурного взаимодействия</p> <p>Владеть: техникой перевода иностранной литературы; способностью к коммуникации в профессиональной сфере и межличностном общении</p>	<p>Задание на ВКР</p> <p>Отзыв научного руководителя</p> <p>Наличие ссылок на иностранную литературу (в структурном элементе «Список использованных источников»)</p> <p>Выступление на защите ВКР</p>
ОК-6	<p>Знать: базовые принципы развития и жизни общества</p> <p>Уметь: толерантно воспринимать социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия; подчиняться</p> <p>Владеть: навыками совместной работы в различных научных коллективах</p>	<p>Отзыв научного руководителя</p> <p><u>Для экспериментальных работ</u> – выполнение эксперимента в научной группе</p> <p>Приветствуется участие в грантах</p>
ОК-7	<p>Знать: способы самоорганизации и развития своего интеллектуального, культурного, духовного, нравственного, физического и профессионального уровня</p> <p>Уметь: находить недостатки в своем общекультурном и профессиональном уровне развития и стремиться их устранить</p> <p>Владеть: навыками самоорганизации и развития своего потенциала</p>	<p>Написание ВКР</p> <p>Формулирование задач ВКР, поставленных научным руководителем для достижения цели ВКР (в структурном элементе «Введение»)</p> <p>Отзыв научного руководителя</p>
ОК-8	<p>Знать: методы и средства физической культуры для обеспечения профессиональной деятельности</p> <p>Уметь: применить полученные знания на практике</p> <p>Владеть: навыками здорового образа жизни</p>	Наличие справки о сдаче нормативов в зачетной книжке студента

Коды компетенций согласно ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Раздел ВКР и сопутствующие документы
ОК-9	<p>Знать: приемы первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайных ситуаций</p> <p>Уметь: оказывать первую помощь в экстренных случаях</p> <p>Владеть: навыками обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях, знаниями по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций</p>	Наличие раздела «Вопросы техники безопасности и охраны труда» <u>в случае выполнения экспериментальной работы</u>
Общепрофессиональные компетенции		
ОПК-1	<p>Знать: базовые естественно-научные знания, возможные методы исследования и современные концепции их реализации</p> <p>Уметь: применять модельные алгоритмы для решения поставленных в ходе исследования задач</p> <p>Владеть: методами исследования и обоснования полученных результатов</p>	<p>Введение определений (в структурном элементе «Определения», который не является обязательным)</p> <p>Формулирование предмета и объекта изучения, описание метода(-ов) исследования, современных концепций, достижений и ограничений по выбранной теме ВКР (в структурном элементе «Основная» («Теоретическая» и / или «Экспериментальная»))</p> <p>Рецензия на ВКР</p>
ОПК-2	<p>Знать: основные математические модели, применяемые в исследовании</p> <p>Уметь: задавать граничные условия применимости модели</p> <p>Владеть: математическим аппаратом решения профессиональных задач в рамках указанных моделей</p>	<p>В структурном элементе «Основная» («Теоретическая» и/или «Экспериментальная») часть</p> <p>Рецензия на ВКР</p>
ОПК-3	<p>Знать: основные законы и теории фундаментальных разделов общей и теоретической физики</p> <p>Уметь: применять известные теории и гипотезы к исследуемой задаче</p> <p>Владеть: навыками работы с основными законами общей и теоретической физики</p>	<p>В структурном элементе «Основная» («Теоретическая» и / или «Экспериментальная») часть</p> <p>Отзыв научного руководителя</p> <p>Рецензия на ВКР</p>
ОПК-4	<p>Знать: основы информационной безопасности, актуальность и новизну тематики своего исследования</p> <p>Уметь: добывать информацию из различных источников</p> <p>Владеть: техникой обработки и сохранения информации, навыками защиты информации</p>	<p>Обоснование новизны и актуальности выбранной темы ВКР; связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами (в структурном элементе «Введение»)</p>

Коды компетенций согласно ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Раздел ВКР и сопутствующие документы
Общепрофессиональные компетенции		
ОПК-5	<p>Знать: основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации</p> <p>Уметь: работать с компьютером, преобразовывать информацию в звуковую или зрительную</p> <p>Владеть: навыками обработки полученной информации</p>	Презентация ВКР
ОПК-6	<p>Знать: систему стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу</p> <p>Уметь: работать с электронными и бумажными носителями, библиографическими ссылками с применением информационно-коммуникационных технологий</p> <p>Владеть: техникой оформления библиографических ссылок в соответствии со стандартами</p>	В структурных элементах: «Обозначения и сокращения» (этот элемент не является обязательным), «Список использованных источников»
ОПК-7	<p>Знать: по крайней мере, один из иностранных языков и принципы построения грамотной устной и письменной речи</p> <p>Уметь: профессионально изложить результаты исследования, подготовить доклад и выступление на международной конференции на иностранном языке</p> <p>Владеть: навыками профессионального коммуникационного общения на иностранном языке</p>	Наличие общей информации о состоянии разработок и обзора литературы по выбранной теме ВКР (в структурном элементе «Введение») Наличие ссылок на иностранную литературу (в структурном элементе «Список использованных источников»)
ОПК-8	<p>Знать: предысторию тематики исследования</p> <p>Уметь: использовать предыдущий опыт и спрогнозировать возможные результаты</p> <p>Владеть: навыками переосмысления в случае получения отрицательного результата</p>	В структурных элементах: «Основная» («Теоретическая» и / или «Экспериментальная») часть, «Заключение»
ОПК-9	<p>Знать: основные принципы работы в научных группах и малых коллективах</p> <p>Уметь: брать ответственность за принятые решения и направленность исследования</p> <p>Владеть: навыками управления и организации исследования</p>	Задание на ВКР Отзыв научного руководителя

Коды компетенций согласно ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Раздел ВКР и сопутствующие документы
Профессиональные компетенции		
ПК-1	<p>Знать: основные законы физики, применительно к направленности исследования.</p> <p>Уметь: выбирать и применять специализированные знания для решения профильных задач</p> <p>Владеть: методами расчета и исследования профильной тематики, навыками анализа, используемыми методами</p>	<p>В структурных элементах: «Введение» (наличие общей информации о состоянии разработок и обзора литературы по выбранной теме ВКР)</p> <p>«Основная» («Теоретическая» и / или «Экспериментальная») часть</p> <p>Отзыв научного руководителя</p> <p>Рецензия на ВКР</p>
ПК-2	<p>Знать: особенности проведения экспериментальных и теоретических исследований, современную приборную базу и возможные информационные технологии</p> <p>Уметь: выполнять экспериментальные и теоретические исследования, работать с приборами и устройствами, анализировать с использованием информационных технологий</p> <p>Владеть: техникой проведения эксперимента, навыками использования методик расчета, навыками обработки и представления экспериментальных и теоретических результатов</p>	<p>В структурных элементах: «Основная» («Теоретическая» и/или «Экспериментальная») часть</p> <p>«Приложение» (этот элемент не является обязательным)</p> <p>Отзыв научного руководителя</p> <p>Рецензия на ВКР</p>

Предложенная нами модель итогового оценивания бакалавров с использованием компетентностного подхода может быть применена и для других естественно-научных и инженерных направлений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об образовании в Российской Федерации : федер. закон : [принят Государственной Думой 21 декабря 2012 г.] : [одобрен Советом Федерации 26 декабря 2012 г.]. М., 2012. URL : http://base.garant.ru/70291362/1/#block_1000 (дата обращения : 18.12.2014).
2. Об утверждении порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) : приказ Министерства образования и науки РФ от 19.11.2013 г. № 1259. URL : http://fgosvo.ru/uploadfiles/prikaz_miobr/pogord.pdf (дата обращения: 18.12.2014).
3. *Вербицкий А. А.* Компетентностный подход и теория контекстного обучения : материалы к Четвертому заседанию методологического семинара, 16 ноября 2004 г. М. : Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. 84 с.
4. *Коршунов С. В.* Подходы к проектированию образовательных стандартов в системе многоуровневого инженерного образования. М. : Исслед. центр проблем каче-

ства подготовки специалистов, 2005. 88 с.

5. Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика (уровень бакалавриата) : приказ Минобрнауки России от 07.08.2014 года № 937. URL : http://fgosvo.ru/uploadfiles/fgosvob/030302_Fisika.pdf (дата обращения : 18.12.2014).

6. *Копиа О. Ю., Елисеева Е. Ю.* Компетентностный подход к оценке результатов подготовки бакалавров технических специальностей // Вектор науки ТГУ. 2010. № 7(10). С. 82–86.

7. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Эпистемологические упражнения магистранта : формулировка и оценка научных положений в своей диссертации // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/3. С. 213–214.

8. *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.

9. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Магистранту – об идеалах научности и формуле интересного // Оптика и образование-2014 : сб. трудов / под ред. проф. А. А. Шехонина. СПб. : НИУ ИТМО, 2014. С. 68–69.

10. *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.

ЭКОНОМИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 330.322

СИСТЕМА ВЕНЧУРНОГО ИНВЕСТИРОВАНИЯ НАУКОЕМКИХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. Н. Плотников, Д. А. Плотников

Саратовский государственный технический университет
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77
E-mail: a.n.plotnikov@mail.ru

Статья посвящена системе венчурного инвестирования инновационной деятельности наукоемких высокотехнологичных предприятий с целью удовлетворения спроса на hi-tech продукцию и получения высокой нормы прибыли на вложенный капитал.

Ключевые слова: инвестирование, венчурное инвестирование, инновационная деятельность, наукоемкие высокотехнологичные предприятия, hi-tech продукция.

System of Venture Investment of the Knowledge-intensive hi-tech Enterprises

A. N. Plotnikov, D. A. Plotnikov

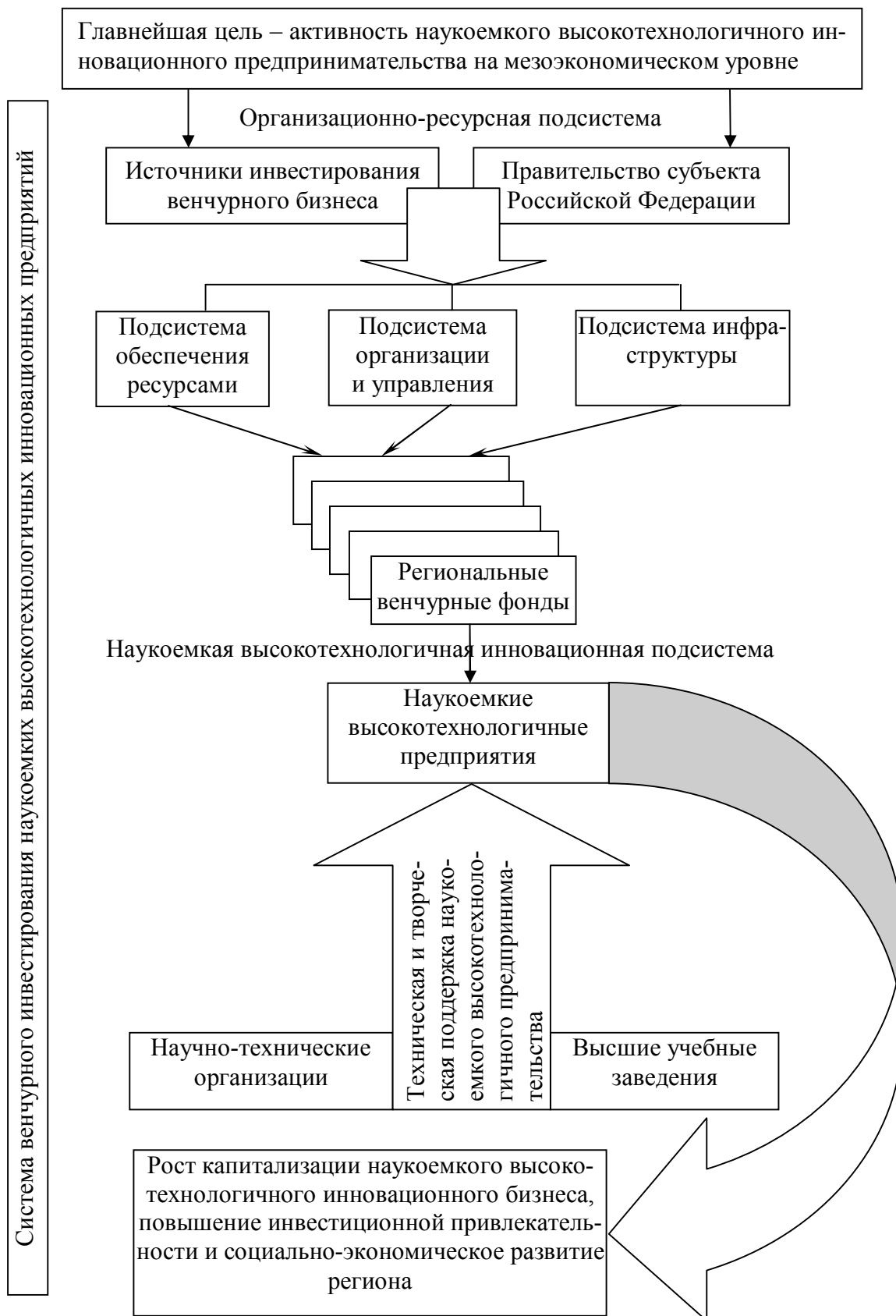
This paper is devoted to the system of venture investment innovation high-tech high-tech enterprises in order to meet the demand for hi-tech products and obtain a high rate of return on invested capital.

Key words: investing, venture capital investment, innovation, knowledge-intensive high-tech enterprises, hi-tech products.

В литературе, посвященной тематике исследования венчурного инвестирования, представлены различные взгляды на формирование, развитие и совершенствование систем венчурного инвестирования деятельности наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий. Так, например, исследователи А. Т. Каржаув, А. Н. Фоломьев [1], П. В. Жаворонков [2] в своих научных трудах предлагают структуру национальной системы венчурного инвестирования, исследуя эту систему на макроэкономическом уровне. П. П. Пилипенко [3] изучает корпоративное венчурное инвестирование, рассматривая процессы венчурного инвестирования на микроэкономическом уровне. Составляющий элемент нашего научного труда состоит в исследовании системы венчурного инвестирования на мезоэкономическом уровне.

На наш авторский взгляд концептуальные основы построения системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных предприятий на мезоэкономическом уровне можно представить в виде рисунка (рис. 1). Любая система должна иметь цель, и в процессе взаимодействия субъекта и объекта данной системы появляются конкретные результаты [4]. Целью системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных предприятий на мезоэкономическом уровне, по нашему мнению, может быть повышение инновационной активности предпринимательства в сфере высоких технологий на мезоэкономическом уровне.

Субъектами в данной системе являются источники венчурного инвестирования и государственная власть, функционирующие на мезоэкономическом уровне, заинтересованные в развитии инновационной деятельности и готовые активно участвовать в процессе ее инвестирования [5–7].



Факторы внешней среды, оказывающие влияние на венчурное инвестирование

Рис. 1. Концептуальные основы построения системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий на мезоэкономическом уровне (авторский подход)

Для эффективного функционирования системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий необходимы подсистемы:

- обеспечения ресурсами;
- организации и управления венчурным инвестированием на мезоэкономическом уровне;
- инфраструктуры венчурного инвестирования.

Рассмотрим каждую из вышеперечисленных подсистем подробно.

Подсистема обеспечения ресурсами состоит из венчурного капитала (рис. 2).

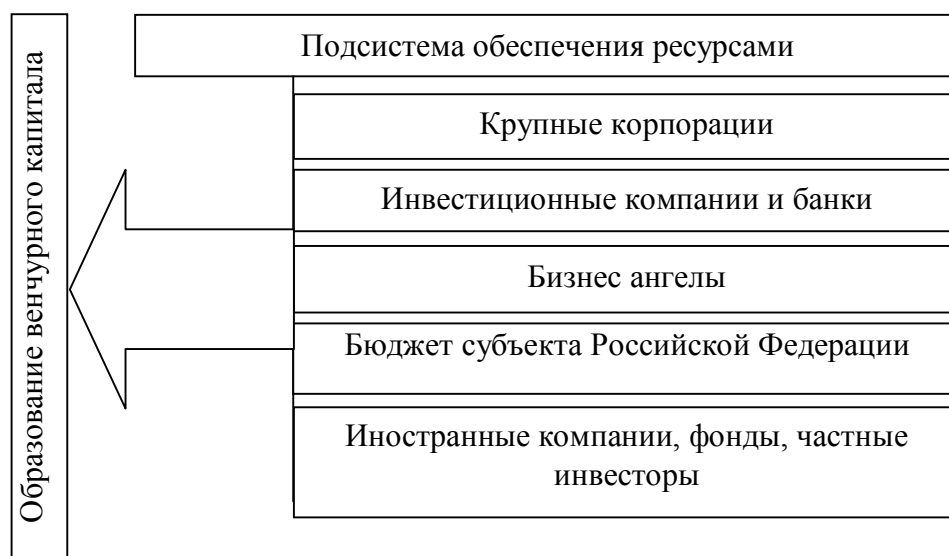


Рис. 2. Характеристика подсистемы обеспечения ресурсами системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных предприятий на мезоэкономическом уровне (авторский подход)

Перечислим задачи подсистемы обеспечения ресурсами:

- максимальное привлечение внебюджетных средств в инновационную деятельность наукоемких высокотехнологичных предприятий;
- образование и формирование предложения высокорискового венчурного капитала.

Инвестиционными источниками формирования капитала венчурного бизнеса могут быть частные сбережения, накопления крупных корпораций, средства бюджета субъектов Российской Федерации, инвестиционных компаний и банков, иностранных и международных организаций [8–9].

Подсистема организации и управления венчурным инвестированием на мезоэкономическом уровне имеет задачи формирования нормативно-правовой базы венчурного инвестирования, принципов венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий на мезоэкономическом уровне, эффективного взаимодействия венчурного капитала с управленческими и творческими ресурсами (рис. 3).



Рис. 3. Характеристика подсистемы организации и управления венчурным инвестированием на мезоэкономическом уровне (авторский подход)

В структуре системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологических предприятий на мезоэкономическом уровне выделяется инфраструктурная подсистема (рис. 4).

Данная подсистема имеет целью создание комфортных условий для образования и использования венчурного капитала, минимизации инвестиционных рисков, повышения эффективности инновационной и управленческой деятельности наукоемких высокотехнологических инновационных предприятий. В эту подсистему входят инфраструктурные элементы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологических предприятий: культурная основа венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологических предприятий, образовательные учреждения по подготовке кадров и повышению их квалификации для сферы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологических предприятий, консалтинговые и страховые компании, гарантийные фонды.

Объектом системы венчурного инвестирования инновационной деятельности наукоемких высокотехнологических предприятий на мезоуровне является инновационно-производственная подсистема. Данная подсистема имеет следующие цели: формирование спроса на наукоемкую высокотехнологическую hi-tech продукцию и ее последующая коммерциализация, фор-

мирование объемной доли инновационной высокотехнологичной продукции в российском рынке на мезоуровне, многообразная интеграция образования, науки и производства, обновление производственной базы на мезоэкономическом уровне [10, 11].



Рис. 4. Характеристика инфраструктурной подсистемы системы венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных предприятий на мезоэкономическом уровне (авторский подход)

Результатами функционирования системы венчурного инвестирования инновационной деятельности наукоемких высокотехнологичных предприятий на мезоуровне, по мнению авторов, может быть рост капитализации и инвестиционной привлекательности предприятия, а также социально-экономическое развитие региона [12, 13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каржаув А. Т., Фоломьев А. Н. Национальная система венчурного инвестирования. М. : Экономика, 2006. 238 с.
2. Жаворонков П. В. Методологические подходы к венчурному инвестированию // Экономика, предпринимательство и право. 2011. № 1 (1). С. 17–29. URL : <http://www.creativeconomy.ru/articles/15235/> (дата обращения : 21.12.20014).
3. Пилипенко П. П. Корпоративное венчурное инвестирование в современной российской экономике : автореф. дис. ... д-ра экон. наук. М. : Рос. экон. акад. им. Г. В. Плеханова, 2002. 32 с.

4. *Маршал А.* Принципы экономической науки : в 3 т. М. : Прогресс, 1993. Т. 2. 23 с.
5. *Nait A.* The notion of risk and uncertainty // Almanac : theory and history of economic and social institutions and systems. М., 1994. № 5. P. 18–35.
6. *Райсберг Б. А., Лозовский Л. Ш., Стародубцева Е. Б.* Современный экономический словарь. М. : ИНФРА-М, 2002. 245 с.
7. *Барышева А. В.* Инновации : учеб. пособие. М. : Изд-во Дашков и К, 2009. 384 с.
8. *Чернов В. А.* Анализ коммерческого риска. М. : Финансы и статистика, 1998. 157 с.
9. *Эрроу К.* Информация и экономическое поведение // Вопр. экономики. 1995. № 5. С. 98–107.
10. *Плотников А. Н., Волкова М. В.* Перспективы развития венчурного инвестирования в России // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 144–148.
11. *Плотников А. Н.* Источники инвестирования инноваций на предприятии // Инновационная деятельность. 2013. № 1 (24). С. 81–84.
12. *Плотников А. Н., Волкова М. В., Плотников Д. А.* Модели венчурного инвестирования и организационные схемы их функционирования // Инновационная деятельность. 2013. № 2 (25). С. 75–87.
13. *Волкова М. В., Плотников А. Н., Плотников А. П., Плотников Д. А., Пчелинцева И. Н.* Теоретико-методологические основы развития системы венчурного инвестирования инновационной деятельности на мезоэкономическом уровне. Саратов : КУБиК, 2014. 177 с.

УДК 338, 338.45

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ИНДИКАТОРОВ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО И ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ

Р. Р. Вьюнова

Саратовский государственный технический университет
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77
E-mail: Vjunchik_@mail.ru

В статье рассматривается система показателей и индикаторов, использование которых позволяет определять уровень экономического и инновационного потенциала предприятий, а также производить детальный анализ направлений развития предприятий и своевременно определять вектор происходящих изменений.

Ключевые слова: экономический потенциал, инновационный потенциал, ресурсные показатели, финансовые показатели, инновационные показатели, индикаторы экономического и инновационного потенциала.

The System of Measures and Indicators to Assess the Economic and Innovative Potential of the Enterprise

R. R. Vyunova

The article considers the system of measures and indicators, which can be used to determine the level of economic and innovative potential of the enterprises, and also to make a detailed analysis of directions of development of the enterprises and in a timely manner to define a vector of changes.

Key words: economic potential, innovation, resource indicators, financial performance, innovation indicators, indicators of economic and innovative potential.

В настоящее время основным фактором и необходимым условием повышения конкурентоспособности предприятия становится оценка его экономического и инновационного потенциала.

Понятие «потенциал» (от лат. *potentia* – сила) – степень мощности, скрытые возможности предприятия [1]. Оценка потенциала предприятия позволяет выявить достигнутые в прошлом периоде результаты деятельности [2], их использование и воспроизводство в настоящем, а также перспективы развития.

Экономический потенциал означает комплекс ресурсов и финансовых возможностей предприятия [3], использующихся для достижения максимального экономического эффекта. В характеристику экономического потенциала входят положения, представленные на рис. 1.

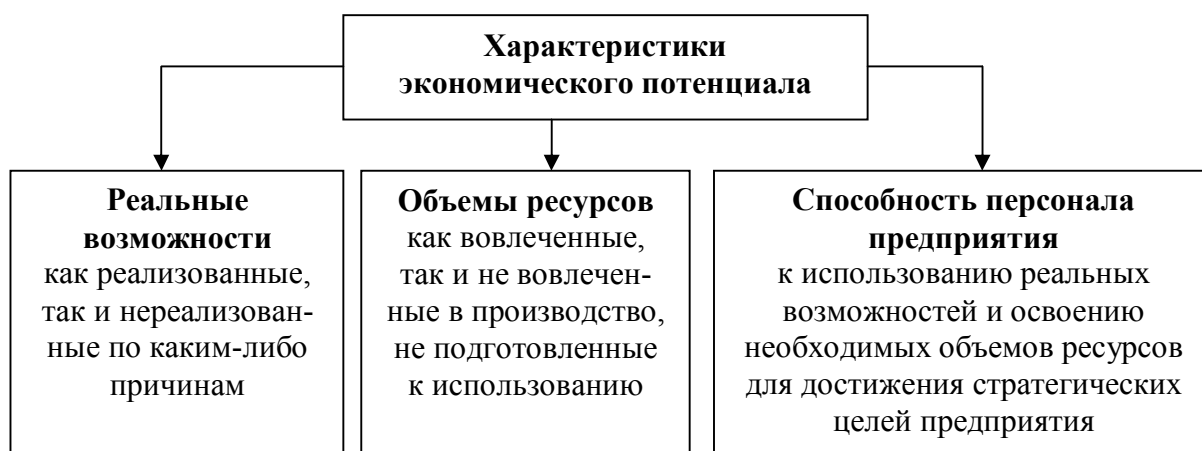


Рис. 1. Положения, на основе которых характеризуется экономический потенциал

Исследуя экономический потенциал предприятия как комплекс совокупных возможностей его ресурсов обеспечивать достижение максимальных результатов деятельности, необходимо рассматривать каждую его составляющую не изолированно [4], а в системе (рис. 2).

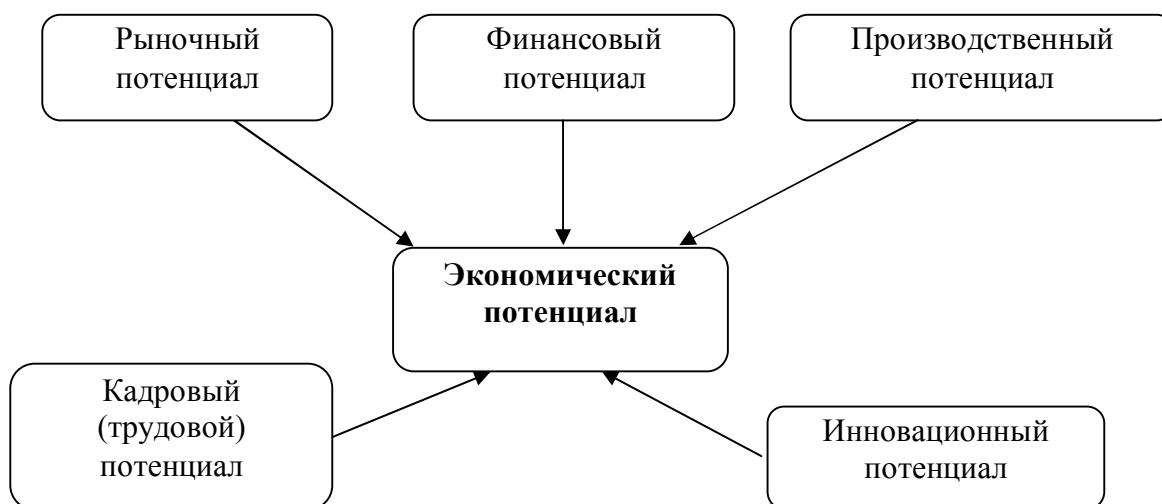


Рис. 2. Составляющие экономического потенциала

Инновационный потенциал является одной из важнейших составляющих частей экономического потенциала [5], оценка которого является неотъемлемым условием достижения предприятием успеха. Автором настоящей статьи предлагается следующая формулировка понятия «инновационный потенциал»: это максимальные аккумулированные возможности, способности и готовность предприятия при наличии необходимых ресурсов генерировать высокую инновационную активность, проявляющуюся в эффективном обеспечении новых и будущих технологий (рис. 3).



Рис. 3. Составляющие инновационного потенциала предприятия

В аналитических целях система показателей, характеризующая экономический и инновационный потенциал предприятий, может быть структурирована и разделена на три основные группы (рис. 4).



Рис. 4. Три группы показателей, характеризующих экономический и инновационный потенциал предприятия

Величина экономических (финансовых возможностей) обуславливается качеством и количеством ресурсов [6], имеющихся на данный момент у предприятия, и определенными условиями, которые обеспечивают их наиболее рациональное применение. Структура ресурсной группы показателей представляется на рис. 5.

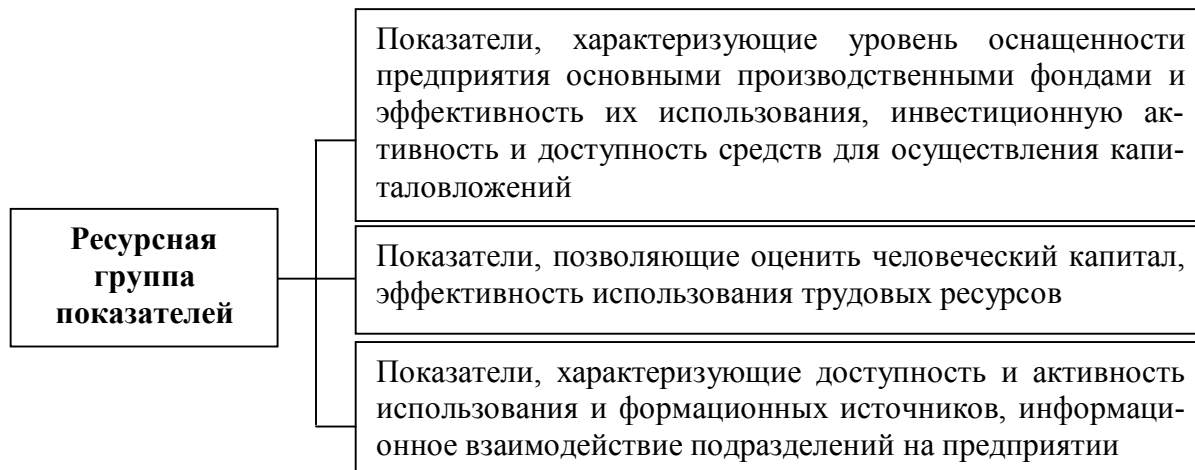


Рис. 5. Состав ресурсной группы показателей

Автором настоящей статьи предлагается методика оценки инновационного потенциала с помощью групп ресурсных, финансовых и инновационных показателей. Группа ресурсных показателей и соответствующих этой группе индикаторов позволяет количественно оценить возможности предприятия и направления улучшения его деятельности с целью достижения желаемого результата.

Группа ресурсных показателей и соответствующие этой группе подгруппы и индикаторы инновационного и экономического потенциала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Подгруппы и индикаторы ресурсной группы показателей

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Материально-техническое обеспечение	Фондовооруженность труда	Оснащенность работников предприятия основными фондами. Определяется как отношение среднегодовой стоимости основных фондов к среднесписочной численности работающих
	Коэффициент годности основных фондов	Отношение остаточной стоимости к полной балансовой стоимости основных средств
	Коэффициент обновления основных фондов	Характеризует воспроизводство основных фондов. Определяется отношением стоимости основных фондов, введенных в действие в течение года, к стоимости основных фондов на конец года

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Материально-техническое обеспечение	Индекс постоянного актива	Характеризует степень покрытия имобилизованного имущества собственными активами. Определяется отношением стоимости внеоборотных активов к собственному капиталу
	Коэффициент мобильности активов	Доля оборотных средств в сумме нетто-активов
	Уровень автоматизации и механизации производства	Оценивается экспертно на основе анализа этапов производства с применением ручного труда и оценки современности используемого оборудования и механизмов
	Доступность и надежность источников средств	Оценивается экспертно, исходя из опыта заимствования и взаимодействия с кредиторами
	Инвестиционная активность	Оценивается экспертно на основе сканирования осуществленных капиталовложений
	Возможность привлечения инвестиционных (заемных) ресурсов	Оценивается экспертно, исходя из уровня платежеспособности и кредитоспособности предприятия
Трудовые ресурсы	Производительность труда	Отражает размер выручки, приходящейся на одного работающего
	Уровень квалификации управленческого персонала	Оценивается экспертно, исходя из анализа соответствия персонала квалификационным требованиям, периодичности повышения квалификации, опыта и креативности менеджеров
	Доля основных производственных рабочих в общей численности занятых	Отношение численности работающих на производстве в общей численности работников предприятия. Характеризует затраты руководства на разработку, совершенствование и реализацию эффективных стратегических управленческих решений
	Периодичность обучения и повышения квалификации персонала	Частота проведенных квалификационных мер в экспертной оценке
	Участие персонала в осуществлении нововведений	Экспертная оценка заинтересованности и фактического участия работников в нововведениях
Информационные ресурсы	Уровень автоматизации сбора, обработки, хранения и передачи информации	Оценивается экспертно доступность, открытость, оперативность получения необходимой информации
	Активность коммуникационных связей внутри предприятия	Оценивается экспертно, исходя из анализа согласованности действий подразделений, психологического климата в коллективе
	Эффективность обратной связи между подразделениями	Оценивается экспертно соответствие действий подразделений единой стратегии эффективного управления
	Доступность информации о внешней среде предприятия	Оценивается экспертно на основе анализа работы маркетинговых служб и влияния внешних факторов на итоги деятельности предприятия

Помимо ресурсной группы показателей важным этапом оценки экономического и инновационного потенциала является определение системы финансовых показателей (табл. 2).

Таблица 2

Подгруппы и индикаторы финансовой группы показателей

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Платежеспособность и финансовая устойчивость	Коэффициент текущей ликвидности	Характеризует общую обеспеченность предприятия оборотными средствами для ведения хозяйственной деятельности. Рассчитывается как отношение стоимости оборотных средств к текущим обязательствам
	Коэффициент строгой ликвидности	Позволяет определить, какая часть текущих обязательств может быть погашена имеющимися денежными средствами и ожидаемыми поступлениями за отгруженную продукцию, выполненные работы. Рассчитывается как отношение суммы денежных средств и дебиторской задолженности к краткосрочным обязательствам
	Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами	Доля собственных оборотных средств в фактической стоимости имеющихся у предприятия оборотных средств
Деловая активность	Коэффициент оборачиваемости основных средств	Характеризует скорость обращения основного капитала. Рассчитывается как отношение выручки от реализации к средней стоимости внеоборотных активов
	Коэффициент оборачиваемости оборотных средств	Определяется отношением выручки от реализации к средней стоимости оборотных средств
	Коэффициент оборачиваемости запасов и затрат	Определяется отношением выручки от реализации к средней стоимости запасов и затрат
	Коэффициент оборачиваемости дебиторской задолженности	Определяется отношением выручки от реализации к средней сумме дебиторской задолженности
	Фондоотдача основных средств	Характеризует эффективность использования внеоборотных активов и определяется как отношение выручки от реализации продукции к среднегодовой стоимости основных средств
	Коэффициент отдачи собственного капитала	Характеризует отдачу вложенных в предприятие средств собственника и определяется отношением выручки от реализации продукции к средней величине собственных средств
Эффективность управления	Изменение отдачи затрат	Темп изменения суммы выручки на рубль затрат. Рассчитывается как отношение суммы выручки на один рубль затрат в отчетном году к сумме выручки на один рубль затрат в предыдущем году

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Эффективность управления	Рентабельность продаж	Показывает, сколько прибыли приходится на рубль реализованной продукции. Рассчитывается отношением прибыли от реализации к выручке от реализации
	Рентабельность активов	Рассчитывается отношением балансовой прибыли к стоимости активов. Экономический смысл показателя состоит в том, что он показывает, сколько рублей прибыли приходится на рубль имеющегося у предприятия капитала
	Рентабельность инвестиций	Характеризует экономическую эффективность всего используемого капитала. Рассчитывается отношением балансовой прибыли к собственному и долгосрочному заемному капиталу

Такая система показателей является наиболее емкой и информативной [7]. Она характеризует различные направления развития предприятия и показывает размещение и использование финансовых ресурсов, а также платежеспособность (кредитоспособность).

Для оценки уровня инновационного потенциала можно выделить группу инновационных показателей и индикаторов, отражающих степень организации и технологии управления на предприятии, его инновационную активность и экономические результаты от инновационной деятельности (табл. 3).

Таблица 3

Подгруппы и индикаторы инновационной группы показателей

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Организация и технология управления	Имидж предприятия и его товаров или услуг	Оценивается экспертно на основании наблюдений и маркетинговых исследований
	Гибкость организационной структуры управления предприятием	Оценивается экспертно, исходя из оперативности принятия и реализации управленческих решений и уровня взаимодействия управленческих подразделений
	Доля расходов на управление в общей сумме затрат	В случае отсутствия фактических расчетов оценивается экспертно
	Полнота исследований рынков сбыта	Оценивается экспертно активность и эффективность работы маркетинговых служб
	Уровень конкурентоспособности продукции или услуг	Оценивается экспертно на основе анализа продаж и внешней информации о ситуации на рынке
	Уровень исследований новых товаров или услуг	Оценивается экспертно периодичность и полнота данных исследований, достаточных для организации производства новых продуктов, товаров

Подгруппа	Индикатор	Примечание
Организация и технология управления	Развитость каналов сбыта	Оценивается на основе анализа отгрузки и уровня запасов готовой продукции, товаров
	Уровень рекламной деятельности	Оценивается экспертно на основе соотношения затрат на рекламу и полученного экономического эффекта
	Уровень предпродажного и послепродажного обслуживания	Оцениваются наличие соответствующих служб и уровень обслуживания
Инновационная активность	Готовность и способность менеджмента к восприятию нововведений	Оцениваются экспертно квалификация, стимулы и уровень креативности менеджеров
	Число специальных служб по исследованиям и разработкам	Оценивается экспертно доля занятых в данных подразделениях в отношении к общей численности управленческого персонала
	Степень востребованности исследований и разработок	Оценивается экспертно доля внедренных новаций из общего количества исследований и разработок
	Состояние лабораторной базы и испытательного оборудования	Оцениваются возможность самостоятельных исследований и наличие современного оборудования, необходимого в данных целях
	Процент новшеств, доведенных до реализации	По данным эксперта, владеющего информацией
	Доля затрат на исследования и разработки в общей сумме затрат	По данным эксперта, владеющего информацией
Экономические результаты инновационной деятельности	Экономия затрат в результате внедрения инноваций	Определяется по оперативным расчетам
	Оборачиваемость инновационных вложений	Определяется отношением выручки от реализации к объему произведенных вложений
	Рентабельность инновационной продукции	Характеризует экономическую эффективность инноваций. Рассчитывается отношением балансовой прибыли к выручке от реализации инновационных продуктов, товаров

Таким образом, предлагаемая методика содержит основные показатели, по результатам расчета которых можно в полной мере оценить уровень экономического и инновационного потенциала предприятия, а также провести подробный анализ направлений его развития и своевременного определения вектора происходящих изменений. При этом за счет применения системы относительных показателей предоставляется возможность сравнения и анализа разнонаправленных предприятий.

Помимо рассмотренных показателей, автором настоящей статьи рекомендуется построение модели предприятия для определения уровня потенциала.

Для построения модели предприятия, обладающего высокой степенью экономического и инновационного потенциала, его параметры должны иметь определенные характеристики.

Объем производства не должен превышать величину спроса S_i на новую продукцию (работы, услуги) i -го вида, т. е. будет описываться неравенством

$$\sum_{i=1}^n S_i \geq \sum_{i=1}^n N_i, \quad (1)$$

где n – число новых видов продукции, производимых предприятием; N_i – величина объема производства новой продукции i -го вида, выпускаемой на предприятии.

Размер инновационного потенциала зависит от числа инноваций, которые разрабатываются и внедряются на предприятии. Инновационный потенциал P_i^S может быть описан следующим выражением:

$$P_i^S = f(P_r^S, P_p^S), \quad (2)$$

где P_r^S – величина инновационной восприимчивости предприятия; P_p^S – величина инновационности результатов функционирования предприятия.

Величина инновационной восприимчивости предприятия оценивается по количеству ресурсов, независимо от их вида, которые можно считать нововведениями. Соответственно показатель инновационной восприимчивости предприятия можно определить как долю нововведений в общих размерах ее ресурсного обеспечения и записать в виде следующего выражения:

$$P_r^S = R_i / R_0, \quad (3)$$

где R_i – стоимость ресурсов, используемых предприятием; R_0 – общее количество ресурсов, которыми предприятие располагает.

Величина инновационности результатов функционирования предприятия, оцениваемая по количеству продуктов, которые можно считать новшествами, в общем виде описывается уравнением функциональной зависимости

$$P_p^S = f(I_n, I_s, E_0), \quad (4)$$

где I_n – показатель масштаба новизны продукции, производимой предприятием; I_s – показатель востребованности новшеств, произведенных на предприятии; E_0 – параметры аналогичной продукции, которые соответствуют мировому стандарту.

Каждую из определяющих величин (4) инновационности результатов функционирования системы можно определить следующим образом.

Масштабы производства новой продукции определяются отношением величины объема производства новой продукции i -го вида N_i к общему количеству N_0 произведенной продукции [4] и описываются уравнением

$$I_n = N_i / N_0. \quad (5)$$

Величину востребованности произведенных предприятием новшеств можно определить отношением количества (стоимости) реализованных новшеств N_{i_r} к общему объему производства новой продукции N_i i -го вида

$$I_s = N_{i_r} / N_i. \quad (6)$$

Производимые предприятием новшества должны соответствовать мировому уровню. Для того чтобы определить степень их востребованности, используется показатель, который характеризует размеры экспорта новшеств предприятия относительно общего объема их реализации:

$$E_0 = N_{i_i} / N_{i_r}, \quad (7)$$

где N_{i_i} – количество (стоимость) новшеств, экспортируемых за рубеж.

Представленные коэффициенты позволяют оценить размер инновационного потенциала, который может изменяться в пределах от 0 до 1 и определяться как произведение всех вышеназванных коэффициентов:

$$P_i^s = \frac{R_i}{R_0} \cdot \frac{N_i}{N_0} \cdot \frac{N_{i_r}}{N_i} \cdot \frac{N_{i_i}}{N_{i_r}} = \frac{R_i}{R_0} \cdot \frac{N_{i_i}}{N_0}. \quad (8)$$

Таким образом, с помощью построенной модели представляется возможным оценить инновационный потенциал предприятия [8]. На основе полученных результатов оценки эффективности использования инновационного потенциала руководители предприятий могут сформировать планы действий деятельности предприятия в будущем и запланировать осуществление проектов с использованием имеющихся различных инновационных ресурсов на предприятии, разработать меры по достижению оптимального баланса системы инновационных ресурсов.

Работа выполнена под научным руководством д-ра экон. наук, профессора А. Н. Плотникова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев В. В. Финансовый анализ : методы и процедуры. М. : Финансы и статистика, 2001. 560 с.

2. *Плотников А. Н., Литонинский С. Н.* Анализ методов оценки инновационного потенциала предприятия и направления их совершенствования // Проблемы современной экономики : инвестиции, инновации, логистика, труд, недвижимость : сб. науч. тр. Саратов : КУБиК, 2012. Вып. 7. С. 248–263.

3. *Жиц Г. И.* Способности и возможности : рассуждения о некоторых аспектах методологии оценки влияния инновационного потенциала на развитие социально-экономических систем различного уровня сложности // Инновации. 2008. № 11. С. 83–87.

4. *Плотников А. Н., Попов А. В.* Научная сфера и ее влияние на инновационный потенциал региона // Менеджмент : управление в социальных и экономических системах : межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. С. Д. Резника. Пенза : Пензенский гос. ун.-т архитектуры и строительства, 2014. Вып. 5. С. 30–35.

5. *Плотников А. Н.* Сущностное содержание инновационного потенциала системы менеджмента качества в сфере технологий разработки программного обеспечения // 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. 119–124.

6. *Астафьева Н. В., Гордашникова О. Ю., Плотников А. Н., Плотников А. П., Плотников Д. А., Пчелинцева И. Н.* Теория и практика формирования, оценки и развития инновационного потенциала СМК в сфере технологий программного обеспечения : учеб. пособие / под общ. ред. проф. А. Н. Плотникова. Саратов : КУБиК, 2013. 111 с.

7. *Астафьева Н. В., Гордашникова О. Ю., Плотников А. Н., Плотников А. П., Плотников Д. А., Пчелинцева И. Н.* Теоретико-методологические основы развития инновационного потенциала СМК технологии производства программного обеспечения / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. А. Н. Плотникова. Саратов : Изд. дом «Райт-Экспо», 2013. 134 с.

8. *Плотников А. Н., Ефименко И. Б., Закрошвили В. С.* Инновационный подход к интегральной оценке // Социально-экономические проблемы жилищного строительства и пути их решения в период выхода из кризиса : материалы междунар. науч.-практ. симпозиума, 10–11 дек. 2009 г., Саратов / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 2010. С. 193–198.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Общие положения

1.1. Сборник «Гетеромагнитная микроэлектроника» выходит 2 раза в год и публикует материалы теоретических и экспериментальных исследований полупроводниковых и магнитополупроводниковых микро- и нанoeлектронных систем, включая системы с цифровой обработкой информации, новых типов датчиков, активных устройств (усилителей, генераторов, синтезаторов частот и др.), а также статьи о новых технологиях, методах и средствах контроля, о современном метрологическом обеспечении, подготовке и переподготовке кадров, прогнозно-аналитических исследованиях.

1.2. Объем статьи не должен превышать 16 страниц (1 печатного листа).

1.3. 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 самостоятельной 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. *Игнатьев А. В., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 380 с.

Образец описания статьи в журнале:

2. *Игнатьев 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. *Игнатьев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. В.* О времени тепловой готовности феррит-транзисторного СВЧ-генератора на высоких уровнях мощности // Гетероманитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. Вып.1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2004. С. 139–151.

Образец короткого 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 Игнатьев 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 дискете «3,5», 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 5 пробелов. Вся работа должна быть выполнена одной гарнитурой (Times New Roman).

4.2. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation, 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.

4.4. Иллюстрации должны быть представлены в форматах TIFF, JPEG.

Дискеты и рукописи не возвращаются

Адрес : Россия, 410040, г. Саратов, пр. 50 лет Октября, ОАО «НИИ-Тантал»
Тел. : 8-(8452) 35-53-39
Факс : 8-(8452) 34-08-70
E-mail : kbkt@san.ru

ПРАВИЛА ДЕПОНИРОВАНИЯ
в Центре специальной информации
ОАО «Институт критических технологий»

Депонирование научных работ ограниченного доступа является основной формой их публикаций для соискания ученых степеней доктора и кандидата наук. ОАО «Институт критических технологий» гарантирует принятие от авторов на депонирование рукописей НИР и ОКР (статей, обзоров, монографий и др.) и обеспечение информационных запросов на депонированные работы 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.

Входящие в сборник работы в авторской редакции по указанной тематике подлежат депонированию в Центре специальной информации ОАО «Институт критических технологий» в установленной порядке.

Документы направляются в Центр специальной информации 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>Васильев А. В., Игнатъев А. А.</i> Нелинейная модель сферического ЖИГ-резонатора.....	4
<i>Аникин В. М., Муштаков А. В.</i> Автокорреляционная функция орбит кусочно-линейного хаотического отображения общего вида.....	12
<i>Чурочкина С. В.</i> О проблеме сходимости ряда теории возмущений в квазипотенциальном методе.....	23
<i>Наянов В. И., Ноянов Ю. В.</i> Компьютерный контроль процесса надвижки неразрезных мостовых пролетов.....	36
<i>Наянов В. И., Ноянов Ю. В.</i> Компьютерная визуализация формы уширений буронабивных свай при строительстве внеклассных мостов.....	43
<i>Назаров С. И., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л.</i> Проектирование микропроцессора с расширенным набором команд манипуляции битами данных на базе архитектуры OpenRisc1200.....	50
<i>Анищенко А. Н., Ляшенко А. В., Солопов П. А., Сотов Л. С.</i> Минимизация рисков утечки информации из-за побочных электромагнитных излучений персонального компьютера.....	66
<i>Игнатъев А. А., Проскураков Г. М., Васильев А. В.</i> Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов.....	78
<i>Проскураков Г. М., Игнатъев А. А., Спиридонова Т. А., Спиридонов Д. М.</i> Алгоритмы начальной выставки автономной ориентации управляемой платформы на подвижном объекте	91
<i>Проскураков Г. М., Маслов А. А., Игнатъев А. А.</i> Рабочие алгоритмы автономной ориентации управляемой платформы на подвижном объекте.....	101
<i>Черкасова О. А.</i> Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования.....	112
Методические аспекты физического образования	
<i>Черкасова О. А., Чурочкина С. В.</i> Компетентностный подход при анализе освоения образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 03.03.02 Физика.....	121
Экономика в промышленности	
<i>Плотников А. Н., Плотников Д. А.</i> Система венчурного инвестирования наукоемких высокотехнологичных предприятий.....	128
<i>Вьюнова Р. Р.</i> Система показателей и индикаторов оценки экономического и инновационного потенциала предприятия.....	133
Правила для авторов.....	144
Правила депонирования.....	146

Подписка на 2015 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 2 раза в год.

Научное издание

ГЕТЕРОМАГНИТНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Сборник научных трудов

Выпуск 17

**Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника.
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 *В. В. Володина*. 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 25.12.2014. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 8,60 (9,25). Тираж 100. Заказ 85.

Издательство Саратовского университета. 410012, Саратов, Астраханская, 83.
Типография Издательства Саратовского университета. 410012, Саратов, Астраханская, 83.